ТРУДЫ

33-й Международной научно-технической конференции

"ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА"

29-30 сентября 2022, Санкт-Петербург, Россия

PROCEEDINGS

of the 33rd International Scientific and Technological Conference

"EXTREME ROBOTICS"

September 29-30, 2022 Saint Petersburg, Russia

ER.RTC.RU

Выпускается с 2013 года

РОБОТОТЕХНИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ КИБЕРНЕТИКА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Включен в базу Russian Science Citation Index (RSCI) на платформе Web of Science

Подписной индекс в каталоге «Роспечать» - **59896**

Уважаемые коллеги!

Хорошая новость для наших авторов

Журнал «Робототехника и техническая кибернетика» включен в базу данных Russian Science Citation Index (RSCI) на платформе Web of Science. Цель RSCI - создать базу научных статей из лучших и авторитетных российских журналов на платформе Web of Science. Научные журналы, принятые в эту базу по результатам экспертизы, а также статьи российских учёных, опубликованные в журналах, индексируемых в Web of Science Core Collection и Scopus, и составляют ядро РИНЦ.

Данные об издании публикуются в реферативном журнале Всероссийского института научной и технической информации Российской академии наук (ВИНИТИ РАН) (серия «Машиностроение», выпуск «Робототехника»). Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, утвержденный приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 29.05.2017 г.

Коды специальностей: 05.07.02, 05.07.07, 05.07.10, 05.13.11, 05.13.18, 05.13.19.

Приглашаем к сотрудничеству

ISSN 2310-5305 (Print)
ISSN 2312-6612 (Online)

Издатель

Журнал издается Государственным научным центром Российской Федерации федеральным государственным автономным научным учреждением «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ЦНИИ РТК)

Адрес редакции: Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 21, тел.: +7(812)552-13-25, zheleznyakov@rtc.ru, www.rusrobotics.ru

ТРУДЫ

33-й Международной научно-технической конференции

ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА

29-30 сентября 2022 года, Санкт-Петербург

PROCEEDINGS

of the 33rd International Scientific and Technological Conference

EXTREME ROBOTICS

September 29-30, 2022, Saint Petersburg, Russia

er.rtc.ru

УДК 004.896:007.5
ББК 32.813
Э41

Э41 ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА. Труды 33-й Международной научно-технической конференции «ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА», 29-30 сентября 2022 г. – Санкт-Петербург: Изд-во: ЦНИИ РТК, 2022. – 596 с. – 10.31776/ConfER.33.2022.

Материалы сборника отражают круг актуальных проблем и задач в сфере робототехнических систем и средств безопасности, представленных на 33-й Международной научно-технической конференции «ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА». Доклады опубликованы в авторской редакции.

УДК 004.896:007.5
ББК 32.813

Proceedings of the International Scientific and Technological Conference EXTREME ROBOTICS. — 596 p. — 10.31776/ConfER.33.2022

Proceeding’s materials highlight an array of challenging issues and tasks in the sphere of robotic systems and safety facilities discussed at the 33rd International Scientific and Technological Conference «EXTREME ROBOTICS». Papers are published with author's edition.

ISSN 2658-7645
© ЦНИИ робототехники и технической кибернетики, 2022
© The Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, 2022

ОРГАНИЗАТОР

Государственный научный центр Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ГНЦ РФ ЦНИИ РТК), Санкт-Петербург

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ

- Министерства науки и высшего образования Российской Федерации
- Военно-промышленной комиссии Российской Федерации
- Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий
- Министерства здравоохранения Российской Федерации
- Российской академии наук
- Ассоциации государственных научных центров «Наука»
- Союза промышленников и предпринимателей Санкт-Петербурга
- Правительства Санкт-Петербурга
- Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА

- Теоретический и прикладной научно-технический журнал «Мехатроника, автоматизация, управление», Москва
- Журнал «Труды СПИИРАН», Санкт-Петербург
- Научно-технический журнал «Робототехника и техническая кибернетика», Санкт-Петербург
- Журнал «Новый Оборонный Заказ. Стратегии», Санкт-Петербург

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Председатель:

Попов Александр Владимирович, к.т.н, заместитель директора по научной работе, ГНЦ РФ ЦНИИ РТК

Члены программного комитета:

Андреев Виктор Павлович, д.т.н., профессор кафедры «Сенсорные и управляющие системы», МГТУ «СТАНКИН»

Битный-Шляхто Виктор Михайлович, заместитель главного конструктора, ГНЦ РФ ЦНИИ РТК

Визильтер Юрий Валентинович, д.ф-м.н., профессор РАН, начальник подразделения, ФГУП «ГосНИИАС»

Даляев Игорь Юрьевич, к.т.н., главный конструктор по экстремальной робототехнике и автоматизации, ГНЦ РФ ЦНИИ РТК

Игнатиади Евгений Константинович, главный конструктор по интеллектуальным системам управления и робототехнике, ГНЦ РФ ЦНИИ РТК

Казанцев Виктор Борисович, д.ф-м н, главный научный сотрудник НИЦ «Компоненты робототехники и сенсорика», ГНЦ РФ ЦНИИ РТК

Матвеев Станислав Алексеевич, к.т.н., проректор по научной работе и инновационному развитию, БГТУ «Военмех» им Д.Ф. Устинова

Мещеряков Роман Валерьевич, д.т.н., профессор РАН, зав. лабораторией киберфизических систем, ИПУ РАН

Проценюк Алексей Сергеевич, заместитель главного конструктора, ГНЦ РФ ЦНИИ РТК

Пряничников Валентин Евгеньевич, д.т.н., зав. кафедрой СиУС МГТУ «Станкин» при ИПМ им. Келдыша РАН

Семенихин Петр Валерьевич, заместитель главного конструктора по информационно-измерительным системам, ГНЦ РФ ЦНИИ РТК

Смирнова Екатерина Юрьевна, заместитель руководителя НИЦ «Компоненты робототехники и сенсорика», ГНЦ РФ ЦНИИ РТК

Цариченко Сергей Георгиевич, д.т.н., профессор, НИУ МГСУ

Шмаков Олег Александрович, заместитель директора, ГНЦ РФ ЦНИИ РТК

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Председатель:

Лопота Александр Витальевич, д.т.н., директор-главный конструктор, ГНЦ РФ ЦНИИ РТК

Члены организационного комитета:

Анцев Георгий Владимирович, к.т.н., генеральный директор-генеральный конструктор, АО «НПП «Радар ММС»

Емельянов Сергей Геннадьевич, д.т.н., профессор, ректор, ЮЗГУ

Желтов Сергей Юрьевич, д.т.н., академик РАН, заместитель генерального директора по науке, ФГУП «ГосНИИАС»

Каляев Игорь Анатольевич, д.т.н., академик РАН, председатель совета по приоритетным направлениям научно-технологического развития Российской Федерации

Кудж Станислав Алексеевич, д.т.н., ректор, РТУ МИРЭА

Лобин Михаил Александрович, генеральный директор исполнительной дирекции, первый вице-президент Союза промышленников и предпринимателей Санкт-Петербурга

Лопота Виталий Александрович, д.т.н., чл.-корр., научный руководитель-генеральный конструктор, ГНЦ РФ ЦНИИ РТК

Максимов Андрей Станиславович, к.т.н., председатель Комитета по науке и высшей школе

Мартьянов Олег Викторович, руководитель Национального центра развития технологий и базовых элементов робототехники ФПИ

Осыко Михаил Владимирович, член коллегии Военно-промышленной комиссии Российской Федерации

Ронжин Андрей Леонидович, д.т.н., профессор РАН, директор, СПб ФИЦ РАН

Пешехонов Владимир Григорьевич, д.т.н., академик РАН, научный руководитель, ЦНИИ «Электроприбор»

Рудской Андрей Иванович, д.т.н., академик РАН, ректор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Серебренный Владимир Валерьевич, к.т.н., ректор, МГТУ «СТАНКИН»

Соколов Виктор Николаевич, вице-адмирал, начальник ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия имени Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова»

Чурилов Олег Валерьевич, директор Департамента развития технологического предпринимательства и трансфера технологий Минобрнауки России

ОГЛАВЛЕНИЕ

СЕКЦИЯ «НАЗЕМНАЯ РОБОТОТЕХНИКА»

А.Л. Коротков, И.И. Саитов, Н.О. Тапеха, А.Н. Тимофеев, О.А. Шмаков
МАНИПУЛЯЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ ДЛЯ РАБОТЫ В СТЕСНЕННЫХ ПРОСТРАНСТВАХ 11

А.М. Бойко, А.А. Будза, А.Г. Кваско, П.В. Костырин, К.А. Максимов, Д.В. Ткаченко, П.Ю. Шамрай ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНАЯ ОПТОЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА ОТСЛЕЖИВАНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ (БЛА) 18

В П. Андреев ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ РАБОТЫ КИНО- И ТЕЛЕЖУРНАЛИСТОВ СРЕДСТВАМИ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ 25

О.Н. Галактионов, Г.Э. Рего, М. Томских, С.А. Завьялов, Д.Ж. Корзун
О КОНСТРУКЦИИ КОЛЕСНОГО ШАССИ И СЕНСОРНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ АВТОНОМНОГО ДВИЖЕНИЯ ПО ТРУДНОПРОХОДИМОЙ МЕСТНОСТИ С ПРЕОДОЛЕНИЕМ И ОБХОДОМ ПРЕПЯТСТВИЙ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛЕСОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАБОТ 35

И.А. Шипов МОДЕЛИРОВАНИЕ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НАЗЕМНОГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА 46

С.Г. Немчинов, Ю.И. Горбань, А.А. Туровский, Р.В. Приходченко
СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ УСТАНОВОК ПОЖАРОТУШЕНИЯ 51

А.Н. Жирабок, А.В. Зуев, Ким Чхун Ир ИНТЕРВАЛЬНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ПЕРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДА РОБОТА 57

А.И. Горох ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ОБЛИК РОБОТИЗИРОВАННОГО ПОДВИЖНОГО МИШЕННОГО КОМПЛЕКСА 63

И.А. Зенков, Т.В. Меньшакова ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОН НАЗЕМНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПУСКАХ УПРАВЛЯЕМЫХ РАКЕТ ПО ДВИЖУЩИМСЯ РОБОТИЗИРОВАННЫМ АВТОМОБИЛЯМ-МИШЕНЯМ 69

А.Ю. Гетманцев СИСТЕМА БОРТОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ РОБОТИЗИРОВАННОГО АВТОМОБИЛЯ-МИШЕНИ: ТРЕБОВАНИЯ, АСПЕКТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ 75

И.В. Гурин, М.С. Красило, П.Г. Скубак УСТРОЙСТВО АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ КОРОБКОЙ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ПЕРЕДАЧ 83

Г.М. Исраелян, А.А. Назаров, Е.О.Гаранин СИНТЕЗ И ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОУРОВНЕВОЙ АРХИТЕКТУРЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ УЗЛАМИ БЕСПИЛОТНОГО ТС 98

А.В. Михайличенко, И.Б. Паращук НАДЕЖНОСТЬ КОМПОНЕНТОВ ХРАНЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НАЗЕМНЫМИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ ... 109

Д.С. Яковлев, А.А. Тачков МЕТОД ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ БЕСПИЛОТНОГО ДВИЖЕНИЯ НАЗЕМНЫХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ 115

С.Ю. Курочкин, А.А. Тачков СТАТИСТИЧЕСКАЯ ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ГРУППОВОГО ДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ С УЧЕТОМ ВЕРОЯТНОСТНО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ СВЯЗИ И АВТОНОМНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ 123

Е.В. Иванов СХЕМА ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОГО ТРОСОВОГО МАНИПУЛЯТОРА ПОВЫШЕННОЙ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ 130

А.В. Козов РЕАЛИЗАЦИЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ДИСКРЕТНО-СОБЫТИЙНОЙ СИСТЕМЫ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМИ РОБОТАМИ 139

Е.К. Игнатиади, И.К. Петушок СИСТЕМА ПОДГОТОВКИ ОПЕРАТОРОВ И ОБСЛУЖИВАЮЩЕГО ПЕРСОНАЛА НА ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РТК 147

Д.О. Дохов, И.И. Саитов, Д.Н. Новиков, Н.В. Заруцкий АНТРОПОМОРФНАЯ КИСТЬ 151

Д.Н. Новиков, Д.О. Дохов, И.И. Саитов, Н.В. Заруцкий МЕХАНИЗМ ОБЕЗВЕШИВАНИЯ ЗАДАЮЩЕЙ МАНИПУЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ С ПАКЕТОМ ЛИСТОВЫХ ПРУЖИН 157

Д.С. Попов ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ НАЗЕМНЫМИ МОБИЛЬНЫМИ РОБОТАМИ В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ ВРЕМЕННЫХ ЗАДЕРЖЕК В КАНАЛАХ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ 164

И.Б.Прямицын, М.Т. Коротких, Д.С. Попов РАСПРЕДЕЛЕННАЯ СИСТЕМА ПОУЗЛОВОГО ИСПЫТАНИЯ ПРИ СБОРКЕ ЛЕГКИХ РОБОТОВ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ 177

И.И. Саитов, Д.Н. Новиков, Д.О. Дохов, А.Н. Тимофеев РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОГО ПОВОРОТНОГО МОДУЛЯ С СИЛОВОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ 182

В.О. Гончаров, Н.С. Слободзян, Р.А. Пряничников РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ БЕЗ ПРИМЕНЕНИЯ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА 189

М.В. Прошутинский, Н.Г. Яковенко КОМПЕНСАЦИЯ ПОГРЕШНОСТИ ДАННЫХ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ АВТОНОМНОГО МАЛОГАБАРИТНОГО ПОДВИЖНОГО РОБОТА 196

Д.А. Вольф ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ КОЛЛЕКТОРНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ 206

Ю.Ф. Ивлев ПРОБЛЕМЫ В СОЗДАНИИ ГЕККОНОПОДОБНЫХ РОБОТОВ 213

Д.А. Корниенко, Ю.С. Дубинов РАЗРАБОТКА НОВОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПО ЗАБОЛОЧЕННОЙ И ОБВОДНЕННОЙ МЕСТНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИБРАЦИОННОЙ ТЯГИ 222

И.И. Нестеров, Н.В. Мальгин, А.Б. Кутман, А.А. Торопков ВЫСОКОТОЧНЫЕ МЭМС ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ С ГИРОКОМПАСИРОВАНИЕМ 229

М.Г. Щербаков УНИВЕРСАЛЬНЫЕ ГАЗОАНАЛИЗАТОРЫ 232

СЕКЦИЯ «МОРСКАЯ РОБОТОТЕХНИКА»

О.В. Третьяков, П.Г. Тенишев, В.А. Туголуков СОЗДАНИЕ РОБОТИЗИРОВАННОГО СКОРОСТНОГО МОРЕХОДНОГО КАТЕРА В ПЛАНАРНОМ КОРПУСЕ.....238

Авс Ахмад, А.С. Ющенко ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОДВОДНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА С ВОЛНООБРАЗНЫМИ ДВИЖИТЕЛЯМИ.....243

В.В. Сергеев, С.И. Косянчук, А.Л. Шидловский, К.С.Талировский СИСТЕМА ФОТО И ВИДЕО СЪЕМКИ ДЛЯ БУКСИРОВЩИКА ВОДОЛАЗОВ.....253

С.А. Половко, А.С. Проценюк, В.В. Целуйко ОПЫТ СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ ПОДВОДНОЙ СТЫКОВКИ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ СОВМЕСТНЫХ ДЕЙСТВИЙ 259

К.К. Забелло, Н.А. Щур РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СОПРЯЖЕННЫХ РАСЧЁТОВ ДИНАМИКИ ТЕЛА, СОВЕРШАЮЩЕГО ВЗМАХОВЫЕ КОЛЕБАНИЯ, И ГИДРОДИНАМИКИ, ОБТЕКАЮЩЕЙ ЕГО ЖИДКОСТИ 264

А.А. Иванов К ВОПРОСУ ОБ УПРАВЛЯЕМОСТИ ГИПЕРИЗБЫТОЧНОГО РЕКОНФИГУРИРУЕМОГО НПА.....270

А.В. Зуев, А.А. Проценко, А.А. Тимошенко, Д.В. Копылов МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ САМОНАСТРОАИВАЮЩИХСЯ КОРРЕКТИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПОДВОДНЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ БЕСКОЛЛЕКТОРНЫЕ ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА 277

В.В. Чернышев, В.В. Арыканцев, Я.В. Калинин, А.Х. Насари Задеган, Н.Г. Шаронов ОТРАБОТКА МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ШАГАЮЩИХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЕРЕДВИГАЮЩИХСЯ ПО ДНУ 286

Д.С. Кудрявцев, А.А. Яковлев, Петр П. Чернусь, П.П. Чернусь, Р.В. Сахабудинов, А.С. Голосий ОБЕСПЕЧЕНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «АВТОНОМНЫЙ ГЛУБОКОВОДНЫЙ АППАРАТ» В РЕЖИМЕ АКТИВНОЙ КОМПЕНСАЦИИ КАЧКИ.....295

С.С. Кавтрев, Е.Ю. Смирнова, В.А. Леонтьев, А.С. Проценюк, М.Н. Плавинский МОДЕЛИ ПРИМЕНЕНИЯ ГРУППЫ НПА, ОРГАНИЗАЦИЯ СВЯЗИ И ВЫПОЛНЕНИЕ ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ 308

И.Ю. Липко, К.В. Дементьев ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ УПРОЩЁННОЙ ФОРМЫ ПОДВОДНОГО АППАРАТА НА ЕГО УГЛОВЫЕ КООРДИНАТЫ: ПРЯМОУГОЛЬНЫЙ ПАРАЛЛЕЛЕПИПЕД И ЦИЛИНДР.....313

Д.И. Николаев ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ КОМПЛЕКСОВ СВЯЗИ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ ПРИ ИХ ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРНОЙ ИЗБЫТОЧНОСТИ.....318

Д.К. Серов ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ 325

В.М. Битный-Шляхто, П.К. Шубин, М.В. Кулешова ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГРУППЫ АВТОНОМНЫХ РОБОТОВ ПРИ СПАСАНИИ ЛЮДЕЙ В АРКТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ.....334

СЕКЦИЯ «ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИКЕ»

Е.Ю. Шмалько, В.В. Серебренный ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА СИНТЕЗИРОВАННОГО ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ 340

Л.А. Станкевич, А. Журавская УПРАВЛЕНИЕ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ НА ОСНОВЕ НЕЙРОИНТЕРФЕЙСА 348

А.А. Демчева, А.М. Корсаков, А.В. Бахшиев МОДЕЛИРОВАНИЕ БОЛЕВЫХ ОЩУЩЕНИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ БИНАРНОЙ КЛАССИФИКАЦИИ 355

М.Ф. Степанов, А.М. Степанов, О.М. Степанова АСПЕКТЫ САМООРГАНИЗАЦИИ И АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ 362

А.Д. Московский, М.А. Ровбо, П.С. Сорокоумов ПРЕДСКАЗАНИЕ ОПАСНЫХ СИТУАЦИЙ ПО ДАННЫМ СТЕРЕОКАМЕРЫ ПРИ ДВИЖЕНИИ МОБИЛЬНОГО РОБОТА ПО СЛОЖНОМУ ЛАНДШАФТУ 372

Д.А. Анохин, К.И. Кий АНАЛИЗ НАМЕРЕНИЙ СОСЕДНИХ ВОДИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ 378

М.И. Надежин, О.В. Широбоков СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К ДИАГНОСТИКЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ 386

А.И. Калинин ОБУЧЕНИЕ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ В МОБИЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИКЕ 393

В.В. Варлашин АЛГОРИТМ УСТРАНЕНИЯ ИСКАЖЕНИЙ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ, ПОЛУЧЕННЫХ С ВИДЕОКАМЕР СО СВЕРХШИРОКОУГОЛЬНЫМИ ОБЪЕКТИВАМИ 402

В.В. Варлашин, О.А. Шмаков ПОДХОДЫ К ОРГАНИЗАЦИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНОГО ПРОМЫШЛЕННОГО ЭКЗОСКЕЛЕТА 409

В.А. Поминова, И.К. Петушок ПОДХОДЫ К ИССЛЕДОВАНИЮ МЕТОДОВ СОЗДАНИЯ ОТЛАДОЧНО-МОДЕЛИРУЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО И ПОВЕДЕНЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РТК И ГРУПП РТК 416

А.В. Сергеев ПОПУЛЯРИЗАЦИЯ РОБОТОТЕХНИКИ С ПОМОЩЬЮ ВИРТУАЛЬНОЙ ЭКСПОЗИЦИИ 424

КРУГЛЫЙ СТОЛ «РОБОТИЗАЦИЯ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ»

И.Ю. Даляев, В.М. Копылов, А.А. Трутс, Ю.П. Зайков, В.А. Ковров, А.С. Холкина РОБОТИЗАЦИЯ ПИРОХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ОЯТ 430

А.А. Волошкин, Л.А. Рыбак, А.В. Ноздрачева, В.В. Черкасов, Т.А. Семененко РОБОТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА НА БАЗЕ ДЕЛЬТА МАНИПУЛЯТОРА ДЛЯ АЛИКВОТИРОВАНИЯ В ЗАКРЫТЫХ КАМЕРАХ И БОКСАХ 436

М.В. Носиков, И.В. Войнов, Б.А. Морозов МОБИЛЬНЫЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС МРК-65 ДЛЯ РАБОТ НА ОБЪЕКТАХ АТОМНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ.....445

С.А. Андреев, С.Ю. Касьянов О РОБОТИЗАЦИИ ЯДЕРНО ОПАСНЫХ РАБОТ.....452

И.В. Шардыко, В.В. Титов, В.М. Копылов СИСТЕМА ПОЗИЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРОМ С УПРУГИМИ ШАРНИРАМИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ТИПА.....459

П.С. Григорьев, А.А. Трутс, П.А. Лошицкий, Е.А. Смирнов, Д.С. Костромин О РЕЗУЛЬТАТАХ АПРОБИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В ОБЛАСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....469

М.В. Ремизов, О.В. Вольпяс ПЕРСПЕКТИВНАЯ АППАРАТУРА РАДИАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ.....480

КРУГЛЫЙ СТОЛ «МЕДИЦИНСКАЯ РОБОТОТЕХНИКА»

Д.Б. Смирнов, А.А. Воротников, Ю.В. Подураев ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОТРАЖЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРА ДЛЯ МЕДИЦИНСКОГО РОБОТА 489

П.В. Семенихин, В.В. Харламов, К.В. Филипенко СОВРЕМЕННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АППАРАТНОЙ ПЕРФУЗИИ ДЛЯ СОХРАНЕНИЯ И ПОДДЕРЖАНИЯ ДОНОРСКОЙ ПЕЧЕНИ EX VIVO.....497

И.С. Барынкин, А.С. Смирнов ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ АКТИВНОГО ЭКЗОСКЕЛЕТА НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ.....505

Д.Р. Хашев, Е.А. Лукьянов РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА АНАЛИЗА КУЛЬТИ ПАЦИЕНТА.....522

А.В. Синегуб, А.В. Лопота КИБЕРПРОТЕЗИРОВАНИЕ. ИНТЕГРАЦИЯ ПРОТЕЗА В ТЕЛО ЧЕЛОВЕКА.....531

КРУГЛЫЙ СТОЛ «КОСМИЧЕСКАЯ РОБОТОТЕХНИКА»

А.С. Перхов, Р.С. Зверев, Т.О. Козлова, М.Л. Литвак ЛУНА-27. ГРУНТОЗАБОРНОЕ УСТРОЙСТВО.....536

М.И. Калинов, В.А. Родионов ВЛИЯНИЕ ПРЕЦЕССИИ УЗЛОВ ОРБИТ РАЗНОВЫСОТНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА МОРСКИМИ ОБЪЕКТАМИ.....544

В.А. Дикарев, А.Ю. Кикина, Ю.С. Чеботарев, А.Н. Симбаев, Э.В.Никитов, Ю.С. Агаркова РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОПЕРАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ВНЕКОРАБЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ КОСМОНАВТОВ: ВАРИАНТ, СПОСОБ СОГЛАСОВАННОСТИ, КОНТРОЛЬ ПРИМЕНЕНИЯ 550

К.Г. Райкунов ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ АВТОМАТИЧЕСКИХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НА НАЧАЛЬНОМ ЭТАПЕ РАЗВЁРТЫВАНИЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ НАУЧНОЙ СТАНЦИИ НА ПОВЕРХНОСТИ ЛУНЫ 564

Е.В. Власенков, Н.М. Хамидуллина ОЦЕНКА РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ДАТЧИКИ ЭФФЕКТА ХОЛЛА В ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ РАБОТЫ В СОСТАВЕ ЛУНОХОДОВ И НА ВНЕШНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПЕРСПЕКТИВНОЙ РОССИЙСКОЙ ОРБИТАЛЬНОЙ СЛУЖЕБНОЙ СТАНЦИИ 576

А.В. Васильев, И.В. Шардыко, В.А. Гольдберг, В.М. Копылов ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МОДУЛЬНЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ В КОСМИЧЕСКОЙ РОБОТОТЕХНИКЕ 583

А.Л. Коротков[1,2], И.И. Саитов[1,2], Н.О. Тапеха[1,2], А.Н. Тимофеев[1,2], О.А. Шмаков[1,2]

МАНИПУЛЯЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ ДЛЯ РАБОТЫ В СТЕСНЕННЫХ ПРОСТРАНСТВАХ

[1]ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург; [2]СПбПУ, Санкт-Петербург,
a.korotkov@rtc.ru, i.saitov@rtc.ru, n.tapekha@rtc.ru, timofeevan@inbox.ru, shmakov@rtc.ru

Аннотация

В современном мире актуальны задачи использования робототехнических средств при работе с объектами сложной геометрической формы, их захват и исследование в гражданских целях. В данной статье анализируются приспособленность манипуляторов к выполнению этих операций. Рассматриваются методы и средства захвата предметов различной формы. В рамках обзорной части анализируются существующие мобильные роботы, которые могут использоваться для задач исследования объектов сложной формы и различных физических свойств, а также современные адаптивные захватные устройства. Поставлен ряд проблем, связанных с физическими свойствами исследуемых предметов и местами их расположения. Предлагаются технические решения адаптации захватных устройств к объектам непредсказуемой формы в условиях проведения работ в узких стесненных зонах.

Ключевые слова

Захватное устройство, объект манипулирования, манипулятор, исследование, неприспособленность к захвату.

A.L. Korotkov[1,2], I.I. Saitov[1,2], N.O. Tapekha[1,2], A.N. Timofeev[1,2], O.A. Shmakov[1,2]

MANIPULATION SYSTEMS OF MOBILE ROBOTS FOR WORKING IN CRAMPED SPACES

[1]Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, St. Petersburg. Russia; [2]SPBSTU, St. Peterburg, Russia, a.korotkov@rtc.ru, i.saitov@rtc.ru, n.tapekha@rtc.ru, timofeevan@inbox.ru, shmakov@rtc.ru

Annotation

Today, the tasks of using robotic means in the working with objects of complex geometric shape, their capture and research for civilian purposes. This article analyzes the adaptability of manipulators to perform these operations. Methods and means of gripping objects of various shapes are considered. Within the bounds of the review part, existing mobile robots designed specifically for objects of complex shape and various physical properties as well as modern adaptive gripping devices are analyzed. A number of problems related to the physical properties of investigated subjects and their locations. Technical solutions for the adaptation of gripping devices to objects of unpredictable shape in the conditions of work in narrow cramped areas are proposed.

Key words

Gripping device, object of manipulation, manipulator, research, inability to grip.

Наибольшее практическое распространение получили мобильные роботы (МР) для обнаружения объектов сложной геометрической формы (ОСГФ). Кроме этого, стационарные роботы применяются в центрах дальнейшего анализа и исследования отдельных элементов ОСГФ. Все они управляются операторами вручную, дистанционно.

Большинство МР, одним из назначений которых являются операции с ОСГФ способны обнаруживать или переносить их в места для изучения их специфики. Для работы с ОСГФ они оснащаются манипуляторами достаточной грузоподъемности (10…20 кг) управляемыми оператором дистанционно.

Например, мобильный робот MV-4 (комплекс TEL 600, Германия) имеет множество различных конфигураций [1]. Данный робот оснащается манипулятором, имеющим от трех до шести степеней свободы в зависимости от поставленной задачи. В качестве оборудования, устанавливаемого на манипуляторе, используются сменные захватные устройства (ЗУ) с различными функциональными возможностями, определяемыми формой и размерами губок ЗУ. Однако, смена различных ЗУ в комплексах подобного типа, приведенных в данной статье далее предусмотрена только в ручном режиме. Поэтому выбор необходимого захватного устройства должен происходить до ввода комплекса в рабочую зону. В то время как определить тип исследуемого ОСГФ и следовательно выбрать подходящее ЗУ до начала работ, часто не представляется возможным.

Для обнаружения и исследования ОСГФ может быть применен малогабаритный робототехнический комплекс (МРК) «Капитан», разработанный в ЦНИИ РТК [2]. Данный комплекс оснащен широким спектром унифицированного навесного оборудования, применяемого в зависимости от поставленной задачи, с возможностью быстрой замены. Его пятистепенной манипулятор, позволяет захватывать и перемещать ОСГФ (до 8 кг). За счет гусеничного шасси с изменяемой геометрией МРК «Капитан» способен преодолевать различные препятствия и перемещаться по различным типам поверхностей. Однако, данный МРК ориентирован для работ на открытом пространстве. Только пять степеней подвижности и громоздкое захватное устройство затрудняют его применение для сложных операций в стесненной рабочей зоне.

Описанные выше МРК способны обнаружить, захватить и переместить ОСГФ. Однако они не в состоянии выполнить более сложные операции разборки ОСГФ на элементы, которые затем отправляются в специальные центры для исследования. При создании робототехнических средств, возможности которых достаточны для выполнения этих задач, необходимо найти решение ряда проблем, одной из которых является приспособленность манипуляторов и ЗУ для работы с различными непредсказуемыми формами объектов разных физических свойств в узких стесненных полостях.

Широк и заранее не предсказуем диапазон разнообразия форм, размеров и масс объектов манипулирования в пределах одного исследуемого объекта или места его обнаружения. Это приводит к необходимости разработки и использования множества сменных унифицированных конструкций или общего многофункционального ЗУ. Зачастую ОСГФ имеют форму близкую к телам вращения и могут иметь замысловатые выступающие части. Также приходится работать с разнообразными эластичными и непрочными объектами манипулирования, нередко связаны между собой электрическими проводами, скотчем или клеем, а также сцеплены выступающими элементами конструкции.

Теснота и труднодоступность зон проведения работ затрудняет захват и манипулирование ОСГФ. Разнообразные препятствия и предметы загромождают пространство для манипулирования и превращают его в ниши с узким извилистым входом и выходом с объектом манипулирования. Например, поиск и извлечение ОСГФ расположенных в разрушенных сооружениях, в транспортном оборудовании, таре, под землей или в болотистой местности, т.е. в нишах с препятствиями в виде камней, ила, глины и т.д. Не исключена вероятность того, что продольные размеры ОСГФ окажутся больше размера сечения входа в нишу, в таком случае появится необходимость в дополнительной маневренности ЗУ при нахождении непосредственно в узкой зоне.

В случае транспортирования неизученных объектов в центры исследования, может ставиться задача извлечения хрупких, вязких или упругих ОСГФ из их транспортных контейнеров, с относительно узким горлом. В них ОСГФ лежат на дне или в специальных ложементах. Подход к ним возможен только сверху, одной вертикально ориентированной рукой. Для безопасного и комфортного изучения таких неопределенных на первый взгляд предметов специалисты данных центров могут использоваться дистанционно управляемыми стационарными роботами.

По нашему мнению, при дистанционном управлении наиболее эффективным является режим копирующего управления, так как он интуитивно понятен оператору. В этом режиме управление происходит за счет движения руки оператора, оснащенной задающим манипулятором, что обеспечивает одновременное задание и измерение всех его углов необходимых для управления исполнительным манипулятором. Наиболее простым способом реализации кинематики задающего манипулятора является обеспечение полного совпадения конфигураций задающего и исполнительного манипуляторов. Однако в этом случае для задач извлечения ОСГФ из транспортных контейнеров вертикально ориентированным исполнительным манипулятором необходимо обеспечить вертикальную ориентацию руки оператора, которая может быть реализована путем принятия оператором соответствующей позы.

Решения проблем неприспособленности ОСГФ к захвату роботом и тесноты зоны проведения работ взаимосвязаны.

Адаптация к специфике формы ОСГФ зависит от возможностей ЗУ. В качестве базового решения представляется целесообразным использовать ЗУ со сменными регулируемыми пальцами (губками) и сплошными упругими накладками из резины или иных полимеров. В особых случаях могут применять сменные губки специальной формы, приспособленные к работе с объектами более сложной геометрии. Упругие накладки из сплошной, губчатой или рифленой резины, установленные на поступательно движущиеся губки, служат достаточно надежным решением при работе с ОСГФ.

Но не стоит забывать, что к некоторым непрочным, но тяжелым ОСГФ нельзя прикладывать нормальные усилия, необходимые для их удержания только касательными силами трения. В этих случаях применимы, так называемые, адаптивные ЗУ. Основной особенностью адаптивных ЗУ является возможность приспосабливаться к форме и свойствам захватываемого предмета, не нарушая его целостность. Применение такого ЗУ для обнаружения и перемещения ОСГФ может значительно сократить риски его разрушения, связанные с замысловатой формой объекта.

Существуют такие адаптивные ЗУ, в которых благодаря системе полостей и деформируемых перегородок при контакте с объектом манипулирования конец пальца загибается. За счет этого уменьшается нормальное усилие, прикладываемое к поверхности тела. В качестве примера такого адаптивного ЗУ можно рассмотреть, разработанный компанией FESTO захват FinGripper [3]. Он представляет собой конструкцию, состоящую из трех гибких пальцев, образующих в совокупности пирамидальную форму. Структура пальца состоит из жестких поперечных звеньев, расположенных на равном интервале друг относительно друга и соединенных шарнирными связями с двумя гибкими продольными пластинами. Вес такого захвата на 90% меньше по сравнению с традиционными металлическими за счет технологии селективного лазерного спекания. Исполнительный орган способен надежно захватывать продукты питания или хрупкие предметы различной формы, избегая их деформации.

Такие адаптивные ЗУ удовлетворительно работают только при благоприятных условиях, например, захват свободно лежащего цилиндра за середину и без перекосов. Плоскость пальцев, в таком случае, перпендикулярна оси цилиндра. Объекты непредвиденной формы и ориентации плохо удерживаются подобными ЗУ.

Использование отверждаемых оболочек можно рассмотреть на захватном устройстве Versaball компании Empire Robotics [4]. Внешне захват представляет собой упругий шар, заполненный синтетическими гранулами. При контакте с внешней поверхностью захватываемого объекта гранулы начинают свободно перемещаться по внутренней поверхности шара из эластомера, в результате смещения гранул в шаре образуется углубление, принимающее и охватывающее форму перемещаемого предмета. Далее из внутренней поверхности шара откачивается воздух, за счет чего, гранулы создают единую спрессованную массу способную захватить и удержать объект манипулирования. Чтобы отпустить захваченный предмет в мешок подается воздух, гранулированные частицы вновь становятся текучими и схват ослабевает. Данное ЗУ способно удерживать объекты массой до 9 кг вне зависимости от их хрупкости.

ЗУ такого типа способны успешно манипулировать только объектами, имеющими выступающие части, которые могут быть охвачены гранулами, но слабо приспособлены к манипулированию плос-

кими объектами. Между ЗУ и предметом образуются воздушные зазоры, которые в свою очередь могут привести к небольшому перекосу предмета и затруднить процесс его исследования. Также диаметр мешка с гранулами должен быть равен, как минимум, половине высоты захватываемого объекта, что может сильно увеличить габаритные размеры ЗУ.

Примером компактного ЗУ с многосуставными пальцами может служить трехпалый захват Robotiq 3F [5]. Устройство позволяет производить схват предметов сложных форм из любых материалов и различных размеров вне зависимости от их твердости, хрупкости или упругости. Каждый палец оснащен собственным приводом и абсолютно автономен, за счет чего способен подстраивать свою форму под форму захватываемого объекта. Robotiq 3F измеряет усилие, создаваемое между пальцами и объектом, что позволяет автоматически распознавать форму объекта и настраивать силу сжатия под него. Максимальная грузоподъемность такого устройства 10 кг. ЗУ с многосуставными пальцами имеют функциональные возможности, наиболее полно соответствующие руке человека. Однако для задач обнаружения и работы с ОСГФ в узких пространствах они могут не подойти в виду больших размеров ладони, в которой расположены привода.

Встречаются ситуации, когда объект манипулирования находится в стесненной нише с узким входом. В этом случае все механизмы кисти и ЗУ целесообразно оставлять на свободе до входа в нишу, а удержание и манипулирование объектами выполнять длинными пальцами (ЗУ-пинцет). В таком ЗУ пальцы могут качаться только на малый угол. Поэтому для различных ОСГФ и направлений подхода к ним потребуется смена пальцев из накопительных магазинов, расположенных вблизи основания манипулятора.

В пределе для каждого особо сложного объекта манипулирования можно создать сменные специальные пальцы. На практике обычно оказывается существенно ограниченным общее количество подобных сменных элементов.

Адаптацию ЗУ-пинцет к вариативности направлений подхода к ОСГФ можно решить, например, за счет трансформации пальцев или губок в непосредственной близи от зоны проведения работ, но за пределами тесного пространства. Изменение формы рабочих элементов может быть произведено за счет движения в подторможенных кинематических парах, пластической деформации или механической обработки. Средства реконфигурации рабочих элементов размещаются стационарно или на общем с манипулятором основании.

Возможно множество альтернативных вариантов реализации предлагаемого метода адаптации ЗУ к специфике ОСГФ. На рисунке 1 представлена принципиальная схема теоретически применимой системы реконфигурации ЗУ для извлечения из транспортного контейнера ОСГФ различной формы и размеров в рамках исследовательских работ.

Ползуны 1 и 2 (рис. 1) соответствующим приводом поступательно смещаются относительно основания 3 ЗУ. В ползунах выполнены поперечные пазы, в которые вставляются на подторможенных каретках сменные пальцы 4 и 5. На рисунке 1 показаны два варианта конструкции этих пальцев, в реальной конструкции они могут быть одинаковыми. На основании манипулятора вблизи тесной зоны проведения работ, например, транспортного контейнера, стационарно располагаются дистанционно управляемые устройства реконфигурации ЗУ. Механизм 6 приспособлен для принудительного сдвига подторможенных пальцев по пазам. Манипулятор подводит палец 1 к неподвижному упору 7. А толкатель 8, преодолевая силы трения подторможенной каретки пальца 4, смещает последний и переводит его в новое положение, соответствующее специфике захватываемого объекта. Аналогично поочередно настраиваются и остальные пальцы. А именно, они раздвигаются или сдвигаются в направлении, поперечном относительно их рабочего хода. Такая переналадка необходима, например, для захвата сферических объектов манипулирования различных диаметров.

Конструкция пальцев 5 подобна распространенным в машиностроении регулируемым стойкам для индикаторов часового типа. Цепь цилиндрических звеньев 9 и шайб 10, образующих сферические шарниры, стянута проходящим по центру тросиком. Этот тросик натянут либо пружиной, либо вин-

том с полумуфтой 11 сцепления со стационарным уголковым винтовертом 12. Натяжение достаточно для создания трения, удерживающего цепь в исходно заданной произвольной конфигурации. Для принудительного изгиба таких пальцев приспособлен другой стационарный механизм 13 с множеством независимых толкателей 14. Каждый толкатель имеет отдельный дистанционно управляемый привод. К данному механизму пальцы подносятся поочередно манипулятором. После переналадки тот же манипулятор подводит муфты сцепления 11 к винтоверту и поочередно окончательно фиксирует полученную форму пальцев.

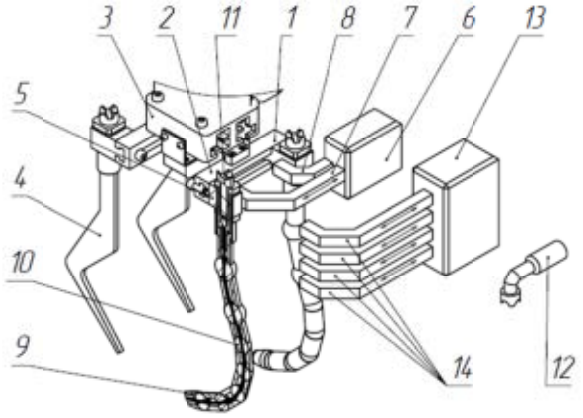


Рисунок 1 — Принципиальная схема системы реконфигурации ЗУ стационарными дистанционно управляемыми механизмами

В приводах толкателей 14 могут использоваться мощные передачи винт-гайка, усилие которых достаточно для изгиба пальцев в виде сплошного стержня из легко деформируемых материалов, например, алюминия или меди. Еще большим давлением может придаваться произвольная форма сплошным накладкам или губкам пальцев из металлов или иных пластичных материалов. Пластическая деформация пальцев и губок ЗУ возможна, но представляется чрезмерно радикальным решением. Необходимость в такой сложной системе должна быть тщательно обоснована.

В данном ЗУ ОСГФ удерживается за счет полного соответствия формы рабочих органов специфике формы объекта манипулирования. Силы трения играют второстепенную роль, поэтому не требуется прикладывать значительных усилий, уменьшается опасность повреждения ОСГФ.

Предлагаемая концепция изготовления модификаций ЗУ вблизи объектов манипулирования существенно отличается от аналогичного по универсальности производства в нерабочей зоне. Вывести ЗУ из рабочей зоны и после модернизации внести обратно сложно, а в некоторых случаях слишком опасно для целостности объекта исследования.

По универсальности рассмотренное ЗУ близко, а в некоторых случаях превышает возможности антропоморфного устройства подобного назначения. Однако по сравнению с последним оно радикально компактнее и лучше приспособлено для работы в особо тесных и труднодоступных пространствах.

Иногда по тем или иным причинам подойти к ОСГФ можно только с одной стороны и, следовательно, нельзя его удерживать охватом. В этом случае единственно возможным остается захват на основании вакуумных присосок или эффектов адгезии. Просматриваются следующие виды адгезионных сред данного назначения:

- липкие вязкие гели или пасты;
- клеи быстро схватывающиеся, но легко удаляемые;
- замораживаемые жидкости, в том числе чистая вода.

Применение таких субстанций ограничивается потенциально негативным воздействием на свойства исследуемых объектов манипулирования. Достаточно сложны системы их хранения, нанесения и удаления. Они плохо вписываются в комплекс сменных пальцев или губок (накладок), потребуется создавать специальные сменные ЗУ.

Рабочие органы с присосками или адгезионными эффектами должны соответствовать специфике ОСГФ. Их адаптацию предлагается осуществляться рассмотренными выше методами реконфигурации ЗУ. Присоски или адгезионные среды размещаются на концах и в других необходимых точках пальцев, передвигаемых или изгибаемых (деформируемых) стационарными толкателями вблизи зоны проведения работ.

В тесном пространстве переориентация длинных пальцев ЗУ-пинцет возможна только относительно их продольной оси W направления входа в узкую нишу (рис. 2а). Для подхода к захватываемому объекту сбоку требуются загнутые Г-образные пальцы, например, реконфигурируемые 3 (рис. 2б).

Манипулятором ангулярного типа 1 (рис. 2а) с копирующим управлением малые точные движения подхода к ОСГФ и последующее манипулирование осуществляются преимущественно ориентирующими степенями подвижности кисти 2. Погрешность перемещений рабочей части пальцев зависит от их вылета R относительно задействованных степеней подвижности. С этой точки зрения в роботах с обычной компоновкой наиболее критичной является вторая от рабочего органа степень подвижности 2.

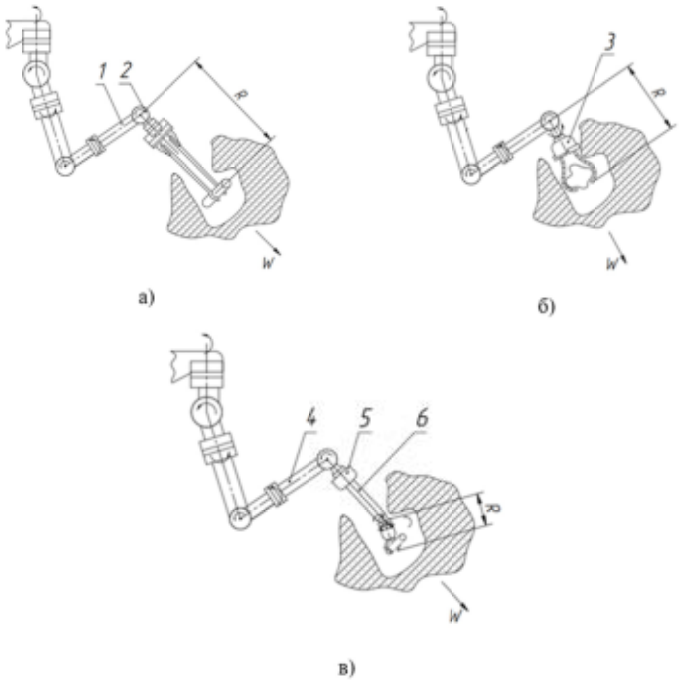


Рисунок 2 — Роботы для работы в тесном пространстве: а) с удлиненными пальцами; б) с реконфигурируемыми пальцами; в) манипулятор с узкой длинной кистью

В глубоких полостях теоретически требуются два последовательных манипулятора, каждый из которых содержит 5…7 степеней подвижности. Первый базовый манипулятор подводит второй конечный манипулятор к точке узкого входа в полость, где проводятся работы. А затем конечный манипулятор перемещает ЗУ или иной рабочий орган внутри полости.

Подобный подход используется в хирургичекском манипуляторе da Vinci [6]. Там базовый манипулятор устанавливается предварительно до начала операции, выполняемой конечным манипулятором. Гипотетически в качестве базового четырехстепенного манипулятора может выступать мобильная платформа, например, МРК «Капитан». Но так можно работать только в идеальных случаях свободного подхода к объекту манипулирования со всех сторон.

Создание полного шестистепенного конечного манипулятора приемлемых массогабаритных ограничений проблематично. И в целом система из двух манипуляторов с общим количеством степеней подвижности порядка 10…14 представляется не практичной. Теоретически можно использовать систему из семистепенного базового манипулятора 4 (рис. 2в) и двухстепенного конечного в виде удлиненной кисти 6 с двумя взаимоперпендикулярными ориентирующими осями и ЗУ. Для умень-

шения поперечных габаритов приводы 5 ротации, обоих наклонов и ЗУ вынесены в свободное пространство вне ниши.

Малый вылет объекта манипулирования относительно ориентирующих степеней подвижности компактной кисти позволяет повысить точность микроперемещений рабочих органов и повысить жесткость механизма кисти и ЗУ, увеличить надежность захвата и удержания объекта манипулирования.

На основании сравнительного анализа методов адаптации ЗУ к вариативности форм объектов манипулирования предлагается следующий вариант решения этой проблемы. Рядом с основанием манипулятора располагаются магазины-накопители автоматически сменяемых ЗУ с различными рабочими органами. В том числе, среди них имеются: агрегаты с традиционной для робототехники конструкцией ЗУ-пинцет. Устройство, по мере необходимости изменяющее форму пальцев, также находится рядом с манипулятором. Таким образом, манипулятор с дистанционным управлением получит возможность изучения непредсказуемого ОСГФ на месте его обнаружения.

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России FNRG-2022-0012 1021051302301-9-2.2.2 № 075-01623-22-01 «Разработка коллаборативного робота с ассистирующей двурукой антропоморфной манипуляционной системой для работы в пространствах малого объема».

Литература

1. Батанов А.Ф., Грицынин С.Н., Муркин С.В. Мобильные роботизированные взрывотехнические комплексы// Специальная техника: электрон. науч. журн. 2001. URL: http://www.bnti.ru/showart.asp?aid=457&lvl=02.01.02.02.&p=1.

2. МРК «КАПИТАН», (Электронный ресурс). Режим доступа: https://rtc.ru/solution/kapitan/.

3. BionicTripod with FinGripper, (Электронный ресурс). Режим доступа: https://www.festo.com/rep/en_corp/assets/pdf/Tripod_en.pdf

4. VERSABALL, (Электронный ресурс). Режим доступа: http://www.empirerobotics.com/products/.

5. Robotiq 3F, (Электронный ресурс). Режим доступа: https://technored.ru/upload/iblock/e79/e79af3dbdaf3649fe9cd5765d0134741.pdf

6. Alan P. Kypson, MD, L. Wiley Nifong, MD, & W. Randolph Chitwood Jr., MD. Robotic Cardiac Surgery// Journal of Long-Term Effects of Medical Implants. 2003. №1. P. 451-464.

А.М. Бойко[1], А.А. Будза[2], А.Г. Кваско[3], П.В. Костырин[2], К.А. Максимов[2], Д.В. Ткаченко[2], П.Ю. Шамрай[2]

ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНАЯ ОПТОЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА ОТСЛЕЖИВАНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ (БЛА)

[1]ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, boiko@theory.ioffe.ru; [2]НИАЦ «ВНИИЖТ», Санкт-Петербург; [3]ЦЗИ ООО «Конфидент», Санкт-Петербург

Аннотация

В настоящее время беспилотная авиация унаследовала очень много от большой авиации. Тем не менее, само понятие «беспилотный» – это прямая отсылка к робототехнике. Формируется новое понимание того, что данную область человеческой деятельности можно рассматривать как воздушную робототехнику. А для того, чтобы успешно вести исследования и разработки в области воздушной робототехники необходимы измерительные приборы, работающие непосредственно в воздухе. В данное время доступны варианты таких измерительных приборов, которые либо дают высокую точность и весьма дорого стоят, либо стоят недорого и имеют недостаточную точность. Мы предлагаем подход к созданию лабораторных измерительных систем, которые бы сочетали высокую производительность, доступную цену и возможность самостоятельного изготовления силами. Предполагается, что используя изложенные в работе идеи и походы лаборатории воздушной робототехники смогут самостоятельно изготавливать необходимое им оборудование.

Ключевые слова

Беспилотная авиация, автоматическая точная посадка, автоматическая стыковка в воздухе, лабораторное измерительное оборудование.

A.M. Boiko[1], A.A. Budza[2], A.G. Kvasko[3], P.V. Kostyrin[2], K.A. Maksimov[2], D.V. Tkachenko[2], P.Yu. Shamray[2]

HIGH-PERFORMANCE OPTOELECTRONIC TRACKING SYSTEM FOR AERIAL ROBOTICS (UAV's)

[1]Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia, boiko@theory.ioffe.ru; [2]JSC Railway Research Institute (VNIIZHT), St. Petersburg, Russia; [3]Information security center «Confident», St. Petersburg, Russia

Abstract

Currently, unmanned aircraft have inherited a lot from large aircraft. However, the very concept of «unmanned» is a direct reference to robotics. A new understanding is being formed that this area of human activity can be considered as aerial robotics. And in order to successfully conduct research and development in the field of aerial robotics, measuring instruments that work directly in the air are needed. Variants of such measuring instruments are currently available that either give high accuracy and are very expensive, or are inexpensive and have insufficient accuracy. We propose an approach to the creation of laboratory measuring systems that would combine high performance, affordable price and the possibility of self-manufacturing. It is assumed that using the ideas and approaches presented in the work, air robotics laboratories will be able to independently manufacture the equipment.

Key words

Unmanned aircraft, automatic precision landing, automatic docking in the air, laboratory measuring equipment.

После изобретения гирокомпаса более 100 лет назад начались исследования, эксперименты и эксплуатация беспилотный летательных аппаратов (БЛА). Так сложилось исторически, что данные технические средства рассматривались как «самолёт без человека» - радиоуправляемый самолёт или даже не управляемый с земли самолёт-автомат. И в этой логике шли исследования все предыдущие годы, когда отдельно велись разработки по аэродинамике, устойчивости и управляемости летательного аппарата как такового и отдельно – работы по обработке данных, собираемых нагрузками, размещенными на борту. И главное – эти работы в пилотируемой и беспилотной авиации шли настолько близкими путями, что беспилотная авиация унаследовала от большой авиации ориентированность на человека, хотя цель беспилотной авиации состояла именно в отказе от человека, как минимум на борту летательного аппарата. Тем не менее, совершенствование приборной базы, и аппаратуры управления позволило показать, что беспилотная авиация – это не «упрощённая» большая авиация, а вполне самостоятельная область деятельности, которую более логично называть «воздушная робототехника».

Постановка задачи

Следует сразу отметить те робототехнические элементы, которые по соображениям безопасности, габаритов и т.п. не могут иметь аналогов в большой авиации. Первая, самая очевидная технология – стыковка в воздухе для гибридных летательных аппаратов. Сейчас конвертопланы и гибриды, взлетая и осуществляя посадку «по вертолётному», и продолжают полёт «по самолётному». Они весь полёт несут на себе совершенно лишнюю нагрузку в виде вертолётных модулей. Вполне логично представить, что на взлете беспилотный самолёт поднимается в воздух при помощи пристыкованного к нему вертолётного модуля, затем происходит расстыковка, самолёт продолжает полёт, вертолётный модуль автоматически возвращается на землю. При посадке вертолётный модуль автоматически взлетает, автоматически пристыковывается в воздухе к самолёту и осуществляет посадку по-вертолётному тоже автоматически. Еще один элемент робототехники – точное позиционирование летательного аппарата при посадке непосредственно в захваты механизмов наземного обслуживания, установленных внутри помещения. Для робота вполне естественно состыковаться с собственной зарядной базой (как это делают коммерческие роботы-пылесосы), но с точки зрения авиационного подхода – это слишком большой риск и сильное удорожание конструкции. Можно привести еще ряд других примеров перспективных технологий будущей воздушной робототехники, добавив к классическим авиационным технологиям робототехнические элементы. Проанализировав эти примеры, мы пришли к выводу, что все они базируются на комбинации некоторых базовых технологических элементов и таких на данный момент мы обнаружили ровно пять.

Пять базовых элементов перспективной воздушной робототехники

Первый элемент – это программно-аппаратные комплексы, позволяющие осуществлять прямой взаимное измерение относительных координат и скоростей между находящимися в полёте аппаратами и между элементами наземной структуры. Также эта система должна осуществлять прямую связь без использования третьей стороны. Т.е. фактически беспилотники должны определить дальности и направления до своих ближайших соседей, посадочных полос и т.п. Также полезно было бы сообщать о своих ближайших вариантах маневрирования всем окружающим, даже если данный конкретный беспилотник не имеет информации о том, кто рядом. В большой авиации для обнаружения и обозначения летательных аппаратов традиционно используют навигационные огни, а для обозначения посадочных полос также используются системы огней специальной конструкции. В наземной технике традиционно используют габаритные огни, стопсигнальные огни, индикаторы поворотов и аналогичные светотехнические элементы.

Второй элемент – это алгоритмы и средства контроля, позволяющие выполнять сложные трехмерные манёвры в воздухе. Самым популярным алгоритмом управления в полёте является полёт по маршруту с удержанием линии заданного пути. И при этом активное маневрирование в воздухе изучается

достаточно слабо. Поэтому многие элементы работы в воздухе, доступные даже большой авиации не реализуются в беспилотной. Такие элементы как стыковка и дозаправка в воздухе, передача грузов с одного аппарата на другой в полёте, посадка на движущееся транспортное средство, уклонение от внезапно обнаруженных препятствий не могут быть выполнены на традиционных алгоритмах типа удержания линии заданного пути. Следовательно обеспечение возможности активного маневрирования в воздухе - это существенный шаг в развитии беспилотных технологий.

Третий элемент – это автономная групповая работа. Сама по себе групповая работа необходима для того, чтобы нагрузки можно было распределить между бортами, а не устанавливать сразу все на один единственный аппарат. А автономность нужна, чтобы упростить управление большим количеством аппаратов. Есть примеры групповая работы без автономности (к примеру-шоу дронов) но такая работа сильно снижает экономический эффект, т.к. либо получается что задание выполняется по неизменяемому сценарию от начала и до конца, либо требуется много дополнительных усилий чтобы с земли изменить индивидуальное задание каждому беспилотнику. Ближайшим аналогом является поведение роя насекомых, стай птиц и рыб. Более универсальным аналогом, как ни удивительно, является поведение именно стаи рыб, т.к. рыбы, как и вертолёты, могут останавливаться на месте при движении стаей, а птицы и самолёты – нет. Следовательно, алгоритмы птичьих стай будут неприменимы для вертолётов в воздухе, а алгоритмы стаи рыб будут применимы практически для любых летательных аппаратов в воздухе.

Четвёртый элемент – новые подходы к созданию наземной архитектуры управления беспилотными системами. В данный момент каждый оператор осуществляет старт своего беспилотника, обеспечивает возвращение и задаёт полётное задание. В целом этот подход приемлем, когда работают одиночные беспилотники. При групповой работе необходим новый язык описания полётного задания, подразумевающий групповое взаимодействие, старт с одной базы, возвращение на другую базу, получение и смену заданий в воздухе.

Пятый элемент – автономные базы наземного обслуживания. Сами базы могут быть как стационарными, так и мобильными, размещенными на подвижных наземных и морских платформах. Не исключен вариант и воздушной базы в некоторой перспективе. При наиболее вероятных сценариях работы межполётное обслуживание БЛА можно полностью автоматизировать. Чтобы обеспечить заход на посадку и саму посадку - потребуется аппаратура из первого элемента, алгоритмы из второго, диспетчеризация – из третьего и назначение конкретной базы из четвёртого.

Таким образом, всё виды будущей автономной воздушной робототехники можно рассматривать как комбинацию вышеприведенных элементов.

Современное состояние приборной базы

Исследовательская работа в области воздушной робототехники отнюдь не сводится к полевым испытаниям по схеме: полёт, запись телеметрии и её последующий анализ. Такая схема применима, в частных случаях отладки нагрузок, реализации полётов по линии заданного пути (ЛЗП) и сильно ориентирована на данные ГНСС систем, которые являются основным источником телеметрии. Для работы требуется не только анализировать данные после полётов, но и желательно прямо в полёте в режиме реального времени менять коэффициенты фильтров, варианты алгоритмов и т.п. В целом, полевая работа требует больших затрат по времени на выезды, заметных расходов на транспорт и комплект мобильного оборудования. Вдобавок к этому, законодательство, которое приравнивает беспилотники к воздушным судам, делает испытательные полёты еще более сложными в организационном плане. В результате, исследования приходится вести на малогабаритных моделях в более комфортных условиях в помещении, а уже с результатами – выходить на полевые испытания.

На рынке аппаратуры для работы с беспилотниками представлено несколько решений от VICON и OptiTrack, которые полностью решают задачу определения пространственных координат и вычисления скоростей для малогабаритных квадрокоптеров при помощи систем камер и маркеров-отражателей, устанавливаемых на борт. Помимо высокой цены, такие системы имеют два основных

недостатка, которые прямо проистекают из их конструкции. Первая – зона полёта представляет собой объем, который должен просматриваться камерами, поэтому отлаживать, к примеру, посадку в контейнер через люк технически невозможно – внутри контейнера беспилотник не видно. Вторая – практически невозможно состыковать уличный полёт по GPS с полётом внутри помещения с дверями, открытыми на улицу, т.к. вблизи помещения GPS уже начинает плохо работать, а камеры еще не начинают, т.е. есть серая зона, где ни одна из телеметрических систем не работает устойчиво.

Помимо дорогих систем есть еще системы на UWB модулях, на ультразвуке, на камерах, ориентирующихся по ARUCO кодам. Эти системы решают проблему высокой цены, но обладают либо низкой точностью, либо низкой производительностью, либо слабой устойчивостью к помехам. Если говорить более конкретно, то дальномерные системы на микросхеме DW1000 и аналогах построены по принципу трилатерации и без третьего маяка (якоря) расположенного на большой высоте возникает большая ошибка по вычислению высоты. Ультразвуковые системы отлично работают, определяя координаты и скорости по эффекту Доплера, но буквально падение железной линейки на пол «оглушает» систему. Системы, работающие с распознаванием маркеров, перестают работать, когда солнечная тень перерезает маркер пополам и из-за баланса белого маркер просто теряется.

Требования к системе

Проанализировав сильные и слабые стороны уже известных измерительных систем, мы сформулировали набор требований к данной системе:

- цена, соизмеримая с ценой учебного БЛА;
- совместимость с учебными дронами по массе и габаритам;
- гомогенность (не требуются данные от других систем);
- получение данных прямо на борту, без радиосвязи с землей;
- сквозная навигация, indoor-outdoor;
- устойчивая работа при ярком свете, в темноте, пыли и т.п.;
- возможность работы с разными типами бортов помимо мультикоптеров, включая самолёты, вертолёты и т.п.;
- точность и производительность не хуже RTK GPS.

Наиболее важным требованием для системы, широкое применение которой предполагается в учебных заведения и кружках робототехники является цена. И вторым требованием, определяющим вся архитектуру, является вычисление собственного положения непосредственно на борту самого беспилотника, но при этом в координатах земли, не используя наземные вычисления и связь с наземными компьютерами.

Модель решения

Изучая вопрос создания измерительных систем для беспилотников было вполне логично обратиться к опыту большой авиации, хотя мы и понимали, что этот опыт неприменим при непосредственном копировании. В большой авиации есть несколько приборных комплексов, которые позволяют производить измерения угла летательного аппарата относительно некоторой оси или плоскости в пространстве. Первая тип систем – это классические радиомаячные системы, обеспечивающие приборный контроль курса и глиссады при заходе на посадку. Далее идут моноимпульсные радиолокационные системы, которые позволяют с минутной точностью определять азимут и угол места летательного аппарата. И самая, вероятно, простая и понятная система – это огни PAPI (precision approach path indicator) для визуального контроля захода на посадку. Поскольку использование радиодиапазона всегда сопряжено с одной стороны с законодательными ограничениями, а в разрешенных диапазонах всегда присутствует большое количество помех, то от использования радио было решено отказаться. Далее, мы скомбинировали три вышеизложенных принципа измерения для создания своей системы. От курсо-глиссадной системы взяли принцип неподвижного наземного маяка и приёмной части на борту летательного аппа-

рата, от моноимпульсной радиолокации – суммарно-разностную формулу вычисления угла по отношению амплитуд сигналов, от огней PAPI – работу в видимом оптическом диапазоне вместо радио[1, 2, 3].

Таким образом, в качестве несущей частоты был выбран оптический диапазон, т.е. антенны были заменены на светодиоды и линзы, формирующие диаграммы направленности. Первоначальный выбор длины волны в области окна прозрачности атмосферы конфликтовал с бюджетными пластиковыми линзами с одной стороны и с вопросами безопасности для зрения. Светодиоды видимого диапазона легко фокусируются, очки со светофильтрами – доступны в продаже и даже без очков человек не будет смотреть на яркий источник оптического излучения.

Таким образом, общий облик системы получился следующим. Базовый элемент системы – это наземный 4х лучевой маяк с широкими диаграммами направленности, бортовой приёмник и алгоритм вычисления угловых координат борта в системе координат, связанной с наземным маяком. Если добавить еще несколько маяков и приёмников, то решая триангуляционную задачу можно полностью определить координаты и углы беспилотника относительно системы координат, заданной маяками.

Практическая реализация

Поскольку оптоэлектронная система несколько отличается от системы, работающей в радиодиапазоне надо уточнить некоторые определения. При использовании радиодиапазона излучение идёт, без модуляции, фактически на несущей частоте. Т.е. каждая антенна, излучает, к примеру, гармонический сигнал на своей уникальной частоте. Когда мы используем видимый диапазон, то несущей является длина волны излучателя – светодиоды излучают красный, жёлтый, зеленый или синий свет. Принимать и обрабатывать такой сигнал крайне сложно, т.к. это излучение, в общем, не отличается от обычного света. Поэтому, чтобы было возможно работать при естественном освещении, надо формировать излучаемый сигнал модулируя несущую, и при этом несущая (конкретный цвет светодиода) может быть вообще одним, т.е. все излучатели можно делать на диодах одного цвета. А каждый конкретный излучатель уже должен излучать, промодулированный по интенсивности, свой свет. Самой простой и удобной в обработке модуляцией является гармонический сигнал. Но для излучающей системы, несомненно, удобнее меандр. Тем не менее, мы рекомендуем делать более сложную излучающую часть, чтобы приёмная часть была бы как можно более простой. Для светодиодов видимого диапазона возможные частоты модуляции имеют ограничение сверху в пределах единиц мегагерц. Ограничения снизу определяются тем, что изменения интенсивности принимаемого сигнала беспилотников связанное с движением должно быть много меньше времени изменения интенсивности, определяемое модуляцией. В противном случае произойдет смешивание параметров, что потом заметно затруднит их разделение.

Для каждой конфигурации навигационного поля надо подобрать рассеиватели с такой диаграммой направленности, ширина которой позволяет с одной стороны максимально захватить координатное поле, а с другой – не засвечивать стены, пол, потолок, конструктивные элементы сцены, чтобы не возникало лишних отражений. Угол разведения максимумов диаграмм направленности следует выбирать из желаемой точности измерений. Близко сведенные диаграммы направленности дают хорошую точность, но малый диапазон измерений, а широко разведенные – наоборот, дают большой диапазон измерений, но меньшую точность.

Для приёма сигнала достаточно использовать АЦП мегегерцовой производительности. К примеру, встроенный АЦП в весьма популярный микроконтроллер STM32 позволяет в трехканальном режиме с одного приёмника вести оцифровку на частоте 7.2 мегагерца или на трех приёмниках на частоте 2.4 каждый. Чтобы вести обработку принятого сигнала на том же самом микроконтроллере можно производить Фурье обработку принятого сигнала и амплитуды выделенных гармоник будут соответствовать интенсивности принимаемого сигнала от каждого из излучателей.

После приёма и разделения сигнала на каналы, соответствующие излучателям необходимо вычислить углы между равносигнальными плоскостями и положением приёмника беспилотника. Для решения этой задачи необходимо провести изначальную калибровку диаграмм направленностей излучателей, т.к. таб-

личные данные содержат некоторые усреднённые значения с одной стороны, с другой – после монтажа светодиода и оптической системы направление максимума и максимальное значение интенсивности также надо измерить. С практической точки зрения измерительный и калибровочный стенд удобнее строить не для угловых координат, а использовать станок с ЧПУ и калибровать лучи непосредственно в плоскости, перпендикулярной равносигнальным направлениям. Т.е. параметром являться будет не угол, а тангенс угла, что при последующем вычислении прямоугольных координат будет являться, несомненно, плюсом, т.к. не будет необходимости вычислять тригонометрическую функцию. Фактически, расположив на некотором расстоянии от излучателей станок с закреплённым приёмником, можно оцифровать принятый сигнал, перемещая приёмник по осям, перпендикулярным равносигнальному направлению. На рисунке (см. рис. 1) приведены значения интенсивностей двух излучателей из четырех (обозначим их излучатель A и излучатель B, а оставшиеся – C и D), измеренных приёмником, который перемещался при помощи станка с ЧПУ перпендикулярно равносигнальным направлениям. Расстояние от излучателей до плоскости перемещения фотоприёмника составляло 1100мм. В качестве параметров указано перемещение приёмника с миллиметрах, относительно равносигнальных плоскостей.

После приёма сигналов по суммарно – разностной формуле (1) вычисляется суммарно-разностный параметр S. Этот параметр – отношение разности интенсивностей двух излучателей, принятых в одной точке, делённый на сумму их интенсивностей в этой же точке.

$$S = \frac{I_A - I_B}{I_A + I_B} \tag{1}$$

На рисунке (см. рисунок 2) приведено значение параметра S на всем координатном поле, полученного по интенсивностями излучателя A и излучателя B. Равносигнальное направление этой пары излучателей соответствует значению 0 координаты X. Хотя суммарно-разностный параметр имеет линейный участок, которым чаще всего пользуются в радиолокации, возможно расширить. Используя нечетность функции S, создадим такой полином X^* (2) по нечётным степеням S, который бы линеаризовал параметр S в большем диапазоне координат X. Коэффициенты полинома c_1, c_3 c_5 , c_7 соответствуют коэффициентам при нечетных степенях параметра S. А X^* - это восстановленное по исходному параметру S значение координаты X.

$$X^* = c_1 S + c_3 S^3 + c_5 S^5 + c_7 S^7 \tag{2}$$

Таким образом, на рисунке (см. рис. 3) показано как при помощи простого алгебраического преобразования сигнала интенсивности излучателей можно восстановить значение координаты, в которой находился приёмник. Видно, что ближе к предельным значениям координат точность восстановления снижается, что вполне соответствует ограничениям однокоординатного полиномиального метода. Вполне естественно, что при создании более точных алгоритмов вычисления координат надо задействовать еще несколько параметров. Т.е. не только параметры пары излучателей A и B, но и пары CD, AC, AD, BC и BD. Более того, имея достаточно большой массив исходных данных калибровки, становится возможным применить методы машинного обучения, для вычисления координат.

Результаты

Экспериментальный образец системы, разработанный по вышеописанным принципам, показал следующую производительность при испытаниях:

- частота измерений от 28125 Гц в 3 канальном реже АЦП, 7812.5Гц в одноканальном;
- ошибка определения угла 0.1 ° (в 2х метрах от маяка, без усреднения);
- ошибка оценки скорости менее 2см/с (в 2х метрах от маяка при усреднении 0.01 с);
- количество одновременно принимаемых каналов – не менее 32;
- дальность работы в узком луче (10°) более 30 м.

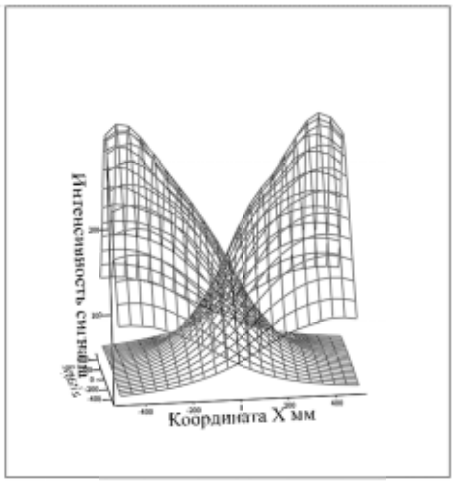


Рисунок 1 — Интенсивности принимаемых сигналов излучателей A и B измеренных в плоскости, перпендикулярной равносигнальному направлению

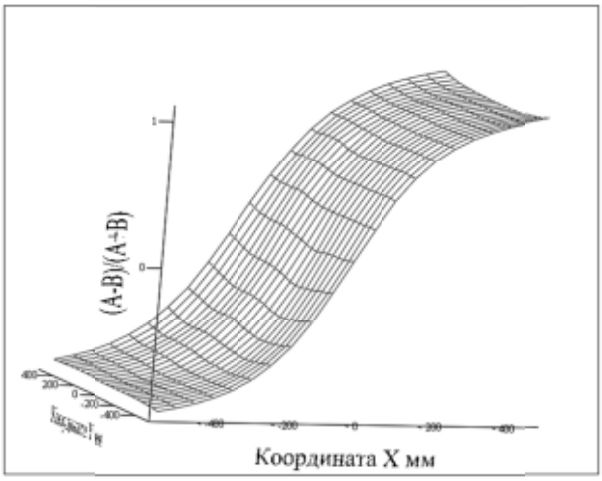


Рисунок 2 — Суммарно - разностный параметр S, вычисленный по интенсивностям излучателей A и B

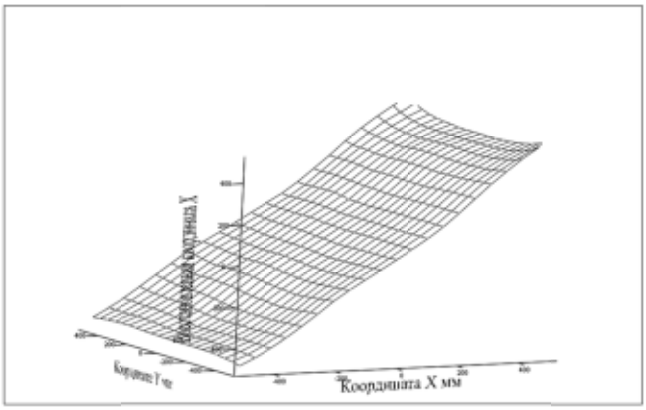


Рисунок 3 — Восстановленная полиномиальным методом по суммарно-разностному параметру S координата X приёмника

Комбинируя количество, положение и различные диаграммы направленности излучателей и приёмников возможно создавать высокопроизводительные измерительные системы масштабами от настольной и до система с масштабами футбольной арены. Система позволяет проводить исследования в области синтеза алгоритмов управления сложными пространственными манёврами и группового взаимодействия летающих робототехнических комплексов (БЛА) благодаря точному и быстрому измерению координат БЛА прямо на борту непосредственно в полёте.

Литература

1. «Разработка элементов системы оптического инструментального захода на посадку беспилотного летательного аппарата», А.А. Будза, дипломная работа, СПбПУ, 2016.

2. «Разработка автономного аппаратного комплекса высокоточного измерения продольной скорости на основе фазового метода», П.В. Костырин, магистерская диссертация, СПбПУ, 2017.

3. «Разработка устройства приёма и обработки сигналов оптической системы инструментального захода на посадку бесплотного летательного аппарата», А.А. Будза, выпускная квалификационная работа магистра, СПбПУ, 2018.

4. «Обеспечение пространственной устойчивости роя автономных беспилотных летательных аппаратов», А.М. Бойко, Р.А. Гиргидов, Робототехника и техническая кибернетика, 9(2)2021.

В П. Андреев

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ РАБОТЫ КИНО- И ТЕЛЕЖУРНАЛИСТОВ СРЕДСТВАМИ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», МИНОТ РГГУ, Москва, andreevvipa@yandex.ru

Аннотация

В статье рассмотрен подход к обеспечению безопасных условий работы тележурналистов, ведущих телерепортажи из «горячих» точек, средствами экстремальной робототехники. Предлагается использовать современные дистанционно управляемые (телеуправляемые) наземные мобильные робототехнические комплексы (РТК), оснащённые стереоскопическими системами технического зрения и профессиональными средствами телесъёмки. В качестве таких РТК могут быть использованы мобильные роботы с дистанционным управлением, разработанные в Центральном научно-исследовательском и опытно-конструкторском институте робототехники и технической кибернетики» (ЦНИИ РТК). Оснащение роботов стереоскопической системой технического зрения для организации телеуправления движением мобильного робота и специальной операторской телекамерой требует наличия широкополосного радиоканала, поскольку необходимо передавать несколько видеопотоков одновременно. Для решения данной проблемы предлагается использовать опыт применения сетевых технологий, полученный при разработке многокамерной системы технического зрения для установки на РТК BROKK-110D и BROKK-330 (Швеция) по заданию Центра по проведению спасательных операций особого риска «Лидер», МЧС, Россия. Приведено концептуальное решение проблемы обеспечения тележурналистов специальной телеуправляемой наземной робототехникой, позволяющей вести телерепортажи непосредственно с места боевых действий, находясь при этом на безопасном расстоянии от места событий.

Ключевые слова

Мобильный робот, экстремальная тележурналистика, телеуправление, сетевые технологии, система технического зрения, многопотоковое видео.

V.P. Andreev

ENSURING THE SAFETY OF THE WORK OF FILM AND TV JOURNALISTS BY MEANS OF EXTREME ROBOTICS

MSTU «STANKIN», IINET RSUH, Moscow, Russia, andreevvipa@yandex.ru

Abstract

The article considers an approach to the implementation of the safe work of film and television cameramen working in hotspots, using extreme robotics. It is proposed to use modern means of extreme robotics – remotely controlled mobile robotic systems, equipped with stereoscopic vision systems and appropriate film and television equipment. Remote-controlled robots developed at the Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics can be used as such robotic systems. Equipping robots with a stereoscopic vision systems and a special TV camera to organize remote control of a mobile robot's movement requires a broadband communication channel, since it is necessary to transmit several video streams simultaneously. To solve this problem, it is proposed to use the experience of using network technologies obtained during the development of a multiple-camera vision systems for installation on the mobile robotic systems BROKK-110D and BROKK-330 (Sweden) at the instructions of the Center for Special Risk Rescue Operations «Leader», Russia. A conceptual solution to the problem of providing film and television journalists with special remote-controlled robotics is given.

Key words

Mobile robot, extreme TV journalism, teleoperation, network technologies, vision system, multistream video.

В силу своей профессии военные журналисты и телеоператоры всегда работают в той же зоне, где и солдаты, подвергаются тем же рискам, что и бойцы. Кинооператоры, которые вели съёмки боевых действий на полях Великой отечественной войны, всегда находились в гуще войска, рискуя жизнью непосредственно участвовали в боевых действиях, снимая кадры, бесценные для истории, для потомков, но за это заплачено большой кровью. Всего в годы войны на фронте работали 258 фронтовых кинооператоров. По данным историка кино В.П. Михайлова каждый второй кинооператор был ранен, и каждый четвёртый убит [1].

По статистике Комитета защиты журналистов с 1992 года по 2014 год в мире погибли 1089 журналистов (без учёта других сотрудников СМИ), причём большинство из них погибли в зонах боевых действий [2].

В 2020 году в мире убиты 50 журналистов, из них 16 погибли в зонах боевых действий [3]. В 2021 году ЮНЕСКО зафиксировало убийство 55 журналистов, в том числе 18 из них убиты в странах, где происходили вооружённые конфликты [4].

К сожалению, в приведённую печальную статистику попали и российские журналисты. Так, только в ходе недавно начавшейся спецоперации на Украине (24 февраля 2022 г.) пострадал корреспондент «Известий» Родион Северьянов, раненый прицельным огнём националистов из полка «Азов» с территории завода «Азовсталь» в Мариуполе [5]. Известно, что именно журналисты находятся под особым вниманием снайперов противника. Поэтому использование современных технологий, обеспечивающих полное или частичное исключение боевых потерь среди военных журналистов и телеоператоров, является актуальной задачей.

Технологии безопасной съёмки в экстремальных условиях

Одним из средств защиты тележурналистов при съёмках в экстремальных условиях является применение соответствующих технологий фото- и видеофиксации событий, при которых фотоаппарат или телекамера выдвигается на наиболее подходящие с точки зрения ракурса, но опасные для жизни и здоровья человека, места съёмки, а управление съёмкой ведётся оператором дистанционно из укрытия. Рассмотрим три возможные технологии безопасной съёмки в экстремальных условиях.

1. Ситуация, когда заранее известно, что произойдёт какое-то событие (например, запуск ракеты, снос здания, взрывные работы и т.д.), требующее информационного освещения. Известны также место события, размеры зоны, в пределах которой будет опасно находиться человеку, но для фиксирования события необходимо, чтобы фотоаппарат или телекамера была внутри этой зоны. В этом случае телекамеру помещают в специальный защитный корпус, позволяющий сохранить аппаратуру и результаты съёмки, и эту, уже защищённую съёмочную аппаратуру размещают в нужной точке съёмки; журналисты при этом остаются на безопасном расстоянии, дистанционно управляя процессом съёмки [6].

Однако применение данной технологии оказывается невозможным, например, при освещении в реальном времени военных действий, различных вооружённых конфликтов и т.п., поскольку заранее неизвестно конкретное место события, значимость этого события определяется журналистом лишь в процессе съёмки и выбрать заранее соответствующий ракурс съёмки невозможно.

2. Использование беспилотных летательных аппаратов (БЛА). В последнее время для решения различных задач видеорегистрации, в том числе для слежения или фиксации экстремальных событий, для разведки в условиях боевых действий и т.д., военными и спецслужбами широко используются БЛА различных конструкций и размеров. БЛА также применяются и в других случаях, например, в профессиональном кинематографе.

Из анализа характеристик существующих телекамер, требований к качеству видеоизображений и условий видеосъёмки следует, что для экстремальной видеожурналистики больше всего подходят небольшие БЛА с установленными на них телекамерами, которые позволяют производить видеосъёмку с относительно небольших расстояний (для получения не только общих планов, но и средних и, по возможности, крупных планов) и с ракурсов, при которых геометрические искажения форм объектов съём-

ки в изображениях в кадре не превышают допустимых значений. Однако, при таких условиях съёмки БЛА становится незащищённым, поскольку он оказывается достаточно близко от опасных объектов, контрастно выделяется на фоне неба, привлекает внимание противника своими перемещениями и шумом вращающихся лопастей; следовательно, может быль легко обнаружен и сбит. Кроме того, на полёт такого беспилотного летательного аппарата существенное воздействие оказывают порывы ветра, ударные воздушные волны, возникающие при взрывах, пули, разлетающиеся осколки снарядов и куски вещества из мест взрывов и т.д. Всё это приводит, как минимум, к потере устойчивости движения беспилотного летательного аппарата, а, как максимум, – к его гибели.

Технические характеристики современных малоразмерных БЛА также ограничивают их использование в экстремальной тележурналистке. По данным, озвученным на 33-ей Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника – 2022», время полёта таких БЛА не превышает 40 мин. Максимальная скорость передачи информации по радиоканалу составляет 20 Мб/с, что существенно затрудняет использование профессиональных телекамер на БЛА. Практически отсутствует возможность манёвра БЛА на малой высоте в лесном массиве, где, как правило, происходят самые впечатляющие события – выполняется сосредоточение войск, происходит огневое взаимодействие.

Поэтому беспилотные летательные аппараты, если они используются в экстремальной журналистике, следует рассматривать как средство для разовых съёмок, во время которых они часто оказываются уничтоженными или разбившимися. Получается, что в экстремальной видеожурналистике у БЛА короткий срок жизни. Следовательно, беспилотных летательных аппаратов у каждого журналиста, освещающего экстремальные события, должно быть много, что крайне обременительно, неудобно и дорого. Кроме того, при таком применении БЛА должны быть дешёвыми, дешёвыми должны быть и телекамеры, но низкая цена телекамер неизбежно снижает функциональные возможности съёмки и сказывается на качестве получаемого видеоизображения. И, наконец, такая технология съёмки не позволяет реализовать большинство из обычно применяемых в видеорепортажах операторских приёмов.

Особо, следует отметить, что управление БЛА в большинстве случаев осуществляется визуально оператором с пульта, который является источником радиосигнала, что позволяет противнику определить координаты оператора. Тогда целью поражения становится оператор, и его уничтожение огневыми средствами приводит не только к прекращению работы БЛА, но и к гибели человека-оператора.

Таким образом, применение беспилотных летательных аппаратов в экстремальной журналистике, скорее всего, обусловлено отсутствием на сегодняшний день иных технологий и является редким, нерегулярным.

3. Представляется, что наиболее безопасной и, в то же время эффективной, технологией видеосъёмки в экстремальных условиях является использование малогабаритных дистанционно управляемых мобильных роботов, оснащённых соответствующей телеаппаратурой. Мобильные роботы (МР) возможно вывести на нужную позицию заранее, когда робот не может быть обнаружен противником, его можно замаскировать под ландшафт территории. Робот может перемещаться и маневрировать в лесном массиве, на пересечённой местности, прикрываясь объектами ландшафта. К тому же, робот не всегда должен двигаться (его перемещение определяется лишь необходимостью смены ракурса), а, как известно, человек замечает в первую очередь движущиеся объекты. Важно отметить, что в данном случае видеоизображение фиксируется с ракурсов от земли, что крайне эффективно для показа сцены. Зритель воспринимает такое изображение так, как будто он смотрит стоя в окопе или лёжа на земле, становясь соучастником событий.

Поскольку работа журналистов происходит в условиях риска для его здоровья и жизни, этот вид профессиональной деятельности следует относить к экстремальной, а на данный вид деятельности необходимо распространить цель, сформулированную в [7] «Целью роботизации ВС РФ является освоение безлюдных (малолюдных) военных технологий, обеспечивающих полное или частичное исключение личного состава при решении боевых и обеспечивающих задач, сопряжённых с опасностью для жизни и здоровья человека». Необходимо создать специальные робототехнические комплексы (РТК)

для фото- и тележурналистов, освещающих боевые действия. Очевидно, что данные РТК должны относиться к экстремальной робототехнике.

Требования к экстремальной робототехнике для экстремальной видеожурналистики

Экстремальная робототехника предназначена для выполнения различных видов работ в экстремальных условиях.

Экстремальные условия (extreme conditions) – условия применения робота, характеризующиеся воздействием техногенных, природных и других факторов, имеющих экстремальные, т.е. предельно возможные постоянные значения [8].

Робот для работы в экстремальных условиях (emergency response robot (response robot)) – робот, предназначенный для выполнения оперативных задач в различных рабочих режимах с целью оказания помощи оператору при выполнении работ в экстремальных условиях и опасных средах [9].

Конструкция и характеристики робота для экстремальной видеожурналистики напрямую зависят от задач, которые данный робот должен выполнять, а именно – видеосъёмка и малозаметное перемещение по местности. Следовательно, РТК для экстремальной видеожурналистики должен быть:

- оснащён телекамерой, записывающей видеоизображение с качеством, необходимым для его нормального просмотра зрителями на проекционных экранах, экранах телевизоров и компьютерных мониторах;
- мобильным, способным перемещаться по неструктурированной местности, которая (и объекты на которой) может динамически изменяться в результате боевых, террористических или криминальных действий, природных катаклизмов;
- дистанционно управляемым оператором с безопасного расстояния (телеуправление);
- возможность непрерывно в реальном времени или по требованию передавать на пульт оператора получаемый видеопоток.

К этому можно добавить дополнительные требования к РТК, работающему в экстремальных условиях:

- быстрое развертывание;
- определённая степень автономности, хотя бы для возможности самостоятельного возврата на исходную позицию или в заранее заданную точку в случае потери или перехвата связи;
- защищённость от неблагоприятных воздействий среды и несанкционированного доступа к системе управления;
- надёжность функционирования и возможность обслуживания в полевых условиях;
- низкая стоимость.

В качестве примера применения РТК для использования в экстремальной журналистике можно предложить разработки робототехнических комплексов, выполненные в Федеральном государственном автономном научном учреждении «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ЦНИИ РТК). Согласно информации разработчика [10], малогабаритный робототехнический комплекс «КАПИТАН» – самая передовая в настоящее время разработка ЦНИИ РТК в линейке малогабаритных робототехнических платформ. Данный мобильный робот (МР) по своим тактико-техническим характеристикам не уступает лучшим зарубежным и отечественным аналогам (рис.1).

Этот мобильный робот предназначен для проведения разведывательных, досмотровых, взрывотехнических операций в составе специальных подразделений различных служб и ведомств. Универсальная роботизированная платформа на базе гусеничного шасси повышенной проходимости позволяет платформе легко преодолевать различные препятствия – глубокий снег и высокую траву, завалы, лестничные марши, крутые склоны, щели и уступы. Базовая платформа комплекса способна работать до 6 часов на одном заряде аккумулятора. При собственном весе в 35 кг, мобильная платформа комплекса «КАПИТАН» поддерживает установку полезной нагрузки весом до 20 кг (без потери мобиль-

ности), что позволяет установить на робот стереоскопическую систему технического зрения (СТЗ) и камеру телеоператора на многостепенном манипуляторе, который уже имеется в готовом наборе навесного оборудования. Дистанционное управление таким манипулятором в трёх измерениях обеспечивает полный обзор окружающей местности. Дальность дистанционного управления до 1200 метров позволяет работать оператору из окопа или иного защищённого места, не ограничивая себя в свободе выбора ракурса съёмки.

Рисунок 1 — Робототехнический комплекс «Капитан» [10]

Наиболее удобным для использования в экстремальной тележурналистике представляется менее габаритный РТК, также разработанный в ЦНИИ РТК – Малогабаритная разведывательная платформа «КУРСАНТ» (рис. 2), поскольку она обладает массой всего 15 кг [11].

Рисунок 2 — Робототехнический комплекс «Курсант» [11]

Благодаря универсальному быстросъёмно-разъёмному креплению, мобильная платформа может быть оснащена полезной нагрузкой различного назначения – модульной системой видеонаблюдения, блоком автономной навигации и ориентации, компактным манипулятором и др.

На сегодняшний день существует значительное количество подобных разработок, остаётся лишь оснастить их стереоскопической СТЗ, специальной операторской телекамерой, и обеспечить соответствующим коммуникационным каналом передачи многопотокового видео.

Проблема передачи многопотокового видео

Телеуправление[1] мобильными РТК по радиоканалу на сегодняшний день не является большой проблемой. Мобильные РТК снабжаются соответствующими системами, которые включают эргономичный пульт дистанционного управления, связанный с мобильной платформой радиоканалом. Од-

[1] Телеуправление (teleoperation): Управление в реальном времени движением робота или робототехнического устройства, осуществляемое оператором из удалённого места (дистанционно) с использованием телевизионного канала обратной связи [ГОСТ Р 60.0.0.4-2019, 5.10]

нако такой коммуникационный канал, как правило, не предназначен для передачи многопотокового видео; в основном, это передача команд управления движением робота и манипулятором от пульта оператора к мобильной части РТК и получение видеоинформации от одной телекамеры невысокого разрешения. В этом случае объём передаваемой информации требует наличия радиоканала с полосой, достаточной для передачи лишь одного видеопотока от стандартной телекамеры (например, формат VGA: 640x480). Оснащение роботов стереоскопической СТЗ и специальной операторской телекамерой требует уже более широкополосного коммуникационного канала, поскольку необходимо одновременно передавать, как минимум, три видеопотока (желательно четыре), причём разрешение видеоизображения с операторской телекамеры должно быть не менее Full HD (1920×1080) [12], а может быть и большим: 2K и 4K, что существенно повышает требования к битрейту.

Один из путей решения данной проблемы предложен в [13, 14]. Разработанная и изготовленная по заданию Центра по проведению спасательных операций особого риска «Лидер», МЧС, Россия система технического зрения была предназначена для получения и беспроводной передачи видеоинформации на пульт управления (ПУ) оператора с 3-х телекамер, закреплённых на мобильном роботе, и одновременно ещё с 2-х телекамер, установленных на отдельных мобильных платформах, которые сопровождают основной исполнительный робот к месту работ. В качестве РТК были использованы шведские мобильные роботы BROKK-110D и BROKK-330 (рис. 3).

Рисунок 3 — Робототехнические комплексы МЧС BROKK-110D и BROKK-330, оснащённые многокамерной СТЗ

На борту роботов было установлено три антивандальные телекамеры с инфракрасной подсветкой – две спереди по бортам и одна сзади (на рисунке выделены окружностью). На верхней плоскости корпуса каждого робота закреплена купольная телекамера высокого разрешения, снабжённая дистанционно управляемым поворотно-наклонным механизмом и системой 10-кратного оптического масштабирования (также выделены окружностью). По требованию заказчика дополнительно были разработаны и изготовлены два устройства (названные «Спутниками»), снабжённые такой же купольной телекамерой. Они должны устанавливаться на мобильные дистанционно управляемые платформы и перемещаться вместе с рабочим роботом к месту выполнения работ с тем, чтобы оператор мог «со стороны» и более подробно наблюдать за точностью выполнения команд управления исполнительными механизмами. Обобщенная схема СТЗ приведена на рисунке 4.

В СТЗ использовались антивандальные аналоговые телекамеры, стандартный видеосигнал которых с помощью видеосервера преобразуется в цифровую форму и выполняется сжатие видеопотока по методу M-JPEG (Motion JPEG) [15]. Этот формат представляет результирующее видео в виде последовательности кадров, сжатых в формате JPEG (ISO/IEC 10918). Его достоинства заключаются в удобстве и простоте выбора компромисса между качеством и степенью сжатия – алгоритм сжатия JPEG позволяет устанавливать по желанию степень сжатия от 1% до 99%. В отличие от стандарта MPEG этот формат отличается более высокой надёжностью, поскольку выпадение отдельных кадров

из видеопотока, что нередко случается при передаче видеоданных по радиоканалам, не влияет на остальные кадры. Применение аналоговых телекамер обусловлено их дешевизной по сравнению с цифровыми, поскольку в экстремальных ситуациях высока вероятность их повреждения. Использование отдельных (не встроенных в телекамеру) достаточно дорогих видеосерверов для сжатия изображений обеспечивает возможность их установки вместе с остальной электроникой в наименее уязвимых местах мобильного робота, например, в бронированном корпусе (на рис. 3 обозначены прямоугольниками). Данное сочетание позволяет быстро заменить вышедшую из строя телекамеру без перенастройки всей системы и замены дорогостоящего оборудования.

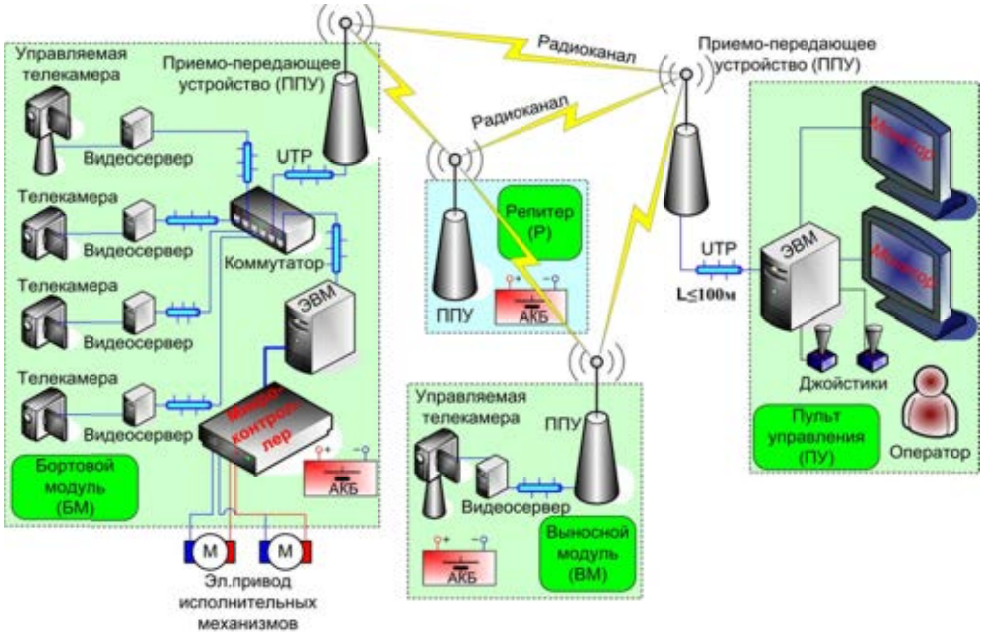


Рисунок 4 — Структурная схема СТЗ для РТК BROKK-110D (с одним выносным модулем)

Все электронные элементы СТЗ объединены в локальную вычислительную сеть (ЛВС), а в качестве коммуникационного канала между бортовыми системами робота, выносными модулями и пультом управления используется беспроводное сетевое соединение Wi-Fi (стандарт IEEE 802.11).

Использование для коммуникации стека протоколов TCP/IP из стандарта Ethernet в данной структуре СТЗ обеспечило надёжную высокоскоростную и устойчивую передачу видеопотоков от всех шести телекамер по радиоканалу в зоне прямой видимости на расстояние не менее 200 метров и их воспроизведение на мониторах пульта оператора в стандартном ТВ-формате (25 к/сек). Увеличение дальности достигается использованием репитеров и узконаправленных антенн на пульте оператора, при этом на мобильной части РТК требуется применение всенаправленных антенн для обеспечения свободы их передвижения.

Данные РТК – BROKK-110D и BROKK-330 с установленными на них системами технического зрения были испытаны на полигоне Центра МЧС «Лидер». Результаты испытаний показали высокую надёжность созданного оборудования и возможность организации управления РТК и устойчивой передачи и воспроизведения одновременно 6 видеопотоков на дистанциях до 500 метров при движении роботов в условиях городской застройки (военный городок Центра МЧС).

Мобильная СТЗ для экстремальной тележурналистики

Для экстремальной тележурналистики можно предложить упрощённую схему СТЗ (рис. 5), которая должна устанавливаться на мобильный РТК.

На мобильной платформе по бортам, например, на РТК «КУРСАНТ», закрепляются 2 телекамеры стереосистемы (ТВ-1 и ТВ-2), которые обеспечивают информационную составляющую для управления движением МР. На многозвенном манипуляторе МР или на телескопическом подъёмнике с пово-

ротно-наклонным механизмом устанавливается камера телеоператора. Ещё одна телекамера (ТВ-камера заднего вида) располагается на задней части корпуса мобильной платформы и может быть установлена опционно – она предназначена для управления задним ходом МР в случае необходимости экстренной эвакуации робота. В результате видеопотоки от 4-х аналоговых телекамер с помощью видеосерверов преобразуются в цифровую форму, подвергаются сжатию, приводятся к стандарту Ethernet и поступают на входы сетевого коммутатора. На выходе коммутатора формируется общий поток данных согласно протоколам TCP/IP. Беспроводная точка доступа Wi-Fi работает в режиме AP mode и предназначена для объединения по радиоканалу систем бортового модуля и пульта управления оператора в единую ЛВС. На мобильном модуле РТК устанавливается всенаправленная антенна, которая позволяет роботу свободно перемещаться без потери радиосвязи. Электроприводы исполнительных механизмов являются приводами многозвенного манипулятора (или телескопического подъёмника), который даёт возможность управлять положением камеры телеоператора и её ориентацией в пространстве.

Рисунок 5 — Структурная схема СТЗ для РТК тележурналиста

На пульте управления оператора используется направленная антенна, которая позволяет обеспечить надёжную радиосвязь с бортовым модулем на значительных расстояниях в направлении действия МР. Стандарты Ethernet допускают использование UTP-кабеля (категории 5e) длиной до 100 метров (для гибкого кабеля несколько меньше) для подключения к пульту управления вынесенной на желаемое расстояние точки доступа с антенной, электропитание которой осуществляется по методу PoE. Поскольку активная радиоточка может быть легко обнаружена противником, такое кабельное соединение позволяет оператору расположиться в безопасном месте на значительном расстоянии от активной антенны. На стороне пульта управления точка доступа работает в режиме WDS mode, т.е. в режиме формирования сети и объединения физически удаленных сегментов ЛВС в одну сеть.

В состав пульта оператора входит высокопроизводительное вычислительное устройство (ПК или одноплатный компьютер с мощной видеокартой), на которое установлен видеоплеер, выполняющий обратное преобразование сжатых изображений всех 4-х видеопотоков в растровые изображения и вывод их на экраны мониторов в режиме реального времени. По-видимому, целесообразно использовать два монитора – один для оператора МР, второй для тележурналиста, либо следует использовать два пульта управления, что требует организации многооператорного управления IT-системами [16].

Также для данного применения на мобильную платформу рядом с телекамерами можно устанавливать микрофоны с блоком преобразования звука в цифровой формат и включать их в качестве узлов ЛВС, что позволит вместе с изображениями передавать звуки из зоны происходящих событий: пение птиц, шум леса, выстрелы и взрывы с полей сражения.

Использование в экстремальной тележурналистике малогабаритных робототехнических комплексов из класса экстремальной робототехники позволит сохранить жизни и здоровье кино- и тележурналистам, выполняющим свою работу в опасных условиях – на полях сражений, в зонах радиоактивного и химического заражения, в зонах экологических и техногенных катастроф, в Арктике и Антарктике. В техническом обеспечении на сегодняшний день проблем нет. Однако, это потребует определённых финансовых вложений не только в создание соответствующих РТК, но и в разработку и организацию обучающих курсов в соответствующих учебных заведениях, в разработку методик взаимодействия операторов РТК и телеоператоров, а также методик применения робототехники в области экстремальной журналистики.

Литература

1. Цена кадра. Советская фронтовая кинохроника 1941–1945 гг. Документы и свидетельства / Авт.-сост. В.П. Михайлов, В.И. Фомин. Москва: Канон+, Реабилитация, 2010. 1048 с.

2. Журналисты, погибшие в ходе военных конфликтов с 1991 года [Электронный ресурс] // ТАСС: сайт. URL: https://tass.ru/info/1267478?utm_source=google.com&utm_medium=organic&utm_campaign=google.com&utm_referrer=google.com (дата обращения: 20.09.2022).

3. В 2020 году в мире убили 50 журналистов [Электронный ресурс] // Коммерсантъ: сайт. URL: https://www.kommersant.ru/doc/4637114 (дата обращения: 10.09.2022).

4. В 2021 году были убиты 55 журналистов [Электронный ресурс] // Новости ООН: сайт. URL: https://news.un.org/ru/story/2022/01/1416572 (дата обращения: 10.09.2022).

5. Прицельная данность: кто пытался убить корреспондента «Известий» в Мариуполе [Электронный ресурс] // Союз журналистов России: сайт. URL: https://ruj.ru/news/pritselnaya-dannost-ktopytalsya-ubit-korrespondenta-izvestii-v-mariupole-17390 (дата обращения: 10.09.2022).

6. Гордеев В.Ф., Раев О.Н. История российской кинотехники: Московское конструкторское бюро киноаппаратуры. Москва: ФГУП «МКБК», 2009. 136 с.

7. Липовский Д.Д., Денисеня Ю.А., Васильев А.В. Специальные требования к робототехническим комплексам войск радиационной, химической и биологической защиты // ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА И КОНВЕРСИОННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ. // Труды Международной научно-технической конференции. – Санкт-Петербург: 2018. – с.361-366.

8. Лопота А.В. Роботы и робототехнические устройства. Стандартизованные термины и определения: справочник / А.В. Лопота, В.А. Павлов, А.К. Джинчарадзе, В.В. Васильев // Санкт-Петербург: ООО «Издательско-полиграфический комплекс «Гангут», 2020. – с.60.

9. ГОСТ Р 60.6.3.1-2019. Методы испытаний сервисных мобильных роботов для работы в экстремальных условиях. Термины и определения. [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: сайт. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200165763 (дата обращения: 10.09.2022).

10.Малогабаритный робототехнический комплекс «КАПИТАН». [Эл. ресурс] URL: https://rtc.ru/solution/kapitan/ (дата обращения: 10.09.2022).

11.Малогабаритная разведывательная платформа (МРП) «КУРСАНТ». [Эл. ресурс] URL: https://rtc.ru/solution/kursant/.

12.В каком формате вещает цифровое телевидение в России [Электронный ресурс] // ТВЦифровое.ru: сайт. URL: https://tvcifrovoe.ru/cifrovoe-televidenie/format-cifrovogo-tv.html (дата обращения: 10.09.2022)

13.Построение системы технического зрения мобильного робота с использованием беспроводной технологии Wi-Fi / Андреев В.П., Кирсанов К.Б., Прысев Е.А., Пронкин В.Ю., Пряничников В.Е., Травушкин А.С. // Информационно-измерительные и управляющие системы. – М.: Изд-во «Радиотехника», ISSN: 2070-0814. – 2009. – Т.7, №6. – С.49 – 63.

14.Система технического зрения для супервизорного управления роботизированных средств, построенная с использованием беспроводной технологии Wi-Fi / Андреев В.П., Кирсанов К.Б., Пронкин В.Ю., Прысев Е.А., Пряничников В.Е., Травушкин А.С. // Материалы XX Международной научно-технической конференции: Экстремальная робототехника. Нано- микро- и макророботы (ЭР-2009). – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – С.364 – 368.

15.Нильссон Ф. Технология сжатия видео // SystemCCTV, 2010. – № 03(45). – С.48 – 57.

16.Андреев В.П., Кирсанов К.Б. Технология многооператорного управления мобильными роботами через Интернет // Известия Южного Федерального университета. Технические науки. – Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону: 2015. – №10(171). – С.6 – 17.

О.Н. Галактионов[1], Г.Э. Рего[1], М. Томских[2], С.А. Завьялов[1], Д.Ж. Корзун[1]

О КОНСТРУКЦИИ КОЛЕСНОГО ШАССИ И СЕНСОРНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ АВТОНОМНОГО ДВИЖЕНИЯ ПО ТРУДНОПРОХОДИМОЙ МЕСТНОСТИ С ПРЕОДОЛЕНИЕМ И ОБХОДОМ ПРЕПЯТСТВИЙ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛЕСОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАБОТ

[1]ПетрГУ, г. Петрозаводск, ong66@mail.ru, sza123@list.ru, regogr@yandex.ru, dkorzun@cs.karelia.ru;
[2]ДРОНСХАБ, Москва, info@droneshub.ru,

Аннотация

В лесном комплексе РФ сложилась критическая ситуация в части воспроизводства и организации уходов за лесом, обусловленная снижением численности работников, привлекаемых на сезонные работы. Требуется построение роботизированной платформы, способной автономно передвигаться по труднопроходимой местности. В докладе рассматриваются две задачи по разработке такой платформы: а) конструкция колесного шасси, обеспечивающего возможность передвижения с преодолением и обходом препятствий; б) сенсорная система, обеспечивающая распознавание препятствия для определения способа преодоления или обхода. Представлены технические требования и обсуждается вариант конструкции колесного шасси и интеллектуальной сенсорной системы. В целом, предлагаемая роботизированная платформа позволяет сформировать элементы «умного бионического интернет-окружения» человека (оператор, привлекаемый дистанционно к управлению в случае возникновения затруднений при движении). Выполняет роль цифрового ассистента для усиления органов чувств дистанционного человека-оператора.

Ключевые слова

Лесовосстановление, роботизированная платформа, интеллектуальная сенсорика, автономное движение, труднопроходимая местность, распознавание препятствий.

O.N. Galaktionov[1], G.E. Rego[1], M. Tomskih[2], S.A. Zavyalov[1], D.Zh. Korzun[1]

ON THE DESIGN OF WHEELED CHASSIS AND SENSING SYSTEM FOR AUTONOMOUS MOVEMENT ON DIFFICULT TERRAIN WITH OVERCOMING AND BYPASSING OBSTACLES WHEN PERFORMING FORESTRY WORK

[1]PetrSU, Petrozavodsk, Russia, ong66@mail.ru, sza123@list.ru, regogr@yandex.ru, dkorzun@cs.karelia.ru; [2]Droneshub, Moscow, Russia, info@droneshub.ru

Abstract

The forestry industry of the Russian Federation is in a critical situation in terms of reproduction and organization of forest maintenance, due to the reduction in the number of workers involved in seasonal work. We suggest to develop a robotic platform capable of moving autonomously in difficult terrain with overcoming and bypassing obstacles. The paper discusses two challenges in developing such a platform: a) the design of a wheeled chassis that enables driving over and around obstacles, and b) a sensor system that recognizes an obstacle to determine how to overcome or avoid it. Technical requirements are presented and variants of the wheeled chassis and sensor system design are discussed. Note that the proposed robotic platform allows the formation of elements of a «smart bionic Internet environment» of a person (an operator engaged remotely to control in case of difficulties in movement), performing the role of a digital assistant to enhance the senses of the remote human operator.

Key words

Reforestation, robotic platform, intelligent sensorics, autonomous movement, difficult terrain, obstacle recognition.

Проблема лесовосстановления и ухода за лесными угодьями

Проблема лесовосстановления является одной из главных проблем лесной отрасли. Она особенно актуальна для северных территорий. По требованиям лесного кодекса лесовосстановление после вырубки должно выполняться в объеме не менее 20 %, а с 2025 года 30 % [п. 4 и 5, 1]. Одним из путей решения может стать внедрение в лесохозяйственное производство роботизированной техники [3].

Рассмотрим работы, связанные с лесопосадками и уходом за лесом на ранних возрастах [5]. Основное требование на движение техники - способность автономно передвигаться по труднопроходимой местности с преодолением и обходом препятствий [6]. Также имеется ряд факторов затрудняющих проведение работ по лесовосстановлению.

Первым фактором является сезонность лесовосстановления. Вырубка леса может осуществляться практически круглый год. В то же время лесопосадки могут проводиться лишь 1-2 месяца в году из-за климатических условий [стр. 148, 4]. Такая ярко выраженная сезонность приводит к тому, что работы по лесопосадке приходится проводить в авральном режиме.

Вторым фактором, усложняющим лесовосстановительные работы, является малая населенность северных территорий. Отсюда вытекает нехватка кадров, которые бы занимались данным видом деятельности.

Третьим фактором являются лесные пожары. Помимо лесных территорий, которые необходимо восстанавливать после вырубки, добавляются территории, пострадавшие от лесных пожаров.

Природные условия в зоне ухода и лесопосадок характеризуются малопересеченной местностью, обладающей выраженным микрорельефом, наличием переувлажненных и заболоченных участков, отходов лесозаготовительного процесса – обломков и целых стволов деревьев, ветвей, колеи, сформированной лесозаготовительными машинами. При подготовке к лесопосадочным работам дополнительно формируются гряды, сформированные грунтом и отходами лесозаготовок.

При движении по такой местности роботизированная платформа будет сталкиваться с проблемой преодоления препятствия или для обхода препятствия, что требует коррекции ранее разработанного маршрута по ходу движения. Таким образом, приходим к следующим двум задачам по разработке роботизированной платформы:

а) конструкция колесного шасси, обеспечивающего возможность передвижения с преодолением и обходом препятствий;

б) сенсорная система, обеспечивающая распознавание препятствия для определения способа преодоления или обхода.

В докладе представлены технические требования и обсуждается вариант конструкции колесного шасси и сенсорной системы.

Колесное шасси должно обеспечивать движение в соответствии с заданным маршрутом, со скоростью сравнимой или превосходящей скорость передвижения человека, а также доставку технологического оборудования для выполнения работ с экономически эффективными затратами. Концептуальная схема представлена на рисунке 1.

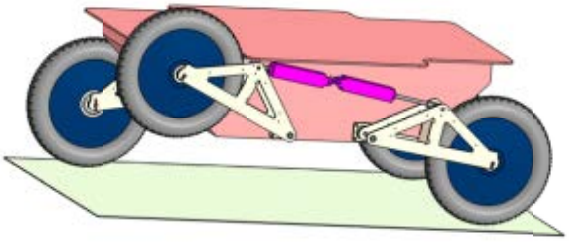


Рисунок 1 — Схема шасси. Возможна установка двух параллельных ферм на мотор-колесо

Сенсорная система должна обеспечивать как техническое зрение (наблюдение на основе видеокамер, в т.ч. тепловизионных), так и комплексное использование других способов распознавания пре-

пятствий. В частности, предлагается интегрировать в систему лидары и датчики деформаций, активно используемые в бионических компонентах робототехники и тактильном интернете.

Обзор существующих решений

На данный момент не существует полностью готовых лесных роботов. Однако существуют роботы в сельскохозяйственной, военной и противопожарной отраслях, которые имеют ряд функций, необходимых для лесного робота.

Робот [2] Thermite RS3, по словам разработчиков, обеспечивают тушение пожара, ситуационную осведомленность и сбор разведывательных данных для служб быстрого реагирования. Пользователям предоставляется видеопоток в реальном времени, позволяющий пересекать опасную местность и сталкивать препятствия со своего пути, выдерживая экстремальные условия. Одним из достоинств робота, которое требуется и лесному роботу, является высокая проходимость.

Робот Colossus [7] — универсальный дистанционно управляемый робот, предназначенный для поддержки пожарных и служб экстренного реагирования в опасных миссиях. С водометом высокого давления и мощными вездеходными гусеницами он может помочь тушить пожары, убирать мусор и эвакуировать пострадавших. Основным его достоинством является высокая (до 550 кг.) грузоподъемность.

Платформа Multiscope UGV [8] предназначена для тушения промышленных, складских, туннельных и лесных пожаров. Робот также обладает высокой грузоподъемностью.

Из отечественных разработок можно отметить разработку робототехнического комплекса Пластун [15]. Его основным предназначением является патрулирование местности и обнаружение подозрительных объектов. Исходя из целей эксплуатации, данный робот не обладает высокой грузоподъемностью.

Все перечисленные выше решения не обладают достаточным уровнем автономности для движения в лесной местности в автоматическом режиме. Основным назначением является вспомогательная функция, управляемая человеком. Кроме того, данные роботы не применяются для посадки деревьев на лесосеке.

Конструкция лесного робота

Одними из главных задач при проектировании роботизированной платформы являются выбор типа и конструкции движителя и обоснование мощности двигателя.

Выбор мощности двигателя обусловлен в данном случае выполняемыми технологическими работами. Самый тяжелый вид работ – подготовка почвы [13], будет производиться более тяжелыми машинами со специальным оборудованием. Для проведения остальных лесохозяйственных работ высокие мощности не нужны, для механизированных лесопосадок используются тракторы типа Беларус (МТЗ) Л82.2 мощностью двигателя 59,6 кВт (81 л.с.). Так как пропашных работ вести не планируется, перемещения с высокой скоростью также не предполагается, то следует ориентироваться на мощность до 20 кВт.

Выбор типа двигателя для достижения высокой автономности не дает большого разнообразия. Больше всего требованиям соответствует дизельный двигатель внутреннего сгорания, наиболее полно отвечающий условиям эксплуатации. Его основными достоинствами являются: простота организации заправки, использование распространенного топлива, наличие специалистов для обслуживания, вариативность конструкций.

Второй выбор, который необходимо сделать, это выбор между гусеницами и колесами. Колесный движитель имеет следующие достоинства: относительно малая масса, возможность индивидуальной подвески колеса, малые энергозатраты на поворот, при выходе одного колеса из строя машина может вернуться к базовому пункту.

Гусеничный движитель имеет следующие особенности: при использовании стальных гусениц масса больше, но при использовании резино-кордовых гусениц масса сопоставима с колесами, большие

энергозатраты на поворот из-за контакта с неровностями поверхности лесного грунта, возможность схода гусеницы.

Анализ конструкций машин для аналогичных условий показал [3, 5], что в экстремальных случаях конструкторы прибегают именно к колесным движителям. Гусеничные или полугусеничные движители применяют в случае больших перевозимых грузов или слабых грунтов.

Руководствуясь предполагаемыми условиями работы роботизированной платформы, необходимостью и возможностями по управлению положением движителей окончательно выбран колесный движитель.

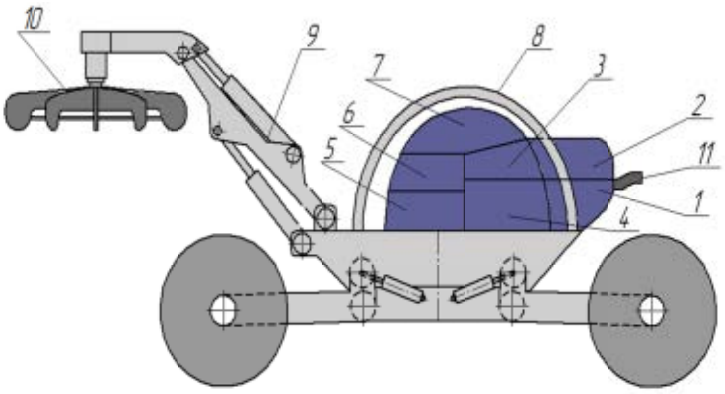
Наличие большого числа препятствий – подвижных и неподвижных, на лесосеках предполагает достаточно большой дорожный просвет и свободное пространство в горизонтальном направлении. Дорожный просвет должен составлять не менее 0,3 м (высота пней поваленных деревьев), горизонтальный просвет обеспечивается использованием мотор-колес с внутренним расположением привода (это также позволит защитить гидро-электро-пневмомагистрали). Система изменения положения колес должна быть расположена в плоскости колес или консолей шасси, соответственно, левых и правых.

Препятствия, выходящие за указанные пределы, будут преодолеваться или обходиться за счет независимого изменения взаимного расположения консолей шасси с обеспечением горизонтального положения платформы с допуском ±10°. Решение о способе обхода препятствия и обеспечения допустимых величин наклона платформы или положения технологического оборудования принимается системой искусственного интеллекта на борту платформы.

В результате сбора данных и получены два варианта компоновки оборудования (см. рис. 2): для роботизированной платформы с оборудованием для проведения уходов за лесами (а) и для проведения лесопосадок (б).

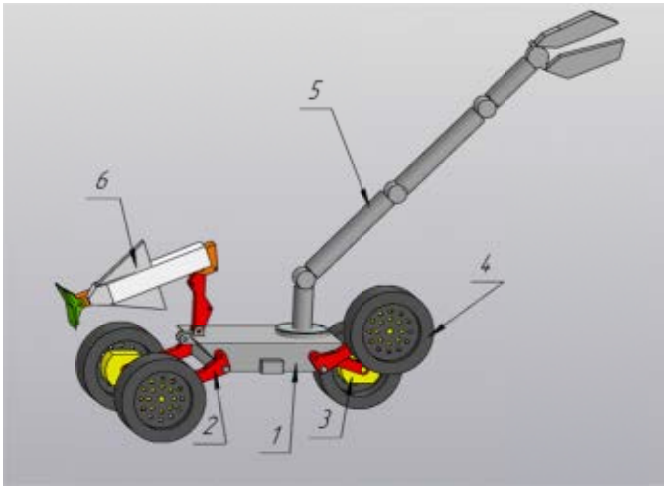
Первый вариант предполагает использование гидропривода для колес и манипулятора, поэтому масса конструкции в целом оценивается в 2.5–3 т. Кроме того неизбежно появляются вопросы заправки, охлаждения двигателя и гидрожидкости. Довольно серьезной проблемой является размещение сенсорного оборудования и датчиков, опыт эксплуатации показывает, что они достаточно часто выходят из строя либо теряют работоспособность из-за потери обзора.

Во втором варианте предполагается использование легкого прицепа с запасом саженцев. Подачу очередной кассеты с саженцами обеспечивает манипулятор.



1 – Топливный бак; 2 – Гидрожидкость; 3 – Охлаждающая жидкость; 4 – Дизельный двигатель; 5 – Гидронасос; 6 – Генератор; 7 – Электронный модуль; 8 – Защитная рама; 9 – Манипулятор; 10 – Пильный диск; 11 – Топливопровод

Рисунок 2а — Варианты компоновки роботизированной платформы и технологического оборудования



1 – Рама; 2– Поворотный кронштейн; 3 – Электродвигатель (мотор-колесо); 4 – Шина с профилем типа «елочка» или аналогичной конструкции; 5 – Манипулятор; 6 – Посадочное устройство

Рисунок 2б — Варианты компоновки роботизированной платформы и технологического оборудования

Сенсорная система

Сенсорная система должна быть интеллектуальной, т.е. распознавать текущую ситуацию подобно тому, как это выполняет человек, используя свой интеллект и органы чувств [27]. При этом, самого робота можно рассматривать как участника интернета вещей и даже тактильного интернета. Сенсорная система обеспечивает усиление органов чувств человека-оператора, который может вмешиваться в управление роботом при возникновении затруднительных ситуаций [16]. В целом, такая система есть сложный элемент «умного бионического окружения» человека, реализующего методы интеллектуальной сенсорики в режиме реального времени и выполняющего роль цифрового ассистента, на основе регулярно собираемых сенсорных данных [28].

Существует несколько архитектур сенсорных систем, спроектированных для автономных роботов. Например, робот для тушения пожаров в помещениях использует ультразвуковой датчик для обхода препятствий и датчик пламени для автоматического обнаружения возгорания [9]. Кроме того данный робот применяет несколько видеокамер для создания обзора в 360 градусов.

Одним из самых популярных датчиков для беспилотного транспорта является лидар. Его применяют как для 2D [10], так и для 3D [11] распознавания препятствий. Техническое зрение как одна из важнейших подзадач автономной роботизации также разбирается в [14]. Работа включает как алгоритмическую, так и аппаратную составляющую компьютерного зрения. В качестве датчиков состояния окружающей среды перечислены лидары, гироскопы, акселерометры, спутниковые навигационные системы и видеокамеры видимого и инфракрасного диапазона.

Отдельно стоит рассмотреть задачу навигации робота. Суть ее заключается в том, что робот должен понимать собственное местоположение с заданной точностью, а также передавать данные о своем местоположении оператору управления. Задача подбора датчиков, необходимых для задачи навигации при движении по пересеченной и лесной местности рассматривается в [12]. Основными датчиками являются: акселерометр, гироскоп, магнитометр, спутниковая навигационная система и одометр. С точки зрения конструкции робота, полезнее, когда навигационные датчики находятся в монолитном корпусе [26]. Это улучшает массогабаритные характеристики конструкции.

В совокупности задача навигации и технического зрения дают возможность роботу двигаться автономно. Задачи, которые необходимо решить для создания лесного робота, были описаны ранее [16]. В таблице 1 приводится список датчиков, их основное предназначение, а также планируемое расположение.

Датчик перепада высоты необходим для того, чтобы отслеживать резкую смену высоты (например, овраг) на пути следования платформы. У датчиков высоты имеется ряд ограничений [20], однако

они могут принести пользу. В случае, если перепад высот слишком велик, платформа останавливает движение и запускается поиск другого маршрута. Подобный датчик должен стоять на переднем крае платформы на уровне колес (гусениц). Передним считается тот край, в направление которого осуществляется движение. Возможно, имеет смысл размещать датчик на углах платформы, однако в таком случае вырастает вероятность ложного срабатывания. Например, платформа движется по какому-то мосту и в угловых точках перепад высот велик, в то время как под колесами все в порядке.

Таблица 1 — Датчики, необходимые для функционирования лесного робота

Датчик	**Основная функция**	**Предполагаемое расположение на платформе**
Датчик перепада высоты	Детектирование ям/оврагов, проваливания и т.д.	Передние края осей, вдоль которых движется платформа
IMU-сенсоры	Локальное позиционирование	Центр массы платформы, на технологическом оборудовании
Лидары	Обнаружение препятствий, отслеживание положения технологического оборудования	На переднем крае верхней части платформы
Видеокамеры	Обнаружение препятствий, отслеживание положения технологического оборудования	На переднем крае верхней части платформы
Датчик силы	Обнаружение препятствий	На технологическом оборудовании, а также передних краях осей, вдоль которых движется платформа
Тепловизоры	Обнаружение препятствий	На переднем крае верхней части платформы
Датчики температуры	Замер температуры окружающей среды / критически важных компонентов платформы	Фронтально на корпусе платформы, в зависимости от текущих задач
ГЛОНАСС/GPS	Глобальное позиционирование	В верхней части платформы
Датчик влажности грунта	Получение информации о пригодности почвы для посадки саженца	На технологическом оборудовании
Датчик плотности грунта	Получение информации о пригодности почвы для посадки саженца	На технологическом оборудовании

IMU (inertial measurement unit)-сенсоры нужны как для локального позиционирования конструкции в целом, так и для позиционирования технологического оборудования относительно платформы [21,22]. Платформа должна понимать, какова была траектория движения относительно точки старта и в какой точке платформа находится на текущий момент. Также IMU-сенсоры позволяют оценить положение манипулятора и других инструментов относительно платформы. Количество и расположение сенсоров зависит от того, что именно мы хотим распознавать. Например, для определения местоположения платформы целиком достаточно одного датчика, расположенного в геометрическом центре конструкции.

Лидары нужны для того, чтобы определять расстояние до внешних объектов. Их использование – стандартная практика в случае с беспилотным транспортом. Лидары позволяют сформировать картину о том, на каком расстоянии находятся предметы от текущей точки. Однако, имеются и минусы. Лидары являются самыми дорогостоящими датчики из описанных в данной статье. Также лидары не дают информацию об объектах в доступном для восприятия человеком виде.

Видеокамеры позволяют создать картинку, понятную человеческому глазу. Кроме того, данные с видеокамер могут рассказать о природе внешнего объекта, а не только о расстоянии до него. Минус камер в том, что в ночное время или в дождливую погоду их эффективность заметно снижается.

Датчик силы нужен для тех случаев, когда лидар и камера не способны определить природу препятствия, находящегося впереди. Например, в ситуации, когда впереди находится кустарник, датчик силы позволит определить дальнейшее поведение платформы [23]. Необходима попытка проехать сквозь кустарник. Если при этом усилие растет до какой-то точки, а потом стабилизируется, значит сквозь кусты можно проехать. Если же усилие растет и становится выше какой-то критической точки, значит кустарник слишком тверд (например, за кустарником скрывается дерево) и необходимо объезжать препятствие.

Тепловизоры могут понадобиться для распознавания животных или людей, встречающихся на пути. С одной стороны, в лесу могут присутствовать живые организмы совершенно разных форм и размеров. В связи с этим их распознавание по данным с камеры может быть затруднительным. Причиной затруднений является необходимость тренировки алгоритмов машинного обучения на каждом возможном виде организмов.

Совокупность лидаров, камер, датчиков силы и тепловизоров является зрением всего лесного робота. Соответственно, они должны располагаться по направлению следования платформы (передний край и центр) либо на верхней части платформы, а также иметь свободный обзор. Эти датчики не должны загораживаться другими датчиками и технологическим оборудованием. Различные комбинации данных датчиков используются в подавляющем большинстве систем технического зрения [17-19].

Датчики температуры нужны для того, чтобы не перегревались важнейшие элементы всей системы [24]. Например, если платформа долгое время находится на открытом солнце при температуре +30 и помимо этого производит активные вычисления, то необходимо вовремя отключать систему или уезжать в тенистое место. Кроме того, датчик температуры позволяет детектировать возгорания в лесной местности. Расположение датчика температуры зависит от того, температуру чего необходимо измерять.

Датчики ГЛОНАСС/GPS необходимы для глобального позиционирования и понимании того, где в данный момент находится платформа. Подобный датчик может работать не постоянно, а с какой-либо периодичностью (например, один раз в 10 секунд). Датчик должен располагаться в верхней части платформы, чтобы осуществлять связь со спутником.

Датчик влажности грунта требуется для определения природы почвы, в которую планируется разместить саженец. Подобный датчик необходим, так как имеются требования к влажности почвы, например, [стр. 123, 4]. Это необходимо для того, чтобы, например, избежать переувлажнения корневой системы, попыток посадить саженец в скальный грунт или валун.

Датчик плотности грунта необходим для определения силы, с которой необходимо формировать посадочную лунку и подавать саженец. Последние два устройства должны располагаться непосредственно на манипуляторе, который осуществляет посадку.

Два указанных датчика должны работать вместе, так как в лесохозяйственных материалах отсутствует система деления лесных участков по уровню измеренной влажности – относительной или абсолютной, и вместо прямого измерения используется оценка влажности по гранулометрическому составу почвы и преобладающим видам напочвенного покрова, например [25]. Последнее позволяет использовать для оценки увлажненности грунта анализ видеосигнала.

Анализ препятствий

Лесовосстановление является важной задачей для поддержания функционирования лесного комплекса. По этой причине довольно много исследований было направлено на изучение влияния состояния почв на успешность лесопосадок. Работа [13], содержит наиболее широкий охват условий и успешности применения различных типов машин. В нижеприведенной таблице описаны условия для наиболее распространенных типов леса в Республике Карелия.

Таблица 2 —Характеристики условий работы на вырубках [13]

Тип леса до рубки	Ельник черничный			Сосняк черничный	Сосняк брусничный
Тип почвы	подзолистая	подзолистая	подзолистая	подзолистая	подзол
Механический состав	супесь	супесь	супесь	супесь	песок
Рельеф	слабовсхолмбовсхолмленный	сильновсхолмленный	сильновсхолмленный	сильновсхолмленный, с выходом на поверхность скальных пород	слабовсхолмленный
Микрорельеф	Резко выражен	Резко выражен	Резко выражен	Резко выражен	Выражен слабо
Доминанты напочвенного покрова	черника, вейник, ландыш, костяника, майник, брусника	вейник, костяника, ландыш, золотая розга, седмичник	черника, вейник, костяника, ландыш, золотая розга	черника, вейник, костяника, земляника, герань лесная, ландыш	брусника, вороника, лишайники
Завалуненность почвы, %	5	15	26	22	отсутствует
Кол-во пней на 1 га, шт.	1500	980	1085	820	460
Средний диаметр пней, см	21	22	21	21	32
Средняя высота пней, см	24	21	21	20	27
Захламленность лесосеки, скл. м3	15	25	25	35	10

Данные условия можно считать типичными для Республики Карелия и на них следует ориентироваться при разработке экстремальной лесной техники для выполнения лесопосадочных работ.

В том же источнике приведены причины невозможности посадки саженца, в оригинале исследовалось орудие для формирования посадочных лунок.

Лидируют по частоте влияния на возможность посадки камни, порубочные остатки. Пни и корневые лапы на качестве лесопосадок сказываются в меньшей степени.

Так как саженцы необходимо посадить на глубину 10-12 см, то для проектирования посадочных механизмов и оценки необходимости оснащения экстремального робота датчиками камней и корней можно ориентироваться на данные таблицы 4.

Таблица 4 дает основания предполагать, что больше трети посадочных мест, при их равномерном размещении, окажется неподходящими для саженца. Однако, данных о размерах учтенных камней нет и, следовательно, при достаточной прочности посадочного механизма и мощности его привода или использовании датчика-щупа эта проблема может быть успешно решена.

Таблица 3 — Причины пропусков и некачественно подготовленных посадочных лунок на вырубках [13]

№ участка	Отбраковано лунок, %	Причины пропусков и некачественно подготовленных лунок, %			
		камни	порубочные остатки	пни	корневые лапы и корни
1	20	0	65	0	2
2	28	20	62	0	18
3	36	54	3	15	0
4	38	72	11	6	3
5	51	58	27	5	8
6	53	32	30	15	8

Таблица 4 — Условия работы почвообрабатывающих агрегатов [12]

Тип леса	Число пней, шт./га	Почва		Средняя глубина залегания камней, см	Частота встречаемости камней в верхнем 15-см слое почвы, %
		тип	механический состав		
Осинник, травяно-злаковый	1700	подзолистая	супесь	13	66
Ельник черничный	1300	подзол	супесь	14	61
	800	подзолистая	супесь	18	43
	1050	подзол	супесь	14	66
	1250	подзолистая	супесь	13	63
	1600	подзол	супесь	15	52
	1700	подзол	супесь	25	11
Сосняк брусничный	850	подзол	песок	27	3
	900	подзол	песок	27	10
				В среднем	37,5

В докладе рассмотрена практическая проблема, связанная с проведением работ по лесопосадке и уходом за лесом на ранних возрастах. Предложено построение роботизированной платформы, способной автономно передвигаться по труднопроходимой местности с преодолением и обходом препятствий. При этом, человек-оператор может дистанционно вмешиваться в управление движением, если сам робот не может найти решения по обходу или преодолению препятствия. Рассмотрены две задачи по разработке: а) конструкция колесного шасси, обеспечивающего возможность передвижения с преодолением и обходом препятствий; б) сенсорная система, обеспечивающая распознавание препятствия для определения способа преодоления или обхода.

Колесное шасси обеспечивает движение в соответствии с заданным маршрутом, со скоростью сравнимой или превосходящей скорость передвижения человека, а также доставку технологического оборудования для выполнения работ с экономически эффективными затратами. Сенсорная система обеспечивает как техническое зрение, так и комплексное использование других способов распознавания препятствий в режиме реального времени. Предлагаемую платформу следует рассматривать как возможного участника интернета вещей и даже тактильного интернета - элемент «умного бионического окружения» человека, реализующего методы интеллектуальной сенсорики в режиме реального времени и выполняющего роль цифрового ассистента для усиления органов чувств дистанционного человека-оператора.

Исследование выполняется за счет гранта Российского научного фонда № 22-11-20040 (https://rscf.ru/project/22-11-20040/), проводимого совместно с Республикой Карелия с финансированием из Фонда венчурных инвестиций Республики Карелия (ФВИ РК).

Литература

1. Приказ Минприроды России от 29.12.2021 N 1024 "Об утверждении Правил лесовосстановления, формы, состава, порядка согласования проекта лесовосстановления, оснований для отказа в его согласовании, а также требований к формату в электронной форме проекта лесовосстановления" URL: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202202110024 Дата посещения: 29.08.2022

2. Термит. Первый коммерческий пожарный робот. URL: https://www.howeandhowe.com/civil/thermite#:~:text=Thermite%20robotic%20firefighters%20are%20one,intelligence%20gathering%20to%20first%20responders. Дата посещения: 29.08.2022

3. Беспилотные машины и аппараты в лесном хозяйстве / Ю. В. Суханов, П. О. Щукин, О. И. Гаврилова [и др.] // Наука, технологии, общество - НТО-II-2022 : сборник научных статей по материалам II Всероссийской научной конференции, Красноярск, 2022. С. 46-66.

4. Лесохозяйственный регламент Пряжинского лесничества Республики Карелия. URL: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/1001202010080007. Дата посещения: 29.08.2022

5. Luiz F. P. Oliveira, António P. Moreira, Manuel F. Silva. Advances in Forest Robotics: A State-of-the-Art Survey // Robotics, 2021, № 10(2). DOI 10.3390/robotics10020053.

6. Features of Building a Forestry Intelligent Robotic System / O. Galaktionov, S. Zavyalov, L. Shchegoleva, D. Korzun // Conference of Open Innovations Association, FRUCT. – 2021. – No 29. – P. 433-436.

7. Colossus URL: https://robots.ieee.org/robots/colossus/. Дата посещения: 30.08.2022

8. Мультископ UGV. URL: https://milremrobotics.com/commercial/. Дата посещения: 30.08.2022

9. L. Mingsong and L. Tugan, "Design and Experiment of Control System of Intelligent Fire Fighting Robot," 2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC), 2020, pp. 2570-2573, doi: 10.1109/ITNEC48623.2020.9084919.

10. J. Liu, Q. Sun, Z. Fan and Y. Jia, "TOF Lidar Development in Autonomous Vehicle," 2018 IEEE 3rd Optoelectronics Global Conference (OGC), 2018, pp. 185-190, doi: 10.1109/OGC.2018.8529992.

11. S. McCrae and A. Zakhor, "3d Object Detection For Autonomous Driving Using Temporal Lidar Data," 2020 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), 2020, pp. 2661-2665, doi: 10.1109/ICIP40778.2020.9191134.

12. Соколов Сергей Михайлович, Богуславский Андрей Александрович Унифицированная компоновка комплексных интеллектуальных систем информационного обеспечения автопилотов мобильных средств // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. №2 (175). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/unifitsirovannaya-komponovka-kompleksnyh-intellektualnyh-sistem-informatsionnogo-obespecheniya-avtopilotov-mobilnyh-sredstv (дата обращения: 31.08.2022).

13. Соколов А. И., Харитонов В. А., Кривенко Т. И. Механизация обработки почвы на нераскорчеванных вырубках в условиях Карелии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2008. 100 с.

14. Карпенков Андрей Сергеевич, Мартынов Олег Владимирович, Гришанович Юлия Владимировна, Карпенкова Елена Сергеевна Метод навигации мобильного робота для позиционирования на дороге в лесной местности // Вестник науки и образования. 2018. №17-1 (53). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/metod-navigatsii-mobilnogo-robota-dlya-pozitsionirovaniya-na-doroge-v-lesnoy-mestnosti (дата обращения: 31.08.2022).

15. Робот Пластун URL: http://www.army-guide.com/rus/product5513.html (дата обращения: 31.08.2022).

16. Рего Г.Э., Корзун Д.Ж., Щеголева Л.В. Проект «лесной робот»: концептуальная модель анализа движения мобильной робототехнической системы для лесовосстановления и рубок ухода // Перспекти-

вы и возможности использования цифровых технологий в науке, образовании и управлении [Электронный ресурс] : сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции (г. Астрахань, 21–23 апреля 2022г.), 206-210с.

17. J. Kim, D. S. Han and B. Senouci, "Radar and Vision Sensor Fusion for Object Detection in Autonomous Vehicle Surroundings," 2018 Tenth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), 2018, pp. 76-78, doi: 10.1109/ICUFN.2018.8436959.

A. N. Wilson, A. Kumar, A. Jha and L. R. Cenkeramaddi, "Embedded Sensors, Communication Technologies, Computing Platforms and Machine Learning for UAVs: A Review," in IEEE Sensors Journal, vol. 22, no. 3, pp. 1807-1826, 1 Feb.1, 2022, doi: 10.1109/JSEN.2021.3139124.

18. J. D. Choi and M. Y. Kim, "A Sensor Fusion System with Thermal Infrared Camera and LiDAR for Autonomous Vehicles: Its Calibration and Application," 2021 Twelfth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), 2021, pp. 361-365, doi: 10.1109/ICUFN49451.2021.9528609.

19. Аникушин М. А., Власов В. В., Трифонов А. В. РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ДАТЧИКИ ВЫСОТЫ ТРЕХМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН // Вестник Концерна ВКО Алмаз-Антей. 2021. №4 (39). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/radiolokatsionnye-datchiki-vysoty-trehmillimetrovogo-diapazona-dlin-voln (дата обращения: 09.09.2022).

20. O. S. Eyobu, A. Poulose and D. S. Han, "An Accuracy Generalization Benchmark for Wireless Indoor Localization based on IMU Sensor Data," 2018 IEEE 8th International Conference on Consumer Electronics - Berlin (ICCE-Berlin), 2018, pp. 1-3, doi: 10.1109/ICCE-Berlin.2018.8576213.

21. D. R. -Y. Phang, W. -K. Lee, N. Matsuhira and P. Michail, "Enhanced Mobile Robot Localization with Lidar and IMU Sensor," 2019 IEEE International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai (IMFEDK), 2019, pp. 71-72, doi: 10.1109/IMFEDK48381.2019.8950726.

22. S. Cramp, C. Maccoll and R. B. Wallace, "Preliminary Results for Novel Shear Force Sensor using Force Sensitive Resistors," 2020 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/I2MTC43012.2020.9128858.

23. M. Hasan, R. I. Sonet, A. Sen, R. P. Das and J. Ahmed, "Design And Development Of A Fire Fighting Mobile Surveillance Robot With Autonomous Collision Avoidance," 2021 International Conference on Automation, Control and Mechatronics for Industry 4.0 (ACMI), 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/ACMI53878.2021.9528300.

24. Анисимова И.М. Естественное возобновление смешанных древостоев после низовых пожаров в условиях ландшафта Тихвинской гряды : автореферат диссертации. Санкт-Петербург, 2021. - 20 с.

25. Шипов И.А. Унифицированная моноблочная инерциальная навигационная система наземных робототехнических комплексов // Труды 32-й научно-технической конференции «Экстремальная робототехника», Санкт-Петербург, 2021. 93-95с.

26. Korzun D., Balandina E., Kashevnik A., Balandin S., Viola F. Ambient Intelligence Services in IoT Environments: Emerging Research and Opportunities. IGI Global, 2019.

27. Корзун, Д.Ж. О цифровом ассистенте для мониторинга жизнестойкости человека в условиях повседневной жизни. / Д. Ж. Корзун // Большие данные и проблемы общества. Сборник статей по итогам Международной научной конференции (Киров, 19-20 мая 2022 г.). Томск: Изд-во Томского гос. ун-та, 2022. С. 86-89.

И.А. Шипов

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НАЗЕМНОГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

АО «ВНИИ «Сигнал», г. Ковров, pil14@inbox.ru

Аннотация

Описан опыт создания системы моделирования инерциальной системы наземной навигации. Определены основные задачи процесса моделирования. Расписана структура, перечень ключевых элементов системы моделирования наземной навигации и подходы организации взаимосвязи между ними.

Ключевые слова

Моделирование, инерциальная система.

I.A. Shipov

NAVIGATION SYSTEM SIMULATION OF UNMANNED GROUND VEHICLES

VNII Signal JSC, Kovrov, Russia, pil14@inbox.ru

Abstract

This article consider the experience of developing a simulation system for inertial ground navigation system. There are described the structure, list of key elements and approaches to organization of interaction between them.

Key words

Modeling, navigation system, system simulation.

При проектировании робототехнических комплексов (РТК) в целом и отработке технических решений на уровне их подсистем эффективным инструментом является программно-аппаратное моделирование. При этом значимость этапа моделирования возрастает вместе со сложностью структуры и расширением набора функциональных задач наземного РТК.

Моделирование навигационной аппаратуры

Учитывая экономическую целесообразность, длительность закупки ЭРИ и сложность проектирования современных аппаратных средств [1] проведение имитационных экспериментов может существенно снизить риски конструктивных дефектов при одновременном сокращении сроков разработки. При этом детализация модели должна идти по принципу, что эффект от улучшения модели должен быть больше чем связанные затраты.

На рисунке 1 иллюстративно изображены кривые затрат на разработку модели, ущерба от ее использования и суммарная кривая показывающая условные границы предела целесообразности уточнения модели.

Средствами моделирования могут быть отработаны основные базовые алгоритмы решения задачи ориентирования и определения местоположения объекта, скорректированы основные функции с учетом специфики применения и определен облик системы в целом.

Методы моделирования навигационных систем наземных РТК можно разделить на два основных типа:

- моделирование архитектуры;
- моделирование поведения.

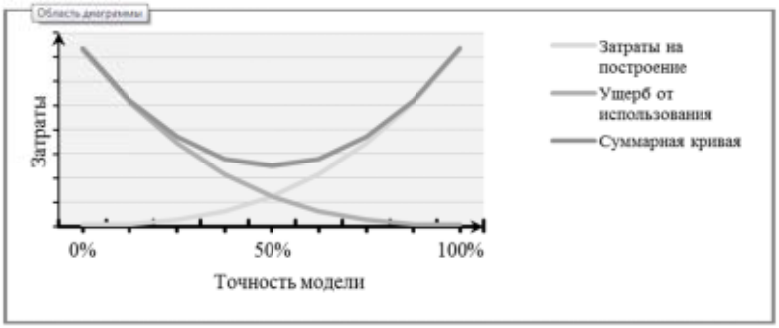


Рисунок 1 — Сопоставление затрат на моделирование

Проведение моделирования архитектуры позволяет сформировать облик будущей навигационной системы с учетом типовых особенностей каждого структурного элемента [2]. Для проведения объективного сравнительного анализа вариантов необходима максимально достоверная реализация алгоритмов функционирования всех подсистем.

Эффективность моделирования поведения навигационной системы зависит от полноты функций используемых моделей, немаловажную роль играет реализация имитации взаимосвязей между элементами с учетом привязки к единой шкале времени.

Разработанный программно-аппаратный комплекс моделирования состоит из следующих основных типовых модулей:

- модуль имитации функционирования бесплатформенной инерциальной навигационной системы;
- модуль имитации аппаратуры спутниковой навигации;
- программно-аппаратный модуль имитации одометрических датчиков;
- модуль имитации блока чувствительных элементов;
- модуль имитации инерциальной системы ориентирования;
- модуль унифицированного потребителя навигационной информации.

Набор программных компонентов дает возможность разработчику навигационных систем проводить глубокий анализ функционирования как системы в целом, так и отдельных ее частей. Таким образом модуль имитации алгоритмов функционирования БИНС может взаимодействовать как с аппаратным блоком чувствительных элементов по каналам информационного взаимодействия, так и моделировать функционирование по унифицированным записям телеметрии полученных при различных условиях эксплуатации. Функция работы с файлами данных делает возможным анализ алгоритмов функционирования БИНС, построенных на чувствительных элементах различного типа, а также повышает эффективность анализа модели компенсации систематических погрешностей. Экранные формы программного модуля моделирования бесплатформенной инерциальной навигационной системы представлены на рисунке 2.

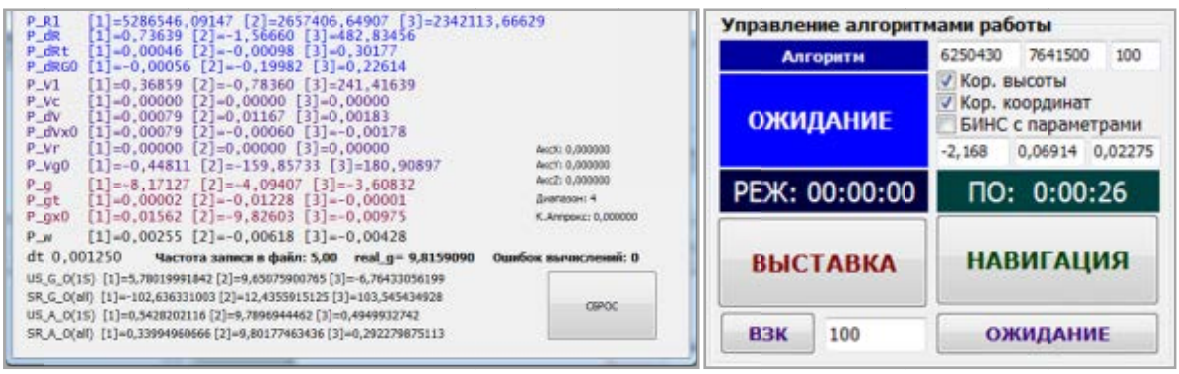


Рисунок 2 — Экранные формы моделирования функцнирования инецриальной системы

В рамках программно-аппаратного комплекса реализована возможность воспроизведения сценариев функционирования. В связи с этим одним из возможных подходов к расширению функционала является накопление базы статистических данных. Так например модуль имитации аппаратуры спутниковой навигации позволяет воспроизводить треки движения во время эксплуатации наземного РТК, отслеживать пропадание сигналов и имитировать работу алгоритмов компенсации погрешностей. На рисунке 3 приведены экранные формы генерирования сигналов спутниковой навигации (слева) и модуль электронной картографии обеспечивающий работу с записями телеметрии (справа).

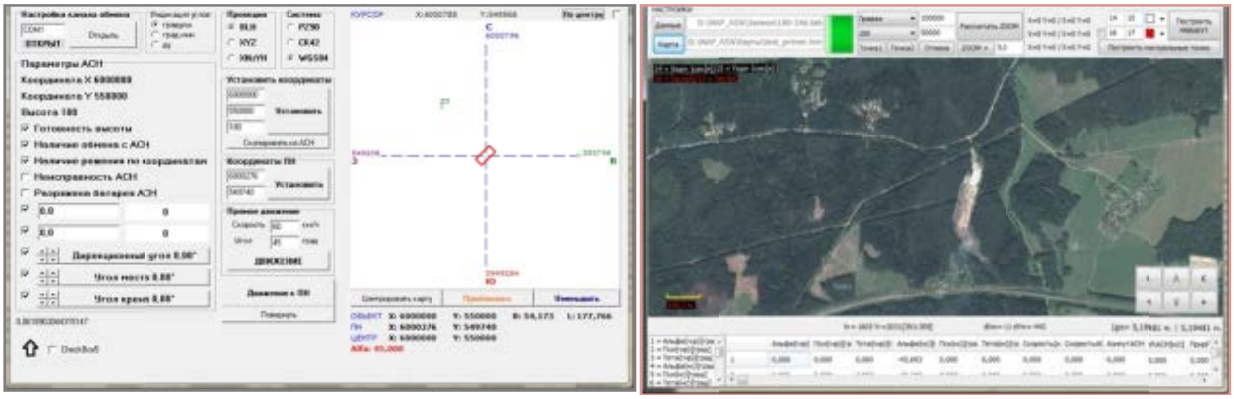


Рисунок 3 — Экранные форму системы моделирования аппаратуры спутниковой навигации

На рисунке 4 изображена экранная форма модуля имитации инерциальной системы ориентирования циклограмма работы которого полностью соответствует штатной. При этом оператор может в ручном режиме менять параметры и создавать исключительные ситуации для отработки сценариев поведения потребителей навигационного решения.

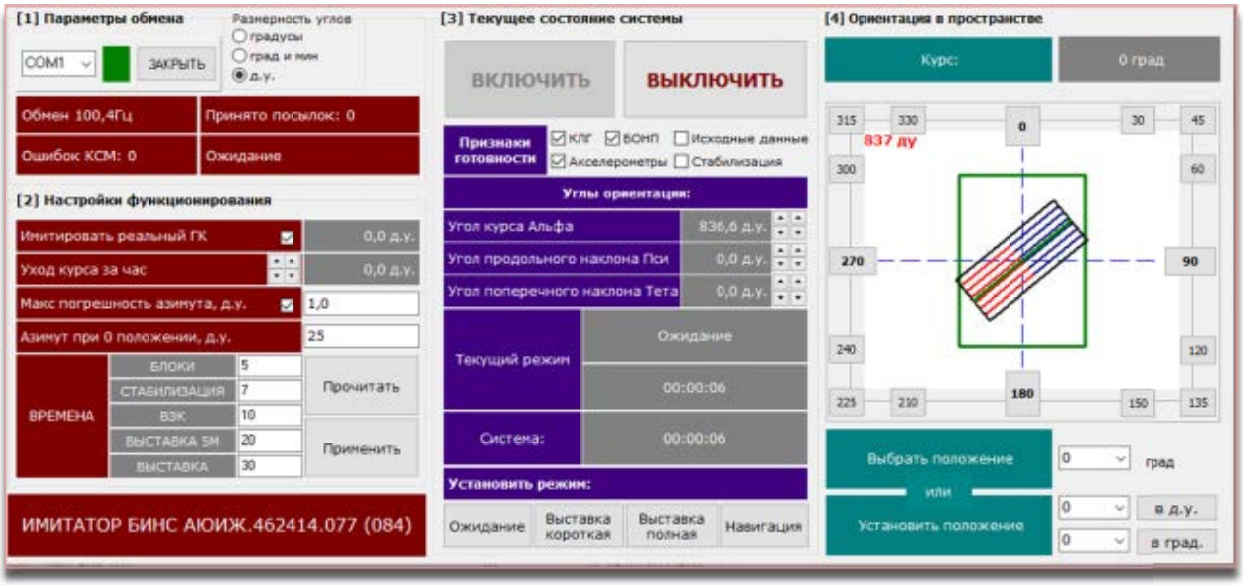


Рисунок 4 — Модуль имитации инерциальной системы ориентирования

Еще одним ключевым элементом навигационной системы наземного РТК являются датчики сигналов скорости. Было проведено программно-аппаратное моделирование двух типов датчиков, экранные формы представлены на рисунке 5:

- механический датчик скорости (слева);
- доплеровский датчик скорости (справа).

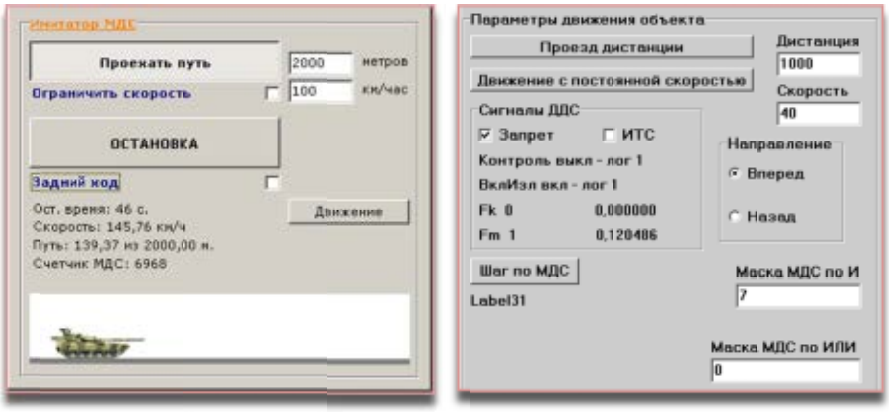


Рисунок 5 — Экранные формы модуля имитации датчиков скорости

Использование модуля имитации сигналов скорости снижает загрузку стендового оборудования за счет исключения необходимости использования реального прибора. Кроме этого данный модуль позволяет провести отработку алгоритма работы навигационной аппаратуры наземного объекта с «эталонной» путевой системой.

Программные модули одометрических датчиков в сочетании с имитацией аппаратуры спутниковой навигации обеспечивают проведение исследований в области создания эффективных алгоритмов комплексирования БИНС в составе подвижных объектов, при различных условиях эксплуатации.

Рисунок 6 — Схема взаимодействия имитационных программных модулей

На рисунке 6 представлена обобщенная схема взаимодействия разработанных модулей входящих в единую системы моделирования навигационной системы наземного робототехнического комплекса. Стоит отметить, что внутренние и внешние протоколы взаимодействия соответствуют штатным в связи с чем любой из элементов может быть заменен на реальный прибор. При этом на каждом этапе формирования навигационного решения могут быть зафиксированы промежуточные данные расчета для дальнейшего анализа в виде файлов.

Учитывая сложность и специфику навигационной аппаратуры наземного робототехнического комплекса можно выделить следующие основные возможности системы моделирования:

– отработка алгоритмов определения углов ориентирования и компенсации систематических погрешностей датчиков;

– отработка алгоритмов автономной, комплексированной и инерциальной навигации;
– моделирование поведения систем по записям телеметрии с реальных условий эксплуатации;
– гибкая модульная структура обеспечивает применение в нескольких разработках;
– взаимодействие с стендовым оборудованием, в том числе со стендами моделирования движения;
– функционирование как с использованием реальных приборов, так и по записям телеметрии.

Основные перспективы развития разработанного комплекса моделирования заключаются в поддержке более широкого набора протоколов взаимодействия со стендовых оборудованием, а так же поддержкой файлов записей телеметрии. При этом к основным направлениям можно отнести:

– накопление базы типовых математических моделей подвижных объектов различного типа;
– расширение перечня имитируемых подсистем РТК;
– повышение уровня автоматизации проводимых исследований;
– реализация возможности удаленного взаимодействия с компонентами систем;
– внедрение встроенного интерпретатора для написания сценариев моделирования;
– расширение поддержки стендового оборудования (климатические камеры, вибростенды и другие).

Разработанный комплекс имитационного моделирования навигационных систем позволяет решать широкий спектр исследовательских задач на различных этапах жизненного цикла наземных робототехнических объектов. В связи с тем, что каждый модуль выполнен в виде автономного программного обеспечения поддерживающего взаимодействие по штатным протоколам возможно комбинирование элементов в различные сочетания.

Литература

1. Шипов И.А., Реализация распределенных вычислений на отечественных микропроцессорных устройствах. // Известия ЮФУ. Технические науки. - 2022. - №1 (225) – С. 218-226.

2. Шипов И.А., Ветошкин Е.В., Комплексированная навигация наземных робототехнических комплексов. // Робототехника и техническая кибернетика. - 2021. – Т.9 №2 (225) – С. 127-132.

С.Г. Немчинов, Ю.И. Горбань, А.А. Туровский, Р.В. Приходченко

СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ УСТАНОВОК ПОЖАРОТУШЕНИЯ

ООО «Инженерный центр пожарной робототехники «ЭФЭР», г. Петрозаводск, info@efer.pro

Аннотация

Рассматриваются вопросы управления роботизированной установкой пожаротушения (далее – РУП), оснащенной системой определения местоположения и корректировки направления подачи струи огнетушащего вещества. В работе проанализированы способы улучшения эффективности работы РУП за счет повышения точности попадания пожарного робота струёй огнетушащего вещества в цель путем корректировки траектории струи по инфракрасному и видимому каналу. Точность подачи огнетушащего вещества (воды) должна обеспечиваться корректировкой с учетом воздействия ветровой нагрузки, а также погрешности определения координат очага, погрешности баллистических расчётов, погрешности наведения.

Ключевые слова

Пожарный робот, обратная связь, траектория, оптическое распознавание образов.

S.G. Nemchinov, Y.I. Gorban, A.A. Turovskiy, R.V. Prikhodchenko

TECHNICAL VISION SYSTEM FOR IMPLEMENTATION IN ROBOTIC FIRE SUPPRESSION SYSTEMS

«Engineering centre of fire robots technology «FR» LLC, Petrozavodsk, Russia, info@efer.pro

Abstract

The issues of a robotic fire suppression system (hereinafter referred to as RFSS), equipped with a positioning and fire extinguishing agent jet direction adjusting system, are considered. The paper analyzes the ways to improve the efficiency of the RFSS by increasing the accuracy of the firefighting robot hitting the target with a jet of fire extinguishing agent by adjusting the jet trajectory through the infrared and visible channels. The accuracy of the fire extinguishing agent (water) supply must be adjusted providing for the impact of the wind load, as also the error in the fire source positioning, the error in ballistic calculations, and the error in targeting.

Key words

Firefighting robot, feedback, trajectory, optical pattern recognition.

В соответствии с нормативными документами РУП при тушении должна орошать определенную площадь по заданным координатам, в заданное время, обеспечивая требуемую интенсивность орошения [1, 2]. Для определения исходных координат очага возгорания в установках пожаротушения производства ООО «Инженерный центр ЭФЭР» используется собственная система обнаружения очага. Инициализация поиска очага происходит по сигналу от пожарной сигнализации. Обнаружение координат очага в трехмерном пространстве обеспечивается штатными извещателями наведения в ИК- или ИК-УФ-диапазонах, входящими в комплект пожарных роботов. Орошение по заданным координатам (тушение очага) осуществляется по баллистической траектории струи с учетом давления огнетушащего вещества [3].

Для закрытых объемов (внутри помещений) на струю огнетушащего состава фактически не влияет внешнее воздействие. В то же время для наружных установок на дальность и точность попадания струей влияет воздействие ветра – его скорость и направление [4]. Эта проблема актуальна для защиты объ-

ектов нефтегазового комплекса [5], включая морские добывающие платформы [6], складов леса, а также памятников деревянного зодчества [7]. Требуется найти технические решения, обеспечивающие повышение эффективности работы РУП на открытых пространствах. Это можно обеспечить за счет корректировки баллистики струи за счет системы технического зрения, определяющей координаты очага возгорания и точность попадания струи.

Технически проработаны варианты реализации системы технического зрения:

- на базе канала в видимом диапазоне;
- на базе канала в инфракрасном диапазоне;
- комбинированный канал.

Инфракрасный канал имеет преимущество: работоспособность в условиях задымленности и низкого уровня освещения, а видеоканал имеет более высокую разрешающую способность при доступной цене, что позволяет значительно повысить точность наведения, применяя относительно недорогие технические средства. При этом было учтено, что для четкой идентификации очага горения в условиях наведенных тепловых помех использовалась система с коротковолновым ИК-излучением.

При использовании системы технического зрения с применением видеоканала обработка изображения обычно делится на два этапа: бинаризация и классификация. В процессе бинаризации из изображения выделяют интересующие области с помощью различных фильтров. На этапе классификации каждую найденную область идентифицируют по определённым признакам.

Известны следующие основные подходы в первоначальной обработке изображений:

- выделение контура – разность гауссианов, особые точки первой и второй производной по изображению (нули лапласиана), оператор Кэнни, оператор Собеля и др.;
- разность между видеокадрами – дифференциальные методы, оптический поток и др.

Основные алгоритмы классификации:

- поиск геометрических фигур – преобразование Радона, преобразование Хафа и др.;
- кластерный анализ.

Практически все алгоритмы требуют наличия чёткой границы объекта для выделения объекта из фона. Чтобы производные дали корректный результат, изображение обрабатывается общим фильтром, убирающим шумы. Некоторые методы требуют знания формы искомого объекта (преобразование Хафа).

Например, в работе [8] используется преобразование Лапласса и оператор Собеля, что накладывает серьёзные ограничения на обработку изображения струи воды: рассматривается бинаризированное изображение только начала струи. Однако на начальном участке траектории струя представляет из себя компактный поток жидкости, и влияние ветровой нагрузки не столь значительно, что позволяет использовать аппарат расчета баллистики с учетом пространственных координат пожарного робота (ПР) и сферической координаты поворота соплового насадка. При этом распылённая часть струи не рассматривается, потому что алгоритмы выделения края (преобразование Лапласса и оператор Собеля) не работают там, где нет чёткого края.

В работе [9] применяется более интегрированный подход: помимо оптической видеокамеры используется 3D-лазерный сенсор (лидар) и тепловизор для определения координат водопенного огнетушащего состава. В результате работы комплекса получается трёхмерная многокомпонентная (координаты, цвет, температура) карта местности, на которой отдельно высвечиваются робот, струя, цель и препятствия. По трёхмерной карте с траекторией струи рассчитываются все корректировки лафетного ствола. В данном случае рассматривается только струя водопенного огнетушащего состава, которая на фотографиях летит до самого конца траектории хорошо сформированными хлопьями. Можно предположить, что при использовании в качестве огнетушащего вещества обычной воды лидар не даст результатов на распылённой части струи: рассеяние лазерного луча на взвеси даст пик с низкой добротностью на триангуляционной матрице лидара: значит, разность уровней модуляции не будет превосходить уро-

вень шума самой матрицы. Поэтому лидар, вероятно, выдаст в качестве расстояния для распылённой части бесконечность.

В нашем случае изначально предполагалось, что воздействие ветра будет происходить в основном на распылённую часть струи. Плавное изменение размера фронта границ струи требует применения фильтров с разными параметрами в каждой точке траектории струи. Рассмотрим интегральный сбор данных вдоль траектории струи и последующую фильтрацию для уточнения направления струи. В качестве фильтра используются среднее арифметическое, медиана и вейвлет–преобразование и оптический поток.

При использовании фильтров возникает сложность: чтобы вычислить параметры струи (в том числе и диаметр), необходимо отфильтровать сигнал, однако, чтобы отфильтровать сигнал, нужно знать точный диаметр струи (основной параметр фильтрации). Параметры траектории на старте задаются пространственными и сферическими координатами робота, учитывая вынос насадка относительно центра робота.

Для каждого узла траектории собираем фильтром сигнал на небольшом участке струи вдоль первоначального направления данного узла, причём окно фильтра расположено поперёк направления струи (рис. 1). Полученную кривую фильтруем и по результирующей огибающей находим экстремум функции. Фильтр используем отдельно для каждого компонента видеокадра (R, G, B, IR).

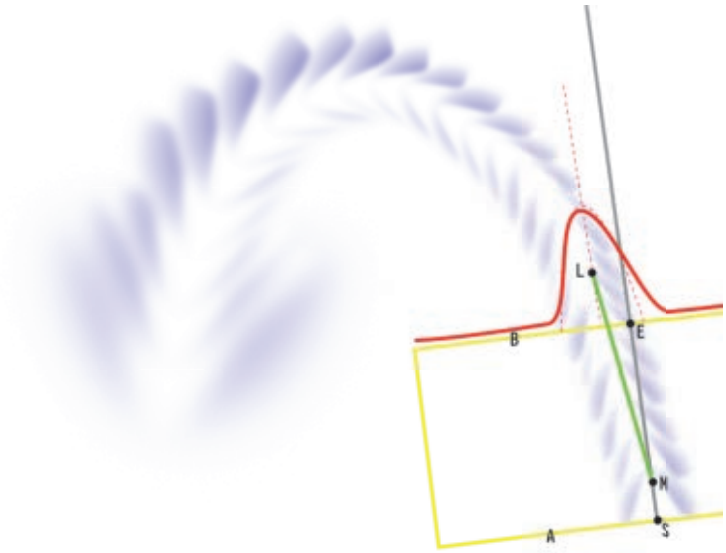


Рисунок 1 — Итерация поиска траектории: SE – первоначальное направление; прямоугольник AB – окно захвата фильтра; сплошная красная линия – результат фильтрации; пунктирные линии – поиск экстремума и его центра; SM – шаг итерации; ML – новое направление траектории

Корректируем направление движения нашего алгоритма, добавляем сдвиг для следующего узла траектории в соответствии со сдвигом экстремума. В случае сильного смещения уменьшаем шаг и повторяем предыдущую итерацию. В случае, если компоненты видеокадра указывают на различные направления, то траектория может начать ветвиться (траектория есть простая нейронная сеть). Каждому узлу траектории назначаем или корректируем вес. После расчёта всех узлов оптимизируем траекторию и диаметры узлов в зависимости от веса узлов.

«Программное обеспечение системы распознавания траектории струи», далее именуемое «трассер» (рис. 2), обеспечивает выполнение следующих функций:

– поиск траектории струи по изображению с видеокамеры, начиная с точки, соответствующей проекции робота на изображение;
– поиск точек пересечения струи и цели, а также пересечение других объектов (особые точки);
– поиск точек резкого изгиба струи (особые точки);
– передача данных на коммутатор: код робота, траектория струи, особые точки.

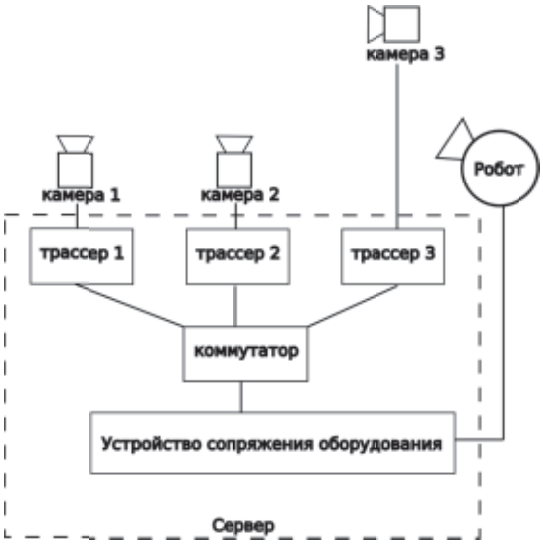


Рисунок 2 — Структурная схема роботизированной установки пожаротушения

«Программное обеспечение корректировки по траектории струи (узел системы видеонаблюдения)», далее именуемое «коммутатор» (рис. 1). Коммутатор используется для возможности соединения большого количества программ распознавания, которые физически могут выполняться на разных устройствах обработки видеоизображений:

– сообщить всем трассерам пространственные координаты их камер и тушащих пожарных стволов;
– получить от всех трассеров траектории (или их части);
– осуществить стереоотождествление (3D–восстановление) траектории и вычислить поправку в сферических координатах робота-тушителя;
– коммутатор передаёт данные в УСО для корректировки процесса тушения по полученным данным, уменьшая расстояние между траекторией струи и целью.

Координаты робота–тушителя, очага возгорания и видеокамер передаются в коммутатор, который, в свою очередь, передаёт их в трассер. Каждый трассер рассчитывает искажённые дисторсией проекции робота–тушителя и очага возгорания и строит траекторию струи по видеокадрам. После этого трассер удаляет дисторсионные искажения с проекций и передаёт ключевые точки (или всю траекторию) коммутатору. Коммутатор по полученным координатам рассчитывает координаты струи и, переведя их в сферические координаты из глаз робота–тушителя, производит корректировку.

Рассмотрим систему технического зрения с применением инфракрасного канала. Данное техническое решение описано патентом на изобретение [10].

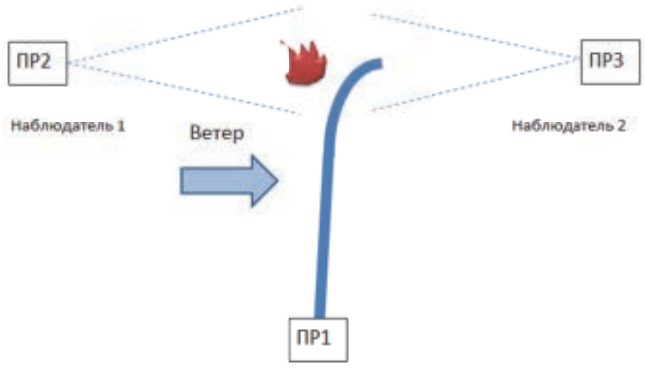


Рисунок 3 — Схема расположения ПР (пожарных роботов), вид сверху

На рисунке 3 показан простейший случай расположения пожарных роботов. Изображен очаг возгорания и струя. РУП определила координаты очага, начался процесс тушения, но из-за незначитель-

ной ветровой нагрузки произошло смещение контактного пятна относительно очага (рис. 4а). При этом ПР2 и ПР3 не подают огнетушащего вещества, но участвуют в коррекции тушения.

Путем перемещения струи в вертикальной плоскости (с помощью ПР1) добиваемся частичного либо полного перекрытия обзора для одного из наблюдателей (на рис. 3 очаг перекрыт струей для ПР3). Далее перемещаем струю влево, пока не произойдет перекрытие струей для ПР2. Затем снова перемещаем струю вправо, уровень излучения пламени оцениваем по ИК-каналу с помощью обоих наблюдателей (ПР2 и ПР3). Тем самым добиваемся совпадения величины сигналов на приемниках ПР2 и ПР3, что является искомой точкой наведения на очаг горения.

а) б)

Рисунок 4 — а) отклонение струи ветром; б) попадание струи после корректировки

Рисунок 5 — Полное и частичное перекрытие очага струей

Для уменьшения теплового воздействия очага на людей и окружающую среду в сфере пожаротушения применяются тепловые завесы. Подробно теоретическая часть описана в работе [11]. Лучистый тепловой поток при прохождении через водяную завесу ослабляется вследствие двух процессов – рассеивания и поглощения. В нашем случае струя (рис. 5) фактически выполняет функцию тепловой завесы для роботов–наблюдателей. Инфракрасные датчики за счет значительного изменения уровня сигнала фиксируют факт перекрытия струей для наблюдателя, корректирующего процесс наведения на очаг. Корректировка струи огнетушащего вещества относительно очага производится за счет программ управления, анализирующих полученную с нескольких роботов информацию об ИК-излучении пожара. На рисунке 4б продемонстрирован результат корректировки подачи струи, отклоненной ветром.

Рассмотрены два способа использования обратной связи при тушении очагов возгорания: по инфракрасному и видимому диапазону. Испытания на полигоне показали практическую эффективность обоих методов. Однако, каждый из этих способов обладает рядом недостатков.

Оптический метод: большая вычислительная нагрузка по обработке видеопотока, необходимо движение струи между кадрами или контрастность струи по сравнению с фоном.

Инфракрасный метод: высокая стоимость технических средств с требуемым разрешением.

Перечисленные недостатки могут быть компенсированы при комплексировании сигналов, поступающих в видимом и ИК-диапазонах и их соответствующей обработки, что позволит повысить эффективность пожаротушения за счет более быстрого и точного функционирования РУП, что особенно важно при ликвидации очага горения на его начальной стадии.

Применение предлагаемого комплексированного способа корректировки наведения пожарных роботов, входящих в состав роботизированной установки пожаротушения, основанного на использовании информации, получаемой от системы технического зрения в видимом и инфракрасном диапазоне, позволяет существенно повысить быстродействие и точность попадания струи огнетушащего вещества в очаг возгорания в условиях воздействия ветровых нагрузок на всей траектории движения струи огнетушащего состава, а также с учетом погрешности определения координат очага, погрешности баллистических расчётов, погрешности наведения.

Литература

1. СП 485.1311500.2020 Системы противопожарной защиты. Установки пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования: приказ МЧС России от 31.08.2020 № 628. Введ.01.03.2021.

2. ГОСТ Р 53326-2009 Техника пожарная. Установки пожаротушения роботизированные. Общие технические требования. Методы испытаний (Переиздание).

3. Горбань Ю.И. Пожарные роботы и ствольная техника в пожарной автоматике и пожарной охране. — М.: Пожнаука. – 2013. – С.352.

4. Горбань. Ю. И. Роботизированные установки пожаротушения для наружного пожаротушения. Перспективные направления развития / Ю. И. Горбань, С. Г. Немчинов // Актуальные проблемы пожарной безопасности : материалы XXXIII Международной научно-практической конференции, посвященной Году науки и технологий, Москва, 12–16 мая 2021 года. – Москва: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2021. – С. 769-776.

5. Немчинов С.Г., Цариченко С.Г. Автоматические и роботизированные системы пожаротушения как альтернатива оперативным подразделениям на автономных и малообслуживаемых объектах топливно-энергетического комплекса // Пожаровзрывобезопасность. – 2022. – Т. 31. – № 2. – С. 63-70. – DOI 10.22227/0869-7493.2022.31.02.63-70.

6. Горбань Ю.И. Роботизированные установки пожаротушения для защиты морских нефтегазодобывающих платформ / Ю. И. Горбань, М. Ю. Горбань, С. Г. Немчинов, С. Г. Цариченко // Сантехника. – 2021. – № 6. – С. 26-31.

7. Горбань, Ю. И. Обеспечение пожарной безопасности памятников деревянного зодчества / Ю. И. Горбань, С. Г. Немчинов // Сантехника. – 2020. – № 3. – С. 50-55.

8. Jinsong Zhu, Lu Pan, Ge Zhao. An Improved Near-Field Computer Vision for Jet Trajectory Falling Position Prediction of Intelligent Fire Robot // Sensors. 2020, 20, 7029. URL: https://www.mdpi.com/1424-8220/20/24/7029/htm (дата обращения: 08.08.2022)

9. Вазаев А.В. Комплексированная СТЗ в системе управления пожарного робота / Вазаев А.В., Носков В.П., Рубцов И.В., Цариченко С.Г. // Известия ЮФУ. Технические науки. 2017. С.121-132.

10. Патент № 2745641 C1 Российская Федерация, МПК A62C 35/00. Роботизированная установка пожаротушения с системой коррекции струи: № 2020116122: заявл. 29.04.2020: опубл. 29.03.2021 / Ю. И. Горбань, М. Ю. Горбань, Д. А. Штирц, С. Г. Немчинов; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "Инженерный центр пожарной робототехники «ЭФЭР».

11. Виноградов А.Г. Поглощение теплового излучения тепловыми завесами // Пожаровзрывобезопасность. 2012. № 7 (том 21). С. 73-82.

А.Н. Жирабок, А.В. Зуев, Ким Чхун Ир

ИНТЕРВАЛЬНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ПЕРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДА РОБОТА

Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток; Институт проблем морских технологий ДВО РАН, г. Владивосток, zhirabok@mail.ru, alvzuev@yandex.ru

Аннотация

Рассматривается задача построения интервальных наблюдателей для динамических систем с неопределенностями, описываемых линейными моделями. Приводятся соотношения, позволяющие построить интервальный наблюдатель минимальной сложности, который оценивает множество допустимых значений заданной линейной функции вектора состояния системы. Теоретические результаты иллюстрируются примером построения интервального наблюдателя для электропривода робота.

Ключевые слова

Динамические системы, оценивание, интервальные наблюдатели, электропривод.

A.N. Zhirabok, A.V. Zuev, Kim Chung Ir

INTERVAL ESTIMATION OF ELECTRIC ACTUATOR ROBOT VARIABLES

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia; Institute of Marine Technology Problems, Vladivostok, Russia, zhirabok@mail.ru, alvzuev@yandex.ru

Abstract

The problem of interval observer design for dynamic systems with uncertainties described by linear models is considered. The relations allowing construct interval observers of minimal dimension estimating a set of admissible values for prescribed linear function of the systems state vector are developed. Theoretical results are illustrated by the practical example of the interval observer design for electric actuator of robot.

Key words

Dynamic systems, estimation, interval observer, electric actuator.

Классическая задача интервального оценивания состоит в построении наблюдателя, формирующего оценку множества допустимых значений вектора состояния для динамических систем с неопределенностями. Обзор полученных результатов содержится в [1, 2], отдельные проблемы, в частности, применительно к различным практическим приложениям, рассмотрены в [3-7]. Решение этой задачи применительно к техническим системам, в частности, электроприводу роботов, важно в связи с тем, что интервальные наблюдатели позволяют сформировать пределы, в которых гарантированно находится вектора состояния при наличии в системе неопределенностей различного вида.

В отличие от [1-7], где интервально оценивается полный вектор состояния, в настоящей работе ставится и решается задача построения интервальных наблюдателей, позволяющих оценить множество допустимых значений заданной линейной функции вектора состояния системы с неопределенностями. Соответствующее решение может оказаться существенно проще, нежели в [1-7], а класс систем, для которых такой наблюдатель может быть построен, расширится.

Рассматриваемая система описывается уравнениями

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= (F + \Delta F(\mu(t))x(t) + Gu(t) + L\rho(t), \\ y(t) &= Hx(t) + v(t), \end{aligned} \qquad (1)$$

где $x(t) \in R^n$, $u(t) \in R^m$ и $y(t) \in R^l$ – векторы состояния, управления и выхода; F, G и H – постоянные матрицы размеров $n \times n$, $n \times m$ и $l \times n$ соответственно; L – известная матрица размера $n \times q$;

$\rho(t) \in R^q$ – неизвестная ограниченная функция времени, описывающая возмущения на систему, $\| \rho(t) \| \le \rho_*$; $v(t) \in R^l$ – неизвестная ограниченная функция времени, описывающая шумы измерений, $\| v(t) \| \le v_*$; матричная функция $\Delta F(\mu(t))$ описывает параметрические неопределенности, $\mu(t) \in \Pi \subset R^s$ – ограниченный вектор переменных параметров. По аналогии с [1] предполагается, что значения вектора $\mu(t)$ недоступны для измерений, множество допустимых значений Π известно, матричная функция $\Delta F(\mu)$ ограничена для всех $\mu \in \Pi$ и известных $\underline{\Delta F}$ и $\overline{\Delta F}$: $\underline{\Delta F} \le \Delta F(\mu) \le \overline{\Delta F}$. По аналогии с [1] для векторов $x^{(1)}, x^{(2)} \in R^k$ и $k \times k$-матриц $A^{(1)}, A^{(2)}$ отношения $x^{(1)} \le x^{(2)}$ и $A^{(1)} \le A^{(2)}$ понимаются поэлементно. Интервал $(\underline{\Delta F}, \overline{\Delta F})$ можно вычислить для заданного множества Π и известной $\Delta F(\mu)$ [1].

Требуется построить интервальный наблюдатель минимальной размерности, формирующий нижнюю $\underline{z}(t)$ и верхнюю $\overline{z}(t)$ границы заданной линейной функции вектора состояния $x(t)$, определяемой матрицей M в виде $z(t) = Mx(t)$, для которой справедливо неравенство $\underline{z}(t) \le z(t) \le \overline{z}(t)$ при всех $t \ge 0$.

В [8] задача построения интервального наблюдателя решалась в предположении, что параметрические неопределенности отсутствуют, в настоящей работе они учитываются. В [8] показано, что интервальный наблюдатель может быть построен на основе модели минимальной размерности двумя методами. В первом из них описывающие эту модель матрицы ищутся в идентификационной канонической форме, далее с помощью обратной связи обеспечивается устойчивость наблюдателя, который затем преобразуется к каноническому виду Жордана для обеспечения свойства метцлеровости матрицы, отражающей его динамику. Напомним [1], что матрица называется метцлеровой, если ее внедиагональные элементы неотрицательны. Во втором методе и в настоящей работе эта матрица сразу ищется в жордановой форме, что существенно упрощает задачу, поскольку устойчивость и метцлеровость теперь прямо следуют из формы Жордана.

Построение модели

Решение задачи основывается на модели минимальной размерности, не чувствительной к возмущению $\rho_*(t)$, оценивающей переменную $z(t)$ и дополнительную переменную $y_*(t)$:

$$\begin{aligned} &\dot{x}_*(t) = (F_* + \Delta F_*)x_*(t) + J_* Hx(t) + G_* u(t) + L_* \rho(t), \\ &z(t) = H_z x_*(t) + Qy(t), \qquad y_*(t) = H_* x_*(t), \end{aligned} \tag{2}$$

где $\Delta F_* = \Phi \Delta F(\mu) \Phi^{\mathrm{T}} (\Phi\Phi^{\mathrm{T}})^{-1}$, матрица Φ такая, что $x_*(t) = \Phi x(t)$, $y_*(t) = R_* y(t)$ для некоторой матрицы R_*. При $\Phi \ge 0$ условие $\underline{\Delta F} \le \Delta F(\mu) \le \overline{\Delta F}$ переходит в $\underline{\Delta F}_* \le \Delta F_* \le \overline{\Delta F_*}$, где $\underline{\Delta F}_* = \Phi \underline{\Delta F} \Phi^{\mathrm{T}} (\Phi\Phi^{\mathrm{T}})^{-1}$, $\overline{\Delta F_*} = \Phi \overline{\Delta F} \Phi^{\mathrm{T}} (\Phi\Phi^{\mathrm{T}})^{-1}$. Известно, что матрицы, описывающие модель, удовлетворяют следующим уравнениям [9]:

$$\Phi F = F_* \Phi + J_* H, \quad R_* \Phi = H_* \Phi, \quad G_* = \Phi G, \quad L_* = \Phi L. \tag{3}$$

Представим второе уравнение в (2) вместе с $z(t) = Mx(t)$ в виде

$$Mx(t) = H_z \Phi x(t) + QHx(t),$$

откуда следует

$$M = H_z \Phi + QH = (H_z \quad Q) \begin{pmatrix} \Phi \\ H \end{pmatrix}, \tag{4}$$

что эквивалентно равенству

$$\operatorname{rank} \begin{pmatrix} \Phi \\ H \end{pmatrix} = \operatorname{rank} \begin{pmatrix} \Phi \\ H \\ M \end{pmatrix}. \tag{5}$$

Матрица F_* в (2) ищется в жордановой форме:

$$F_* = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_k \end{pmatrix},$$

где собственные числа задаются разными и отрицательными. Тогда первое уравнение в (3) может быть представлено в виде k независимых уравнений:

$$\Phi_i F = \lambda_i \Phi_i + J_{*i} H, \qquad i = \overline{1,k}. \tag{6}$$

Дополнительное требование $\Phi L = 0$ – нечувствительность к возмущениям – учитывается следующим образом. Введем матрицу L_0 максимального ранга, такую, что $L_0 L = 0$, тогда $\Phi = NL_0$ для некоторой матрицы N. В результате уравнение (6) может быть записано в виде

$$(N_i \quad -J_{*i}) \begin{pmatrix} L_0(F - \lambda_i I_n) \\ H \end{pmatrix} = 0, \qquad i = \overline{1,k}, \tag{7}$$

где I_n – единичная матрица. Матрицы R_* и H_* определяются на основе второго уравнения в (3):

$$(R_* \quad -H_*) \begin{pmatrix} H \\ \Phi \end{pmatrix} = 0.$$

Задавая конкретные значения $\lambda_i < 0$, из уравнения (7) следует найти минимальное число строк $\Phi_i = N_i L_0$ матрицы Φ (а также строк J_{*i}), которые удовлетворяют условию (5), далее определить матрицы H_z и Q, а также G_*, R_* и H_*. В результате получаем модель минимальной размерности, не чувствительную к возмущению.

Построение интервального наблюдателя

Для построения наблюдателя модель (2) преобразуется к виду

$$\dot{x}_*(t) = (F_* - PH_* + \Delta F_*)x_*(t) + Py_* + J_* Hx(t) + G_* u(t) + L_* \rho(t).$$

Выбор матрицы P поясняется ниже. Наблюдатель строится на основе модели (2) и ищется в виде

$$\begin{aligned} &\dot{\underline{x}}_*(t) = (F_* - \underline{P}H_* + \underline{\Delta F}_*)\underline{x}_*(t) + \underline{P}y_* + J_* y(t) + G_* u(t) - |J_*|E_k v_*, \\ &\dot{\overline{x}}_*(t) = (F_* - \overline{P}H_* + \overline{\Delta F}_*)\overline{x}_*(t) + \overline{P}y_* + J_* y(t) + G_* u(t) + |J_*|E_k v_*, \\ &\underline{z}(t) = H_z \underline{x}_*(t) + Qy(t), \quad \overline{z}(t) = H_z \overline{x}_*(t) + Qy(t), \\ &\underline{x}_*(0) = \underline{x}_{*0}, \quad \overline{x}_*(0) = \overline{x}_{*0}. \end{aligned} \tag{8}$$

где E_k – $k \times 1$-матрица, составленная из единиц; матрица $|J_*|$ составляется из абсолютных значений соответствующих элементов матрицы J_*; по предположению $x_*(0) \in [\underline{x}_{*0}, \overline{x}_{*0}]$ для некоторых известных векторов $\underline{x}_{*0}, \overline{x}_{*0} \in R^k$ и $\underline{\Delta F}_* \le \Delta F_* \le \overline{\Delta F_*}$. Матрица $\underline{P}$ выбираются так, чтобы матрица $F_* - \underline{P}H_* + \underline{\Delta F}_*$ была устойчивой, а $F_* - \underline{P}H_*$ метцлеровой; аналогично для $\overline{P}$.

Для упрощения доказательства по аналогии с [5] рассмотрим случай, когда $H_z \ge 0$, $\underline{\Delta F}_* \ge 0$ и $x_*(t) \ge 0$ при всех $t \ge 0$. Кроме того, также для упрощения примем $v(t) = 0$; доказательство с $v(t) \ne 0$ может быть проведено по аналогии с [8].

По аналогии с [1] введем ошибки оценивания:

$$\begin{aligned} &\underline{e}_*(t) = x_*(t) - \underline{x}_*(t), \qquad \overline{e}_*(t) = \overline{x}_*(t) - x_*(t), \\ &\underline{e}_z(t) = z(t) - \underline{z}(t), \qquad \overline{e}_z(t) = \overline{z}(t) - z(t). \end{aligned} \tag{9}$$

С учетом (2) и (8) выражения для этих ошибок принимают следующий вид:

$$\begin{aligned}\dot{\underline{e}}_*(t) &= (F_* - \underline{P}H_*)\underline{e}_*(t) + \Delta F_* x_*(t) - \underline{\Delta F}_* \underline{x}_*(t),\\ \dot{\overline{e}}_*(t) &= (F_* - \overline{P}H_*)\overline{e}_*(t) + \overline{\Delta F}_* \overline{x}_*(t) - \Delta F_* x_*(t).\end{aligned} \tag{10}$$

Теорема. Пусть $H_z \geq 0$ и $\underline{x}_*(0) \leq x_*(0) \leq \overline{x}_*(0)$, тогда для интервального наблюдателя (8) выполняются соотношения

$$\underline{x}_*(t) \leq x_*(t) \leq \overline{x}_*(t), \qquad \underline{z}(t) \leq z(t) \leq \overline{z}(t). \tag{11}$$

Доказательство. Из $\underline{x}_*(0) \leq x_*(0) \leq \overline{x}_*(0)$ согласно (9) следует $\underline{e}_*(0) \geq 0$, $\overline{e}_*(0) \geq 0$. Так как $\Delta F_* \geq \underline{\Delta F}_*$ и $x_*(t) \geq 0$, то $(\Delta F_* - \underline{\Delta F}_*)x_*(t) \geq 0$ и $\Delta F_* x_*(t) \geq \underline{\Delta F}_* x_*(t)$. Отметим, что если $\underline{x}_*(t) \leq x_*(t)$, то $\underline{\Delta F}_*(x_*(t) - \underline{x}_*(t)) \geq 0$ и $\underline{\Delta F}_* x_*(t) \geq \underline{\Delta F}_* \underline{x}_*(t)$, поскольку $\underline{\Delta F}_* \geq 0$. Это с учетом предыдущего влечет $\Delta F_* x_*(t) - \underline{\Delta F}_* \underline{x}_*(t) \geq 0$. Так как матрица $F_* - \underline{P}H_*$ метцлерова и $\Delta F_* x_*(t) - \underline{\Delta F}_* \underline{x}_*(t) \geq 0$, система (10) называется монотонной, или неотрицательной, ее решения при $\underline{e}_*(0) \geq 0$ будут поэлементно неотрицательными, т.е. $\underline{e}_*(t) \geq 0$ для всех $t \geq 0$ [1]. По аналогии с [5], поскольку по условию $\underline{x}_*(0) \leq x_*(0)$, из сказанного выше можно по индукции утверждать, что неравенство $\underline{x}_*(t) \leq x_*(t)$ сохраняется и при всех $t \geq 0$. Неравенство $x_*(t) \leq \overline{x}_*(t)$ доказывается аналогично. Так как $z(t) = H_z x_*(t) + Qy(t)$, то из (9) и (11) имеем

$$\begin{aligned}\underline{e}_z(t) &= H_z x_*(t) - H_z \underline{x}_*(t) = H_z \underline{e}_*(t),\\ \overline{e}_z(t) &= H_z \overline{x}_*(t) - H_z x_*(t) = H_z \overline{e}_*(t),\end{aligned}$$

откуда с учетом неравенств $\underline{e}_*(t) \geq 0$, $\overline{e}_*(t) \geq 0$ и $H_z \geq 0$ получаем $\underline{e}_z(t) \geq 0$, $\overline{e}_z(t) \geq 0$, что эквивалентно неравенству $\underline{z}(t) \leq z(t) \leq \overline{z}(t)$. Теорема доказана.

Отметим, что в [5], где рассматривается аналогичная задача при оценке полного вектора состояния, на исходную систему накладываются более жесткие ограничения.

Робастное решение

Если условие (5) не выполняется при всех $k < n$, необходимо искать робастное решение, минимизирующее вклад возмущения в модель, который можно оценить нормой Фробениуса $\|\Phi L\|_F$ матрицы ΦL. В этом случае задача минимизации этого вклада сводится к минимизации нормы $\|\Phi L\|_F$ при выполнении условия (7), где принимается $L_0 = I_n$. Для решения задачи из уравнения (7) при $L_0 = I_n$ необходимо найти минимальное число строк Φ_i таких, чтобы удовлетворялось условие (5); подбирать их следует так, чтобы при наличии нескольких вариантов выбор делался исходя из минимума нормы $\|\Phi_i L\|_F$. Определением матриц $G_* = \Phi G$ и $L_* = \Phi L$ завершается синтез модели (2), минимально чувствительной к возмущениям.

Из-за появления слагаемого $L_*\rho(t)$ в модели (2) динамика интервального наблюдателя при $v \neq 0$ и $\Delta F_* \neq 0$ корректируется следующим образом:

$$\begin{aligned}\dot{\underline{x}}_*(t) &= (F_* - \underline{P}H_* + \underline{\Delta F}_*)\underline{x}_*(t) + \underline{P}y_* + J_* y(t) + G_* u(t) - |J_*|E_k v_* - |L_*|E_k \rho_*,\\ \dot{\overline{x}}_*(t) &= (F_* - \overline{P}H_* + \overline{\Delta F}_*)\overline{x}_*(t) + \overline{P}y_* + J_* y(t) + G_* u(t) + |J_*|E_k v_* + |L_*|E_k \rho_*,\end{aligned}$$

Выражения (9) для ошибок оценивания также корректируются:

$$\begin{aligned}\dot{\underline{e}}_*(t) &= (F_* - \underline{P}H_*)\underline{e}_*(t) + \Delta F_* x_*(t) - \underline{\Delta F}_* \underline{x}_*(t) - J_* v(t) + |J_*|E_k v_* + L_*\rho(t) + |L_*|E_k \rho_*,\\ \dot{\overline{e}}_*(t) &= (F_* - \overline{P}H_*)\overline{e}_*(t) + \overline{\Delta F}_* \overline{x}_*(t) - \Delta F_* x_*(t) + J_* v(t) + |J_*|E_k v_* - L_*\rho(t) + |L_*|E_k \rho_*.\end{aligned}$$

Нетрудно видеть, что искомый результат следует из доказательства теоремы и очевидных дополнительных неравенств $|J_*|E_k v_* \pm J_* v(t) \geq 0$ и $|L_*|E_k \rho_* \pm L_*\rho(t) \geq 0$.

Пример

Рассмотрим модель электропривода:

$$\begin{aligned}
&\dot{x}_1(t) = k_1 x_2(t),\\
&\dot{x}_2(t) = k_2 x_2(t) + k_3 x_3(t) + \rho(t),\\
&\dot{x}_3(t) = k_4 x_2(t) + k_5 x_3(t) + k_6 u(t) + \Delta(t),\\
&y_1(t) = x_1(t) + v_1(t), \quad y_2(t) = x_3(t) + v_2(t),
\end{aligned} \tag{12}$$

где коэффициенты $k_1 \div k_6$ представляют параметры электропривода; возмущение $\rho(t)$ обусловлено наличием внешнего нагрузочного момента, приведенного к валу двигателя; неопределенность $\Delta(t)$ вызвана изменением активного сопротивления цепи якоря электродвигателя из-за его нагрева. Предполагая, что измеряемыми являются переменные x_1 и x_3, рассматриваемую модель опишем матрицами:

$$F = \begin{pmatrix} 0 & k_1 & 0 \\ 0 & k_2 & k_3 \\ 0 & k_4 & k_5 \end{pmatrix}, \quad G = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ k_6 \end{pmatrix}, \quad H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad L = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \Delta F(t) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta(t) \end{pmatrix}.$$

Постоим интервальный наблюдатель, оценивающий переменную $x_2(t)$, приняв $M = (0 \quad 1 \quad 0)$. Поскольку возмущение входит в уравнение для этой переменной, модель будет чувствительна к нему, и в (2.2) следует принять $L^{(k)} = 0$; при $k = 1$ оно принимает вид

$$(\Phi \quad -J_*) \begin{pmatrix} -\lambda & k_1 & 0 \\ 0 & k_2 - \lambda & k_3 \\ 0 & k_4 & k_5 - \lambda \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = 0.$$

Поскольку для электропривода $k_2 < 0$, примем $\lambda = k_2$. Это дает $\Phi = (0 \quad 1 \quad 0)$ и $J_* = (0 \quad k_3)$, откуда $G_* = 0$, $L_* = 1$. Нетрудно проверить, что условие (5) выполняется и $H_z = 1$, $Q = 0$; поскольку $\Delta F_* = 0$, можно принять $\underline{P} = \overline{P} = 0$. Очевидно, что $\Phi \geq 0$ и $H_z \geq 0$. Искомая модель имеет вид

$$\begin{aligned}
&\dot{x}_*(t) = k_2 x_*(t) + k_3 H_2 x(t) + \rho(t),\\
&z(t) = x_*(t).
\end{aligned}$$

На основе этой модели строится интервальный наблюдатель, оценивающий переменную $z(t) = x_2(t)$:

$$\begin{aligned}
&\dot{\underline{x}}_*(t) = k_2 \underline{x}_*(t) + k_3 y_2(t) - k_3 v_{*2} - \rho_*,\\
&\dot{\overline{x}}_*(t) = k_2 \overline{x}_*(t) + k_3 y_2(t) + k_3 v_{*2} + \rho_*,\\
&\underline{z}(t) = \underline{x}_*(t),\\
&\overline{z}(t) = \overline{x}_*(t).
\end{aligned} \tag{13}$$

Сравнивая приведенную оценку с аналогичной, которая получается на основе [1-7], можно сделать вывод о том, что предложенный подход дает более простой наблюдатель и интервал меньших размеров, поскольку, в частности, он не содержит параметрической неопределенности.

Для моделирования рассмотрим систему (12) и наблюдатель (13) с $u(t) = \sin(t)$; шумы $v_1(t)$, $v_2(t)$ и $\rho(t)$ представляют собой случайные процессы с дисперсией, равной 0,5. Для простоты примем $k_1 = k_2 = k_6 = 1$, $k_3 = k_4 = k_5 = -1$. Результаты моделирования приведены на рисунке, где для $v_{1*} = v_{2*} = \rho_* = 0,02$ показано поведение переменной $x_2(t)$ и ее нижней и верхней оценок $\underline{z}(t)$ и $\overline{z}(t)$ для начальных условий $x_*(0) = 0$, $\underline{x}_*(0) = -2$, $\overline{x}_*(0) = 2$.

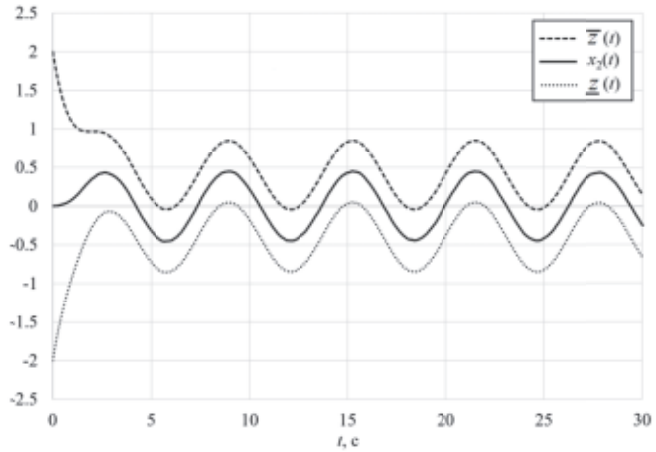


Рисунок 1 — Поведение переменной $x_2(t)$ и ее нижней и верхней оценок $\underline{z}(t)$ и $\overline{z}(t)$

Рассмотрена задача построения интервальных наблюдателей в системах, описываемых линейными моделями, которые позволяют оценивать множество допустимых значений заданной линейной функции вектора состояния системы при наличии внешних возмущений, шумов измерений и параметрических неопределенностей. Предложен метод построения интервальных наблюдателей на основе жордановой канонической формы, которая позволила существенно упросить решение задачи.

Работа поддержана Российским научным фондом (проект № 22-29-01303).

Литература

1. Ефимов Д.В. Построение интервальных наблюдателей для динамических систем с неопределенностями // Автоматика и телемеханика. 2016. № 2. С. 5-49.

2. Khan A., Xie W, Zhang L., Liu L. Design and applications of interval observers for uncertain dynamical systems // IET Circuits Devices Syst. 2020. V. 14. P. 721-740.

3. Kolesov N., Gruzlikov A., Lukoyanov E. Using fuzzy interacting observers for fault diagnosis in systems with parametric uncertainty // Proc. XII-th Inter. Sympos. «Intelligent Systems», INTELS'16.Moscow, Russia, 2016. P. 499-504.

4. Кремлев А.С., Чеботарев С.Г. Синтез интервального наблюдателя для линейной системы с переменными параметрами // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56. №. 4. С. 42-46.

5. Chebotarev S., Efimov D., Raissi T., Zolghadri A. interval observers for continuous-time LPV systems with L1/L2 performance // Automatica. 2015. V. 51. P. 82-89.

6. Mazenc F., Bernard O. Asymptotically stable interval observers for planar systems with complex poles // IEEE Trans. Automatic Control. 2010. V. 55. №. 2. P. 523-527.

7. Blesa J., Puig V., Bolea Y. Fault detection using interval LPV models in an open-flow canal // Control Engineering Practice. 2010. V. 18. P. 460-470.

8. Жирабок А.Н., Зуев А.В., Ким Чхун Ир Метод построения интервальных наблюдателей для стационарных линейных систем // Известия РАН. Теория и системы управления. 2022. № 4 С. 22-32.

9. Жирабок А.Н., Зуев А.В., Шумский А.Е. Диагностирование линейных динамических систем: подход на основе скользящих наблюдателей // Автоматика и телемеханика. 2020. № 2. С. 18–35.

А.И. Горох

ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ОБЛИК РОБОТИЗИРОВАННОГО ПОДВИЖНОГО МИШЕННОГО КОМПЛЕКСА

Государственный летно-испытательный центр им. В.П. Чкалова Минобороны России, г. Ахтубинск, artur.gorokh@mail.ru; Московский авиационный институт, Москва

Аннотация

Практика применения управляемого авиационного вооружения в конфликтах и контртеррористических операциях свидетельствует о росте значения высокоточного управляемого авиационного оружия при поражении маневренных подвижных одиночных и групповых целей.

Для подготовки летных экипажей в применении авиационных средств поражения по подвижным целям, а также для испытания новых (модернизированных) образцов вооружения необходимо создание подвижной мишенной обстановки, максимально полно имитирующей характеристики реальных целей потенциального противника.

Так же описанный мишенный комплекс может быть востребован для боевой подготовки операторов ПТУР и экипажей танков (боевых машин).

Ключевые слова

Роботизированный подвижный мишенный комплекс, буксируемая мишень, роботизированный серийный автомобиль, модульная мишень, испытания авиационных средств поражения.

A.I. Gorokh

PERSPECTIVE IMAGE OF A ROBOTIZED MOBILE TARGET COMPLEX

State Flight Test Center V.P. Chkalova Ministry of Defense of Russia, city of Akhtubinsk, Russia, artur.gorokh@mail.ru; Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

Abstract

The practice of using guided aircraft weapons in conflicts and counter-terrorist operations indicates the growing importance of high-precision guided aircraft weapons in defeating maneuverable mobile single and group targets.

To train flight crews in the use of aviation weapons against mobile targets, as well as to test new (modernized) types of weapons, it is necessary to create a mobile target environment that imitates the characteristics of real targets of a potential enemy as fully as possible.

Also, the described target complex can be in demand for combat training of ATGM operators and crews of tanks (combat vehicles).

Key words

Robotic mobile target complex, towed target, robotic serial vehicle, modular target, testing of aircraft weapons.

Роботизированный подвижный мишенный комплекс должен включать в себя (рис. 1):

- мишени (буксируемые, роботизированные серийные автомобили, модульные низкобюджетные);
- специально подготовленную грунтовую трассу;
- комплекс управления;
- комплекс визуализации, оценки результатов применения средств поражения и документирования.

Подробнее рассмотрим каждый компонент.

Буксируемая мишень

Очевидно, если речь идет о массовом применении авиационных средств поражения (далее - АСП) необходимо стремиться к максимальному удешевлению мишеней при сохранении возможностей правдоподобной имитации сигнатур реальных целей. Использование бронированных мишеней накладывает на их использование такие ограничения, как низкая маневренность, малая скорость, большая масса, полное отсутствие или ограниченная возможность изменения визуального силуэта мишени, имитирующей технику потенциального противника.

Одним из вариантов в этом случае будет применение многоразового дистанционно управляемого буксировщика мишени, буксирующего легкую и дешевую мишенную конструкцию на минимально безопасном расстоянии, ограничиваемом длиной буксировочной сцепки.

Рисунок 1 — Буксируемая мишень

Основные требования к дистанционно управляемому буксировщику:

- достаточная мощность для буксировки различных по массе и габаритам мишеней;
- повышенная проходимость (в случае колесного исполнения);
- защищенность наиболее важных и дорогостоящих узлов;
- возможность управления водителем для транспортировки на полигон.

В качестве дистанционно управляемых буксировщиков мишеней могут выступать специально разработанные или серийно выпускаемые транспортные средства, оснащенные специальной аппаратурой. По этому пути пошли американские разработчики подвижных мишеней из фирмы «Kairos Autonomi». Они производят программно-аппаратный комплекс (рис. 2), позволяющий за непродолжительное время подготовить обычное серийное транспортное средство для дистанционного управления.

Комплект управления

Коммутационный модуль

Станция управления

Рисунок 2 — Комплект аппаратуры фирмы «Kairos autonomi»

С помощью такого комплекса можно роботизировать различные транспортные средства (легковые, грузовые автомобили). Через систему тросов и сервоприводов имитируется воздействие человека на органы управления транспортным средством, в том числе и на механическую коробку передач. Поскольку органы управления мало отличаются друг от друга в различных видах и марках транспорта, то возможности адаптации транспортных средств для дистанционного управления могут быть очень широкими.

На рисунке 3 показан специально подготовленный буксировщик с выносными видеокамерами и в матовом окрасе, поглощающем лазерное излучение.

Рисунок 3 — Буксировщик

Роботизированные серийные автомобили-мишени (рис.4)

С помощью вышеописанного комплекса можно подготовить серийные автомобили (списанные отечественные (импортные) или технику потенциального противника) и использовать в качестве мишени для оценки поражающего действия АСП на конкретные образцы.

Рисунок 4 — Вариант роботизированного автомобиля

Требования, предъявляемые к роботизированному серийному автомобилю почти те же, что и к буксировщику, за исключения пунктов, касающихся буксируемой мишени.

Помимо рассмотренного варианта применения для испытаний АСП, наличие такого комплекса в войсках позволит адаптировать любую имеющуюся технику, способную заводиться и перемещаться (в том числе, устаревшую, снятую с консервации, отмобилизованную и т.д.) для решения серьезных боевых задач: прорыва инженерных заграждений, разминирования минных полей, имитации атаки и выявления огневых точек противника, в качестве мощных самоходных фугасов и т.д.

Модульная низкобюджетная мишень (рис.5)

Низкобюджетная мишень для боевой подготовки экипажей и испытаний высокоточных управляемых авиационных средств поражения должна иметь удовлетворительное соответствие сигнатурам реальных целей: скорость перемещения, приблизительные габаритные размеры, а также характеристики в ИК-диапазоне, ЭПР и т.д.

Основные требования:

– высокий уровень правдоподобия по основным характеристикам (скоростным, маневренным, визуальным, теплоконтрастным, радиоотражающим и т.д.);

– скорость до 100 км/ч;

– модульность, позволяющая до выезда на полигон изменять форму мишени и создавать различные типы реальных целей;

– возможность имитировать характеристики как по отдельности, так и в комплексе;

– дешевизна комплектующих;

– минимальная квалификация и количество персонала при сборке;

– воспроизведение основных ТТХ различных мишеней – джипы, ЗРК, танки, грузовики, БТР и т.д. из одних и тех же комплектующих;

– прочность, позволяющая сохранить мишень при движении на высокой скорости по пересеченной местности до конца летного эксперимента;

– возможность самоходного или буксируемого варианта.

На рисунке 5 показана визуальная каркасная мишень, выполненная из полипропиленовых труб и маскировочной сети. Полая внутри конструкция позволяет размещать уголковые отражатели и электрические термоэлементы (рис.6), позволяющие имитировать необходимые зоны нагрева и характеристики контрастности в различных диапазонах длин волн.

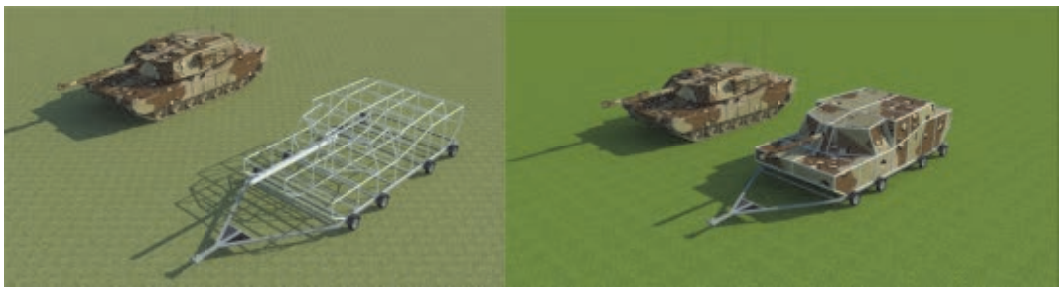


Рисунок 5 — Каркас модульной мишени из пропиленовых труб, смонтированный на транспортировочной тележке

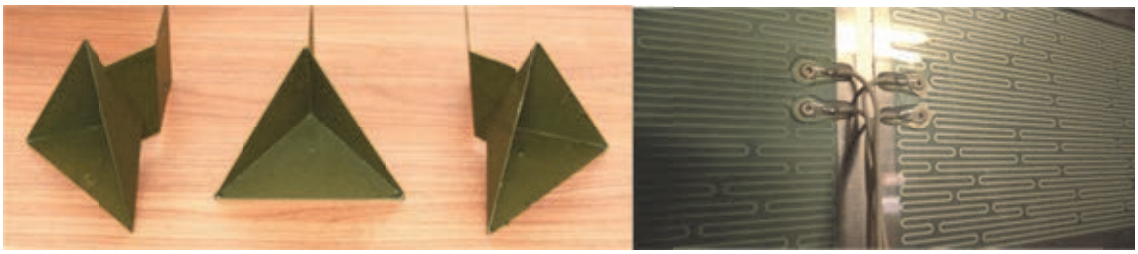


Рисунок 6 — Уголковые отражатели и электрический термонагревательный элемент

Использование современных полимерных материалов при создании модульных мишеней позволяет реализовать принцип конструктора «LEGO», когда из однотипных элементов можно выполнить различные по форме объемные конструкции, имитирующие различные транспортные средства.

На рисунке 7 показана мишень их полимерных модульных элементов в теплоконтрастном режиме.

Такие полимерные материалы, как основа создания мишенной обстановки, имеют существенные преимущества:

– простота и быстрота создания объемных мишеней различных форм и высокой степени правдоподобия;

– возможность создания локальных теплоконтрастных областей в объемных мишенях при наполнении водой отдельных модулей и ее подогреве (электронагревателями или с помощью экзотермических реакций);

– малая масса, высокая транспортабельность и компактность;

– стойкость к внешним климатическим условиям и переносимость ударных нагрузок;

– возможность размещения в полой мишени приемника командной радиолинии, средств бортовых

измерений, видеокамер, генераторов, спутниковой навигационной системы, телеметрии, системы автономного управления.

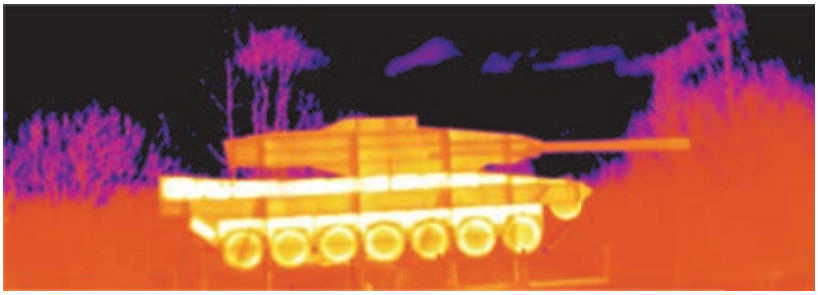


Рисунок 7 — Теплоконтрастная модульная мишень

Подготовленная грунтовая трасса для применения подвижных мишеней

Сухопутные подвижные мишени целесообразно использовать только на заранее подготовленных для них трассах.

Поскольку размеры полигонов ограничены, а требования к скорости подвижных мишеней довольно высоки (до 100 км/ч), то для выполнения следует рассматривать в первую очередь замкнутые, кольцевые или близкие к ним по форме трассы, на которых мишень не будет значительно терять скорость на разворотах.

Для того чтобы максимально использовать возможности трассы, необходимо при проектировании учитывать направление боевого курса и основные варианты применения АСП по подвижной мишени – навстречу (вдогон) или перпендикулярно курсу. При организации трассы прямоугольной (квадратной) формы возможно применение АСП по мишени во всех перечисленных вариантах (рис. 8).

Рисунок 8 — Трек для применения АСП по роботизированной мишени

Если учитывать, что на большей части территории России период распутицы занимает не так уж много времени - 3-5 месяцев в году, можно не планировать на это время применение АСП по подвижным целям, в таком случае целесообразнее организовывать грунтовые трассы, которые намного дешевле в эксплуатации и в ремонте асфальтированных трасс.

Преимущества:

– при наличии большого ровного участка на полигоне и достаточного количества инженерной техники, создать грунтовый трек можно на большинстве полигонов без привлечения сторонних организаций;
– простота ремонта при повреждении;
– минимизация расстояния при эвакуации поврежденной мишени на ремонт.

Комплекс управления

Основные требования к комплексу управления:

– устойчивая связь с объектом управления на определенной дальности (определяется расстоянием от пункта управления до мишенной трассы, как правило, от 3 до 10 км);

– прием телеметрической информации о состоянии объекта управления (координаты с привязкой к карте местности, прямая трансляция изображения с установленных видеокамер, скорость, обороты двигателя, остаток топлива, температура охлаждающей жидкости, данные от других измерительных датчиков);

– возможность управления объектом и целевой нагрузкой (радиолокационные имитаторы, нагрев) с пульта дистанционного управления, а также автоматическое движение по заданному маршруту;

– возможность аварийной остановки объекта управления;

– возможность дистанционного изменения сигнатуры объекта;

– имитация работы подвижных ЗРК и т.д.

– при потере связи объект управления должен самостоятельно останавливаться и включать аварийно-поисковый маяк или двигаться по заранее проложенному маршруту по координатам спутниковой навигационной системы (далее - СНС).

Комплекс управления должен делиться на две части и устанавливаться на борту мишени и на наземном пункте управления (далее - НПУ).

Комплекс управления на борту мишени:

– антенная система и СНС;

– аппаратура аварийной дистанционной остановки объекта управления;

– система тросов и сервоприводов;

– коммутационный и вычислительный модуль;

– видеокамеры.

Комплекс управления на НПУ:

– автоматизированное рабочее место оператора (операторов) управления;

– специальное программное обеспечение для управления объектом, планирования задач и маршрутов применения и моделирования характеристик мишени;

– антенная система;

– автономные источники питания.

Комплекс визуализации, оценки результатов применения средств поражения и документирования

Целесообразно использовать имеющиеся на вооружении МО РФ комплексы с БЛА для контроля общей мишенной обстановки и выполнения требований безопасности на полигоне. По нашим оценкам, необходимо применять БЛА с большой продолжительностью полетного времени и современной целевой нагрузкой (средства наблюдения в оптическом и ИК-диапазоне), например, «Орлан-10».

Для создания подвижной мишенной обстановки целесообразно определить оптимальную номенклатуру типов роботизированных мишеней, которые должны отвечает современным требованиям при проведении испытаний АСП и боевой подготовки, а также будет экономически эффективны. Поэтому необходимо в кратчайшие сроки провести прикладные научные исследования в целях формирования перспективного облика и разработки ТТЗ на создание указанного комплекса. Применение подобной системы позволит сократить сроки испытаний АСП, повысить уровень и качество боевой подготовки в войсках.

Результаты были получены в рамках выполнения предпроектных исследований.

Литература

1. Kairos Autonomi, Installation Questionnaire Pronto4, bulletin BUL-059.
2. Kairos Autonomi, Pronto4 Hardware Varieties, 2007г.

И.А. Зенков, Т.В. Меньшакова

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОН НАЗЕМНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПУСКАХ УПРАВЛЯЕМЫХ РАКЕТ ПО ДВИЖУЩИМСЯ РОБОТИЗИРОВАННЫМ АВТОМОБИЛЯМ-МИШЕНЯМ

Государственный летно-испытательный центр им. В.П. Чкалова Минобороны России, г. Ахтубинск, a.zenkov2012@yandex.ru, tttvvvmmm1234@mail.ru

Аннотация

В статье рассмотрены вопросы применения математических моделей при расчете зон наземной безопасности применения авиационных средств по высокоскоростным роботизированным автомобилям-мишеням.

Ключевые слова

Зона наземной безопасности, объект опасности, вероятность отрицательного исхода.

I.A. Zenkov, T.V. Menshakova

DETERMINATION OF GROUND SAFETY ZONES DURING GUIDED MISSILE LAUNCHES ON MOVING ROBOTIC TARGET VEHICLES

State Flight Test Center V.P. Chkalova Ministry of Defense of Russia, Akhtubinsk, Russia, a.zenkov2012@yandex.ru, tttvvvmmm1234@mail.ru

Abstract

The article deals with the application of mathematical models in the calculation of ground safety zones for the use of aviation equipment for high-speed robotic target vehicles.

Key words

Ground safety zone, danger object, probability of a negative outcome.

При лётных испытаниях современных боевых авиационных комплексов, связанных с применением авиационных средств поражения (далее – АСП) по подвижным наземным мишеням, на первый план выдвигается проблема обеспечения безопасности объектов, расположенных вне полигонной инфраструктуры: населенных пунктов, коммуникаций, сооружений и других наземных объектов безопасности, которые должны быть защищены от поражения осколками исправных или аварийных АСП. Появившиеся в последнее время высокоточные управляемые АСП применяются с самолета-носителя на удалении 200-300 км до цели, при этом самолет-носитель не входит в зону действия ПВО противника. Такая тактика формирует комплекс специфических задач, связанных с летными испытаниями АСП, и в первую очередь – с обеспечением наземной безопасности.

Планирующие управляемые АСП по сравнению с ракетами класса ВП являются наиболее эффективными и перспективными, так как отсутствие дорогостоящего ракетного двигателя и его топлива позволяет более чем в два раза увеличить массу боевой части при той же дальности и точности боевого применения.

Кроме того, сами дистанционно-управляемые автомобили-мишени являются потенциально опасными для людей, населенных пунктов, объектов инфраструктуры, поскольку обладают высокой скоростью, большой массой и значительной инерцией, а видеопоток от их видеокамер весьма ограниченный.

Несоблюдение норм безопасности приводит к необратимым катастрофическим последствиям. Директивный уровень безопасности поражения объектов населенных пунктов и наземной инфраструктуры задан предельной вероятностью 10^{-5}.

Основными факторами, определяющими размеры зоны наземной опасности (далее – ЗНО) для

АСП, являются: фактические тактико-технические характеристики АСП, результаты расчетов границ зоны наземной опасности, выполняемые как на этапе подготовки, так и непрерывно в ходе летного эксперимента; нормативно заданные методы и методики проведения летных экспериментов (далее – ЛЭ) при испытаниях АСП и реальные условия их боевого применения с учетом внешних воздействующих факторов; наличие и исправность бортового измерительного оборудования, системы измерений и системы ликвидации АСП; время принятия решения оперативным руководителем ЛЭ на ликвидацию АСП.

Для автомобиля-мишени, заправленного топливом, имеющего высокую скорость и инерцию, основными факторами при определении зоны наземной опасности являются: фактические характеристики автомобиля-мишени, трек его движения, применяемые системы бортовых, внешнетраекторных или радиотелеметрических измерений, исправность и надежность бортового оборудования.

Рассмотренные факторы реализуются в полном объеме при расчете ЗНО на этапе планирования ЛЭ и корректируются в ходе боевого применения АСП на основе данных, поступающих от радиотелеметрических средств измерений АСП и автомобиля-мишени, а так же от средств внешнетраекторных измерений.

Функционирование исправного АСП с боевой частью приводит к необратимому поражению подвижной наземной мишени.

ЗНО обычно имеет радиус 5 СКО плюс радиус разлета осколков. Вероятность отрицательного исхода на границе ЗНО составляет 10^{-5}.

Функционирование неисправного АСП приводит к формированию зоны возможного падения, определяемой кинематическими и аэродинамическими характеристиками АСП. В ходе ЛЭ эта зона уточняется, исходя из фактического положения АСП.

В случае наличия элементов, отделяемых от исправных АСП (стопорные кольца, элементы контейнера и т.д.), рассчитывается зона их вероятного падения.

До начала ЛЭ рассчитываются границы коридора безопасности, выход за которые приводит к принудительной либо автоматической ликвидации АСП.

Для автомобиля-мишени до начала летного эксперимента формируется трек его движения с учетом возможной скорости в соответствии с данными о рельефе, исходя из информации цифровой карты местности. При исправных бортовом оборудовании и системе измерений в ходе летного эксперимента траектория движения автомобиля-мишени не выходит за границы полигона. В случае отказов бортового оборудования или средств измерений, определяющих положение автомобиля-мишени, он становится объектом опасности с радиусом зоны наземной опасности, равной области достижимости его координат.

При расчете непосредственной опасности главным критерием безопасного проведения ЛЭ является вероятность отрицательного исхода, которая должна быть меньше, чем 10^{-5}. Эта вероятность складывается из условных вероятностей, определяемых неисправностями бортового оборудования и системы измерений АСП и автомобиля-мишени, а также системы ликвидации АСП. На рисунке 1 показан алгоритм расчета полной группы событий, позволяющий определить вероятность отрицательного и положительного исходов.

Для расчета вероятностей построена математическая модель в виде древа вероятностей, учитывающая все возможные группы событий.

Следующими значимыми критериями, определяющими непосредственную опасность, являются:

- среднее время наработки системы управления летным экспериментом на один отказ;
- вероятность отрицательного исхода для наземного объекта безопасности (по контуру);
- вероятность падения АСП или его фрагментов на заданную площадь полигона;
- вероятность нанесения самим автомобилем-мишенью какого-либо ущерба.

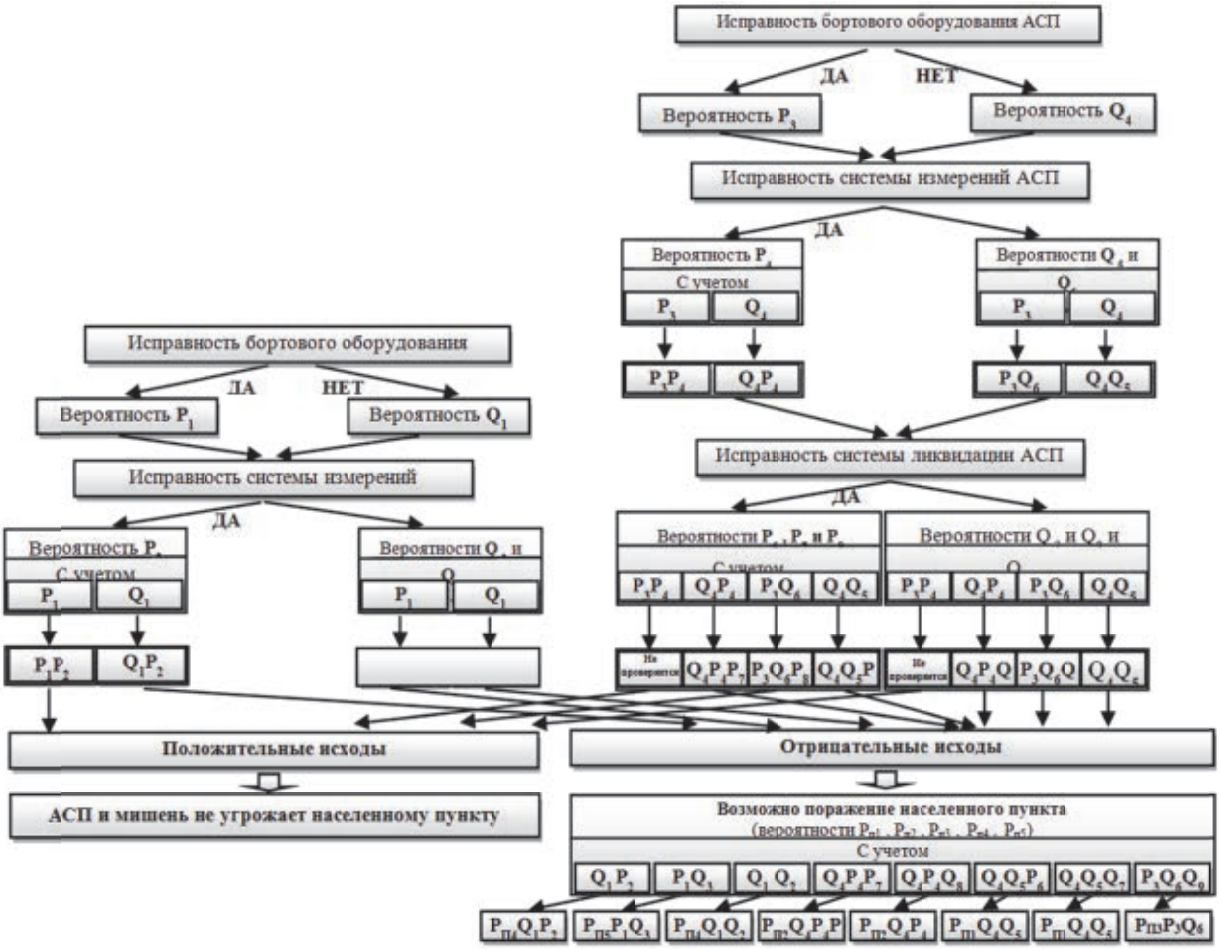


Рисунок 1 — Математическая модель определения полной группы возможных событий

В общем случае должен рассматриваться вариант несимметричной плотности распределения координат точек применения АСП по подвижной мишени. На рисунке 2 показан вариант определения предельной зоны наземной опасности: Расчёт уточненной зоны применения АСП исходя из априорной информации о ТТХ АСП и автомобиля-мишени в заданных условиях выполнения ЛЭ позволяет во много раз уменьшить зону наземной опасности.

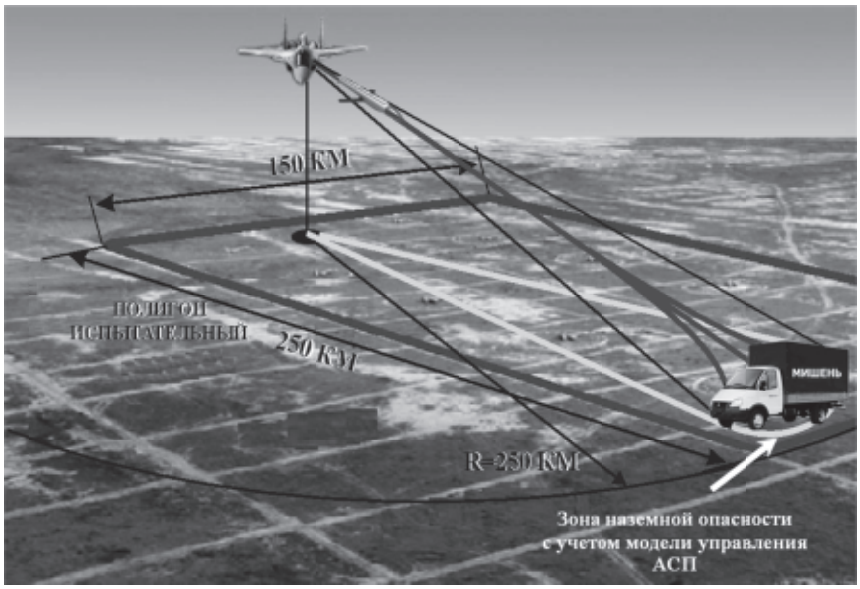


Рисунок 2 — Расчетная зона наземной опасности

Для определения зоны наземной опасности были взаимоувязаны различные математические модели и смоделирован эксперимент по определению границ зон наземной опасности (зоны непосредственной опасности, зоны падения элементов исправных АСП, зоны падения неисправных АСП, зоны достижимости аварийной подвижной мишени).

Априорно известная информация о координатах зоны разрешенного пуска, предполагаемых координатах цели, возможных траекториях полета изделия и вероятностях отказов системы измерения АСП или автомобиля-мишени, системы ликвидации АСП позволяет построить зону наземной опасности до начала ЛЭ.

В ходе выполнения ЛЭ информация, поступающая от АСП и автомобиля-мишени, уточняет границы возможного падения элементов АСП и воздействия его поражающих факторов.

Синтез опорной траектория полета АСП и маршрута движения автомобиля-мишени для определения максимально достижимой границы координат точек падения изделия производится с помощью детерминированных методов. Предельная дальность полета АСП всецело определяется полной энергией в момент пуска и аэродинамическими характеристиками изделия. С целью реализации желаемой траектории необходимо сделать выбор оптимального метода управления.

Был проведен анализ методов синтеза управления, который показал, что для решения задачи вывода объекта управления на максимальную дальность наиболее целесообразно выбрать в качестве базовых методов: метод динамического программирования и метод обратных задач динамики.

Для расчета опорной траектории, обеспечивающей максимальную прямолинейную дальность, могут рассматриваться методы:

- энергетический метод;
- метод баллистических кривых;
- прямолинейное снижение.

Для АСП с нулевой тягой двигательной установки энергетически наиболее выгодно прямолинейное снижение с постоянным углом наклона траектории – углом планирования.

Максимальный размер зоны наземной безопасности будет определяться высотой пуска и максимальным аэродинамическим качеством планирующего АСП, потенциально достижимыми характеристиками подвижной мишени.

Предельно достижимая дальность для автомобиля-мишени определяется располагаемой мощностью силовой установки, характером её расходования, имеющимся запасом топлива. В случае применения в качестве автомобиля-мишени электромобиля максимальная дальность также зависит от характеристик силовой установки и максимального заряда аккумулятора.

Для моделирования траектории движения автомобиля-мишени используется математический аппарат кинематики, динамики и теории криволинейного движения, а также теория управления и устойчивого движения автомобиля.

Для определения статистического разброса координат применения АСП или его осколков результаты математического моделирования представлены в полярной системе координат (см. рис. 3). Координаты точек сосредоточены вдоль направления полёта АСП с учетом корректировки на конечном участке, связанной с движением автомобиля-мишени. Разброс координат по оси OZ существенно меньше, чем разброс по оси OX, что обусловлено ошибками прицеливания и разбросом точек пуска АСП. Полученные значения разброса координат точек падения дают право считать, что по осям OX, OZ величины распределены по нормальному закону.

Знание одномерных законов распределения позволило перейти к двумерному распределению, необходимому для обоснования нормы безопасности и уровня усечения на границе предельной зоны падения, а также вычисления зон возможного падения управляемых АСП.

В процессе научных исследований была разработана методика оценки вероятности падения АСП в опасные зоны. Данная методика включает в себя алгоритм действий при пяти различных вариантах развития событий:

- сброс одного объекта;
- сброс объектов залпом, серией с малыми интервалами времени;
- сброс объектов серией через определенные интервалы времени;
- сброс объектов, оборудованных автономными системами ликвидации;
- корректировка границ ЗНО с учетом движения автомобиля-мишени.

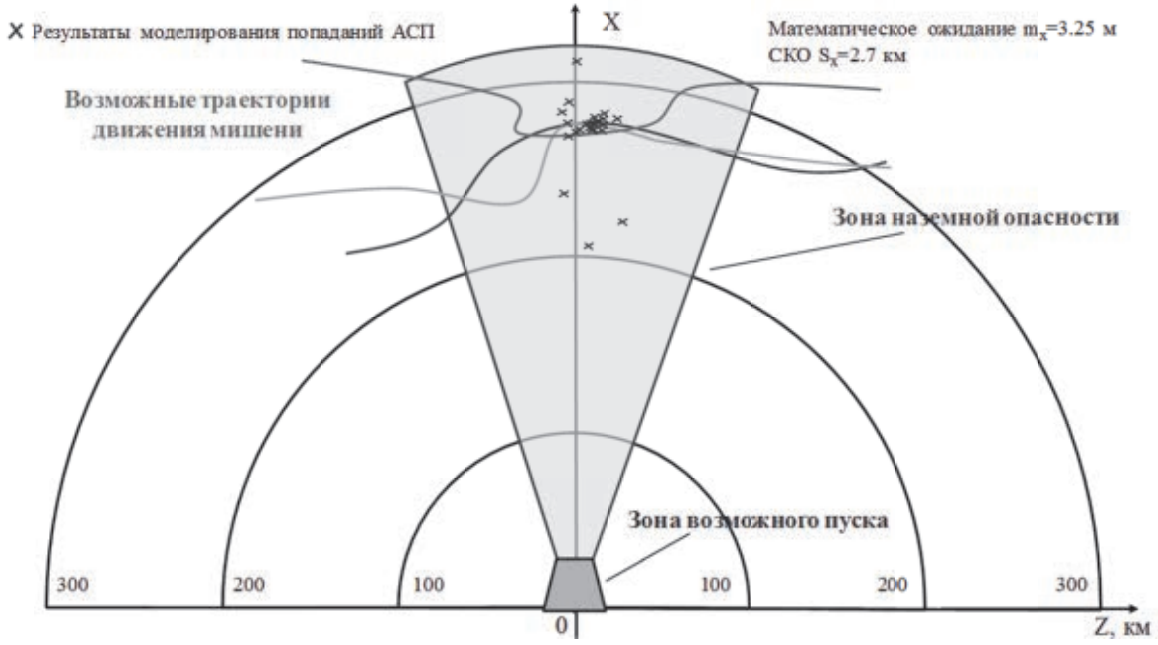


Рисунок 3 — Распределение координат точек падения при моделировании

Так в случае применения одной планирующей АСП сначала необходимо определить вероятность падения ее в каждый из НП, находящихся в зоне падения, затем рассчитать общую вероятность падения неисправного и исправного объекта, далее обобщить данные по всей отчужденной территории и результаты свести в таблицу.

Во втором случае при расчетах принимается допущение, что разнос в пусках по дальности незначителен и его влиянием можно пренебречь.

Третий случай - пускается несколько планирующих объектов друг за другом через определенные интервалы времени. В этом случае учитывается разнос пусков по дальности. На карте-схеме для каждого пускаемого АСП с учетом зоны возможного пуска самолета-носителя строится своя зона падения, объединенный контур которых формирует объединенный итоговый контур зоны наземной опасности.

В следующем рассмотренном случае для объектов, оборудованных автономными (бортовыми) системами ликвидации для определения вероятности падения в НП рассматриваются две зоны:

- зона падения неисправных объектов, определяемая зоной возможного падения при срабатывании системы ликвидации;
- зона падения исправных объектов.

В итоге определяется вероятность падения объекта на каждый НП, находящийся как на отчужденной территории, так и за ее пределами, но в границах зоны падения объектов.

Все вычисления проводятся с учетом траектории движения автомобиля-мишени, поскольку он сам является объектом опасности.

Если проведенные расчеты показывают, что полученные значения вероятности превышают указанные в нормативных документах, то до составления карт-схемы принимаются меры по снижению уровня вероятности падения в зоне путем выбора других полигонов, директрис сброса, траекторий движения роботизированных автомобилей-мишеней, условий сброса или применения конструктив-

ных решений разработчиков на объекте вооружения, позволяющих уменьшить зону падения, степень опасности АСП или изменить закон распределения вероятности падения объекта в зоне.

Каждый раз после корректировки исходных данных вычисление границ зон наземной опасности производятся заново.

Литература

1. Теория и конструкция автомобиля / В.М.Кленников, Е.В.Пленников. – М.: Издательство «Машиностроение», 1968. - 312 с.

2. Математическое обеспечение испытаний летательных аппаратов / А.С.Иванющенко, Н.Н.Козлов, В.Л.Соколюк. – М.: Технологии информационных систем, 2003. – 324 с. – [Методологические основы испытаний сложных систем]. ISBN 5-902143-03-9.

3. Основы теории оптимального управления Учеб. пособие для экон. вузов/ В.Ф.Кротов Б.А.Лагоша, С.М.Лобанов и др.; под ред. В.Ф.Кротова. –М.: Высш. шк., 1990. – 430 с.: ил. ISBN 5-06-000622-0.

А.Ю. Гетманцев

СИСТЕМА БОРТОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ РОБОТИЗИРОВАННОГО АВТОМОБИЛЯ-МИШЕНИ: ТРЕБОВАНИЯ, АСПЕКТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Государственный летно-испытательный центр им. В.П. Чкалова Минобороны России, г. Ахтубинск, tomamens@mail.ru; Московский авиационный институт, Москва

Аннотация

В статье проанализированы тактико-технические требования к системам бортовых измерений роботизированных автомобилей-мишеней, применяющихся при испытаниях авиационных средств поражения, рассмотрены различные аспекты и выданы предложения по дальнейшему совершенствованию этих систем.

Ключевые слова

Система бортовых измерений, тактико-технические требования, роботизированный автомобиль-мишень, испытания авиационных средств поражения.

A.Y.Getmantsev

THE SYSTEM OF ON-BOARD MEASUREMENTS OF UNMANNED TARGET CARS: REQUIREMENTS, ASPECTS AND PROSPECTS

State Flight Test Center V.P. Chkalova Ministry of Defense of Russia, Akhtubinsk, Russia, tomamens@mail.ru; Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

Abstract

The article analyzes the tactical and technical requirements for on-board measurement systems of robotic target vehicles used in tests of aircraft weapons, considers various aspects and provides proposals for further improvement of these systems.

Key words

On-board measurement system, tactical and technical requirements, robotic target vehicle, testing of aviation weapons.

В последнее время значительно возросла актуальность испытаний авиационного вооружения, применяемого по высокоскоростным подвижным целям.

При оснащении авиационных полигонов перспективными подвижными мишенными средствами на базе роботизированных или дистанционно-управляемых автомобилей-мишеней возникает необходимость в получении высокоточной измерительной информации при помощи системы бортовых измерений (далее - СБИ), которая является важной частью измерительного комплекса испытательного полигона. По сравнению с СБИ, другие системы измерений обладают или меньшей дальностью, или меньшей информативностью.

В связи с разработкой автомобилей-мишеней требуется адаптация существующей номенклатуры СБИ с целью внедрения этих незаменимых средств объективного контроля для получения достоверной информации о собственных координатах высокоманевренной мишени и о координатах авиационных средств поражения (далее – АСП) за счет записи информации с видеокамер патрульного типа с максимально близкого расстояния. Послеполетный анализ этой информации позволяет сделать вывод о промахе АСП и оценить результативность боевого применения АСП, т.е. в целом оценить эффективность работы боевого авиационного комплекса.

Таким образом, имеется потенциальная возможность повысить качество испытаний систем и комплексов авиационного вооружения различных типов, а также усовершенствовать процесс боевой подготовки лётного состава, операторов беспилотных летательных аппаратов и военнослужащих других видов и родов войск.

Рассмотрим ключевые характеристики перспективной системы бортовых измерений:

– высокая надежность и работоспособность в условиях взрыва;

– достаточная емкость накопителя информации, чтобы записать потоки информации от нескольких высокоскоростных камер большого разрешения;

– синхронизация потоков данных со шкалой единого времени и регистрация трех разноскоростных потоков информации: медленного, среднего и быстрого, соответственно:

– медленный поток – это текущие координаты, остаток топлива, заряда аккумулятора, принятая командная информация;

– средний по скорости поток – информация от датчиков перегрузки, датчиков попаданий, вибродатчиков;

– высокоскоростной поток информации большого объема – потоковое видео от видеокамер управления и видеокамер патрульного типа для определения промаха;

– масштабируемость для возможности расширения целевой нагрузки;

– приемлемо низкая стоимость разработки, эксплуатации, ремонта, замены.

Проанализируем требования к системе бортовых измерений, положив за основу определенную в ГОСТ РВ 15.201-2003 структуру ТТЗ на ОКР.

В состав изделия должны входить (см. рис. 1):

– технические средства бортовых измерений;

– средства автоматизированной системы обработки, отображения и документирования результатов измерений;

– вспомогательные средства.

На рисунке 1 приведены основные элементы каждой группы.

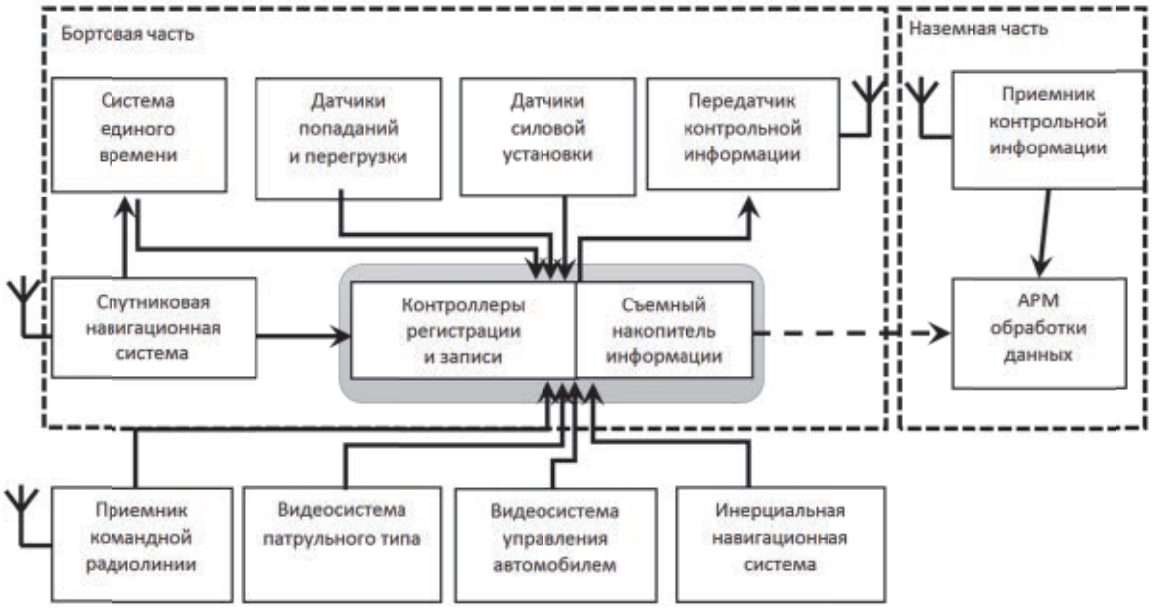


Рисунок 1 — Структурная схема СБИ

К техническим средствам относятся:

– различного рода датчики и согласующие устройства;

– бортовая аппаратура траекторных измерений на базе спутниковых навигационных систем и построенная на ее основе система единого времени;

– бортовая аппаратура видеорегистрации, в том числе высокоскоростные системы видеонаблюдения патрульного типа для оценки промаха в реальном масштабе времени, построенные на базе матриц с высоким разрешением;

– непосредственно бортовые твердотельные регистраторы, а с учетом резервирования требуется не менее 2 шт. с объемом памяти каждого от 1 ГБайта.

Вся записанная информация имеет довольно большой объем, поэтому в реальном масштабе времени для контроля работоспособности основных систем и средств, а также для обеспечения оператора данными о местоположении и видеоинформацией о направлении движения автомобиля-мишени с целью контроля наземной безопасности эксперимента необходимо применять защищенный помехоустойчивый радиоканал, передающий минимальный поток критически важных данных.

По завершении летного эксперимента или боевой работы вся информация с основного накопителя полностью переносится на средства автоматизированной системы обработки, отображения и документирования результатов измерений, где происходит первичная и вторичная обработка зарегистрированных потоков данных, на заданные интервалы времени формируются видеофайлы требуемого разрешения, производится совместная обработка данных системы определения взаимного положения применявшихся объектов и системы определения промаха АСП, а также выполняется ряд других задач.

Рассмотренный состав СБИ позволяет выполнить следующие основные задачи по предназначению (см. рис. 2).

Первая – это произвести сбор и регистрацию информации от различных источников, в том числе:

– от спутниковой навигационной системы;

– от приемного устройства командной радиолинии управления автомобилем-мишенью;

– от аппаратуры определения взаимного положения или промаха;

– от бортовых устройств автомобиля-мишени (видеосистема управления и видеосистем патрульного типа, датчиков остатка топлива, заряда аккумулятора, инерциальной навигационной системы);

– от дополнительной целевой нагрузки автомобиля-мишени, например – от установленных на автомобиле-мишени имитаторов теплового излучения, радиолокационных маяков, имитаторов РЛС, доплеровского передатчика, средств постановки помех прицельному комплексу, различного рода акустических систем и т.д.

Следующая задача - накопление бортовой измерительной информации с требуемой частотой, в необходимом качестве с реализацией функции резервирования сохраняемой информации в энергонезависимой памяти, и все это должно происходить в условиях, максимально приближенных к боевым.

Рисунок 2 — Назначение СБИ

Немаловажная задача – это передача по радиоканалу контрольной бортовой измерительной информации для обеспечения наземной безопасности за счет контроля местоположения автомобиля-мишени по данным спутниковой навигационной системы, по информации от видеокамер, расположенных в передней и задней части автомобиля, а также данных от критически важных датчиков, например, фиксирующих факт попадания АСП в автомобиль-мишень.

Обработка переданной по радиоканалу и зарегистрированной на накопителе информации должна производиться сначала в режиме реального времени – опираясь на данные телеметрии, а затем – в послеполетном режиме - должна реализовываться совместная обработка с привлечением максимального количества источников информации.

Требования радиоэлектронной защиты задаются следующие:

– уровни напряжения радиопомех, создаваемых в цепях электропитания, не должны превышать значений, заданных в ГОСТ РВ 6601-002-2008, Допустимые уровни невосприимчивости оборудования СБИ к электромагнитным помехам должны соответствовать требованиям этого ГОСТ;

– устанавливаемое оборудование должно соответствовать установленным в ОСТ 1 01025-82 требованиям по металлизации и экранированию;

– несущие частоты (с учетом полосы частот) передатчика и приемника командной радиолинии не должны совпадать с несущими (и кратными им) частотами (с учетом полосы частот) передатчика и приемника контрольной информации, т.е. должна быть обеспечена электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и СБИ.

Кроме того, должна быть обеспечена защита оборудования в условиях воздействия жесткого излучения РЭС полигонов, и в первую очередь это касается видеокамер.

По стойкости к внешним воздействующим факторам бортовая аппаратура должна соответствовать требованиям ГОСТ РВ 0020-39.304-2019, предъявляемых к аппаратуре класса 1, группа исполнения 1.3, а аппаратура системы обработки - группа исполнения 1.10.

Действующие ГОСТ устанавливает требования к взрывозащищенному электрооборудованию, а также общие требования к электротехническим изделиям в части стойкости к климатическим и механическим внешним воздействующим факторам.

Важно, что аппаратура системы обработки результатов измерений должна иметь пыле- влагозащищенное исполнение для возможности считывания и экспресс-обработки информации в месте уничтожения автомобиля-мишени.

Требования надежности характеризируются следующими показателями:

– вероятность безотказной работы бортового оборудования до момента наступления взрыва при выполнении движения по типовому маршруту по пересеченной местности за время 4 часа – не менее 0,95;

– назначенный ресурс для бортового оборудования – 100 часов, а для оборудования средств обработки данных – 10000 часов;

– назначенный срок службы - 5 лет, срок хранения – 3 года в течение срока службы.

С точки зрения надежной регистрации информации важным является требование автоматического сохранения последней записи в случае сбоя или отключения электропитания, а после восстановления электропитания должно произойти автоматическое возобновление регистрации данных.

Требования к надежности и методы оценки соответствия этим требованиям заданы в соответствующих ГОСТах.

Задаются следующие требования эргономики, обитаемости и технической эстетики:

– основные блоки СБИ и накопитель должны располагаться в специализированном взрывобезопасном и быстросъемном контейнере;

– СБИ должен обслуживать один специалист с квалификацией «техник»;

– внешние датчики и видеокамеры должны иметь взрывобезопасную легкосъемную конструкцию и не требовать для своей установки применения специального инструмента.

Помимо требований к эксплуатации, хранению, удобству технического обслуживания и ремонта, заданных в ГОСТ 15150-69, должны быть выполнены следующие требования:

– все средства измерений (датчики, СНС и т.д.) должны при перевозке и хранении упаковываться в один штатный носимый контейнер;

– средства измерений не должны требовать точной юстировки, настройки, тарировки или регулировки перед каждым применением СБИ;

– все элементы и составные части СБИ должны быть легкосъемными и заменяемыми на уровне блока или функциональной ячейки;

– конструкция бортового оборудования должна обеспечивать удобство эксплуатации, технического обслуживания и ремонта.

Требования транспортабельности к комплекту СБИ предъявляются следующие:

– вес нетто взрывобезопасного контейнера с контроллером регистрации и записи и съемным накопителем информации не должен превышать 5 кг, вес нетто полного комплекта СБИ со всеми локальными датчиками не должен превышать 10 кг, полный комплект СБИ в контейнере должен поднимать и переносить один человек;

– транспортируемость всеми видами транспорта на любые расстояния без ограничения, в том числе в негерметизируемых грузовых отсеках летательных аппаратов, морскими или речными судами, автомобильным или железнодорожным транспортом;

– установленный на автомобиль-мишень комплект СБИ должен сохранять свою работоспособность при транспортировании по грунтовым дорогам без ограничения расстояния со скоростью, указанной в ТЗ на автомобиль-мишень Заказчиком;

– после транспортирования средства СБИ должны сохранять свои технические характеристики и работоспособность в полном объеме.

Требования безопасности определяются в первую очередь жесткими условиями применения бортового оборудования СБИ:

– комплект СБИ в упакованном или установленном на автомобиль-мишень виде должен быть взрыво- пожарно- электробезопасным;

– опасные электрические цепи должны быть защищены от токов наводки в условиях воздействия на них электромагнитных полей РТС, грозовых разрядов и разрядов статического электричества и электромагнитных излучений. Для подтверждения выполнения этого требования должно быть представлено соответствующее заключение;

– должны быть предусмотрены меры защиты личного состава при эксплуатации от СВЧ излучения, а передатчик контрольной информации должен включаться и выключаться дистанционно по командной радиолинии;

– в цепях питания бортового комплекта СБИ должно использоваться только постоянное напряжение не выше 12 В, позволяющее проводить безопасные установку, монтаж и проверку работоспособности изделия в реальных полевых условиях во время дождя или снега;

– аппаратура системы обработки данных должна иметь встроенное резервное питание постоянным напряжением не выше 12 В для обеспечения возможности считывания информации со съемного накопителя в месте уничтожения автомобиля-мишени. Время работы резервного источника питания должно быть достаточным для переноса всей информации и полной очистки накопителя.

В соответствии с действующими нормативными документами в отношении следующих составных частей и вопросов должны быть реализованы требования по режиму секретности:

– криптозащита защищенного радиоканала передачи контрольной бортовой информации;

– защита тактико-технических характеристик, режимов работы СБИ и интегрированного с ним специализированного оборудования – по отдельным решениям Заказчика;

– разделенный паролированный доступ различных категорий пользователей к нормировочным, градуировочным и справочным данным, находящимся в средствах автоматизированных систем обработки, отображения и документирования результатов измерений.

Требование защиты от ИТР задается одно – это крипто- и помехозащищённое кодирование данных, передаваемых по радиоканалу.

На разрабатываемую систему бортовых измерений накладываются следующие требования стандартизации, унификации и каталогизации:

– узлы и детали СБИ, источники информации (датчики, видеокамеры и т.д.) должны быть унифицированы внутри своих групп по разъемам, не должны требовать при быстрой смене каких-либо настроечных или юстировочных работ;

– должно быть обеспечено максимально возможное применение стандартных и унифицированных элементов;

– запись информации на накопитель должна производиться по стандартизированным протоколам (по ARINC 429, по МКИО, по стандарту Ethernet, по RS-232/422 и т.д.);

– все элементы крепления должны быть стандартными и позволять выполнять быстрое закрепление и открепление блоков, узлов и разъемов;

– требования каталогизации – по ГОСТ РВ 0044-015-2012;

– требования по стандартизации и унификации – по ГОСТ РВ 15.207-2018.

Требования технологичности однозначно увязаны со спецификой применения СБИ:

– время подготовки и установки бортовой части изделия на автомобиль-мишень не должно превышать 1 часа при первом включении (без учета времени извлечения из тарной упаковки);

– время демонтажа всех отказавших элементов не должно превышать 0,5 часа;

– одиночный комплект ЗИП должен предусматривать 100% резервную комплектацию СБИ для возможности замены любого отказавшего (поврежденного в процессе эксплуатации либо уничтоженного взрывом) блока или любого отказавшего силового либо информационного кабеля: причем время суммарное демонтажа и монтажа блока - не более 5 минут, и не более 3 минут – для кабеля;

– элементы конструкции СБИ не должны требовать проведения регламентных либо сезонных работ.

Конструктивные требования самые существенные при разработке СБИ:

– бортовая часть СБИ должна иметь модульное исполнение и жестко крепиться на автомобиле-мишени при помощи быстроразборных болтов, хомутов и т.д.

– взрыво-, влаго- пылезащитное исполнение бортовой аппаратуры СБИ;

– накопитель должен обеспечивать запись во время подготовительных операций, боевой работы и заключительных операций, причем должно быть реализовано гарантированное завершение и сохранение записанной информации при пропадании электропитания, при «горячей» замене накопителей информации;

– низкое энергопотребление от источника постоянного напряжения 12 В, требования к электропитанию по ГОСТ Р 54073-2017;

– разъемы питания и передачи данных, высокочастотные разъемы должны быть стандартными и должны исключать возможность своей неправильной установки, а при движении по пересеченной местности или при вибрации не должны самопроизвольно разъединяться, при этом не должна требоваться контровка разъемов;

– антенны СНС должны принимать устойчивый сигнал при переворотах автомобиля на 90 и 190 градусов;

– передатчик контрольных данных от системы бортовых измерений должен устойчиво работать все время летного эксперимента, а диаграмма направленности его антенны должна быть круговой;

– внутри контейнера с контроллером и накопителем СБИ должно быть предусмотрено место для установки аварийного радиомаяка с независимым энергопитанием.

Технико-экономические требования, предъявляемые к разрабатываемой СБИ:

– списание бортовой части системы бортовых измерений с материального учета должно производиться в момент установки на автомобиль-мишень;

– должны быть определена норма расхода ГСМ на выполнение подготовительных и диагностических работ при установке СБИ;

– на этапе технического проектирования должны быть представлена ориентировочная цена изделия при серийном производстве для каждого варианта комплектации и различных объемах производства.

Далее рассматриваются требования к видам обеспечения.

Задаются следующие требования к нормативно-техническому обеспечению, во многом общие для современных радиоэлектронных систем:

– межведомственные испытания СБИ в объеме требований государственных испытаний должны проводиться по единым типовым методикам для обеспечения сквозной зачетности;

– эксплуатационная документация должна строго соответствовать требованиям соответствующих ГОСТ (ГОСТ 18675-2012, ГОСТ 27692-2012, ГОСТ 27693-2012);

– документация, разрабатываемая в процессе выполнения работы, по комплектности, оформлению и содержанию подлинников должна соответствовать ЕСКД, ЕСТД и ЕСПД.

К метрологическому обеспечению предъявляются следующие требования:

– метрологическое обеспечение разрабатываемого изделия должно соответствовать требованиям ГОСТам и ОТТ (ГОСТ РВ 0008-000-2019, ГОСТ РВ 0008-003-2019, ГОСТ РВ 0008-006-2020, ГОСТ Р 8.563-2009, ГОСТ РВ 0020-39.309-2019, ГОСТ РВ 0020-57.310-2019, ОТТ 1.1.7-89), а также другим национальным и военным стандартам и нормативно-техническим документам Заказчика;

– методики измерений, применяемые при разработке, испытаниях и эксплуатации разрабатываемого изделия, должны соответствовать требованиям ГОСТ Р 8.563-2009;

– датчики информации для СБИ, являющиеся средствами измерений, должны быть стандартизированы и выбираться из «Перечня средств измерений военного назначения, разрешенных для комплектации вооружения и военной техники и поставки Минобороны России»;

– в формулярах разрабатываемого изделия и его составных частей в соответствии с ГОСТ 2.610-2019 должен быть приведен перечень средств измерений, которые подвергаются периодической поверке, у индикаторов в формулярах должна быть сделана запись «Периодической поверке не подлежат»;

– в перечне регистрируемых параметров должны быть установлены допуски на их разрядность и предельно допустимое отклонение.

Требование к диагностическому обеспечению следующее: должна обеспечиваться проверка работоспособности СБИ, включая встроенный контроль функционирования, с индикацией об исправности либо отказах датчиков.

Требования, задаваемые к математическому, программному и информационно-лингвистическому обеспечению СБИ:

– программно-математическое обеспечение втоматизированного рабочего места системы обработки, отображения и документирования материалов измерений должно соответствовать требованиям ОТТ 4.1.9.1-2017 и пройти испытания по типовым методикам ОТТ 4.2.9.1.8-2017;

– программно-математическое обеспечение должно выполнять обработку в реальном масштабе времени контрольной информации, поступающей по радиоканалу, а также совместную послеполетную обработку с этими данными информации, записанной на съемный накопитель большой емкости, с целью получения количественных оценок точностных характеристик авиационных средств поражения и ТТХ прицельных комплексов и авиационного стрелково-пушечного вооружения;

– для реализации реального масштаба времени максимальная продолжительность прохождения информации по радиоканалу, программной обработки и отображения не должна превышать 1 с;

– должны обеспечиваться первичная обработка и вторичная обработка результатов измерений, анализ результатов измерений с расчетом математического ожидания, СКО, частотного спектра сигнала, а также синхронная визуализация результатов в табличном и графическом видах с указанием границ и ограничений, максимума и минимума, причем первичная обработка - в реальном масштабе времени, а суммарная продолжительность первичной и вторичной обработки и анализа результатов не должна превышать времени записи информации;

– должна быть предусмотрена возможность останова и возобновления процесса вторичной обработки в любой момент времени;

– должна быть реализована функция экспорта результатов обработки в табличном и текстовом виде в согласованном формате.

Требование, которое предъявляется к сырью, материалам и комплектующим и материалам межвидового применения: должно быть минимизировано применение электронной компонентной базы и комплектующих изделий иностранного производства, входящих в состав СБИ, оно должно соответствовать нормам и требованиям действующего законодательства Российской Федерации в сфере по-

рядка применения номенклатуры электронной компонентной базы и комплектующих изделий иностранного производства в составе изделия.

Требования, которые задаются к консервации, упаковке и маркировке:

– в течение всего срока хранения элементы конструкции СБИ не должны требовать консервации, а в течение всего срока службы - применения герметиков при установке или демонтаже;

– упаковка и маркировка датчиков и узлов СБИ должна иметь соответствующие наклейки, позволяющие однозначно проводить их идентификацию как в упакованном, так и в установленном виде;

– кабели и разъемы должны иметь маркировку, исключающую неправильное подключение;

– должны быть выполнены требования к консервации, упаковке и маркировке в соответствии с действующими ГОСТ в этой области.

Требования, задаваемые к учебно-тренировочным средствам, должны минимизировать время обучения специалистов:

– учебно-тренировочные средства должны включать иллюстрированные документы и видеофильмы, полностью описывающие процессы: распаковки, установки на автомобиль-мишень и подключение составных элементов бортовой части СБИ, в том числе датчиков, микрофонов, видеокамер, ИНС, источника питания и т.д. к контролеру регистрации и записи, а также порядок подключения и отключения накопителя системы регистрации информации в бортовом взрывобезопасном контейнере;

– порядок подключения и отключения накопителя к средствам автоматизированной системы обработки, отображения и документирования результатов измерений;

– порядок диагностирования и контроля работоспособности СБИ, включая проверку исправности радиоканала передачи контрольных данных, ИНС и СНС, видеокамер и микрофонов.

Специальное требование, задаваемое к СБИ, следующее: элементы и узлы СБИ не должны содержать драгоценных (Au, Ag и т.д.) или тяжелых (Pb, Hg и т.д.) металлов.

Отдельные аспекты, не рассмотренные ранее, звучат так:

– исключительно отечественная элементная база;

– оптимальный выбор: «дешевые одноразовые элементы» против «дорогие элементы и неубиваемые узлы многократного применения»;

– спутниковая информация исключительно от отечественных навигационных систем;

– применение средств криптозащиты, разрешенных Минобороны России, не требующих поиска и списания после уничтожения взрывом автомобиля-мишени;

– дешевизна СБИ при среднесерийном производстве;

– СБИ становится штатной составной частью автомобиля-мишени (в соответствующей комплектации).

Перспективы совершенствования СБИ:

– увеличение числа каналов и повышение информативности;

– совершенствование протоколов и стандартизация алгоритмов обработки информации;

– снижение массогабаритных размеров и энергопотребления;

– повышение живучести;

– повышение скрытности радиоканала контрольной бортовой информации;

– дистанционное диагностирование и управление работой нескольких бортовых частей СБИ с одного рабочего места оператора по командной радиолинии.

Вывод: системы бортовых измерений являются высокоинформативной составляющей измерительного комплекса испытательных полигонов, однако их разработка требует проведение серьезных научных исследований по минимизации стоимости с одной стороны и максимизации взрывозащищенности во всех вариантах климатического исполнения – с другой.

И.В. Гурин, М.С. Красило, П.Г. Скубак

УСТРОЙСТВО АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ КОРОБКОЙ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ПЕРЕДАЧ

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, GurinIV86@yandex.ru, mihailkrasilo@yandex.ru, skubak.pavel92@gmail.com

Аннотация

Данная статья посвящена разработке устройства для управления механической коробкой передач беспилотного автомобиля. Описываются преимущества применения беспилотного транспорта, как личного, так и специализированного. Выдвигается гипотеза о применении программно-аппаратных комплексов автоматизации транспорта, выполненных в виде надстроек, для автоматизации автомобилей и специализированной техники, серийно выпускаемой российскими предприятиями. Авторами описан процесс разработки навесного устройства автоматического управления механической коробкой переключения передач (МКПП). Разработка начинается с анализа органов управления МКПП, формирования концепции устройства с учётом доступных технологий и существующих ограничений. Производится сравнительный анализ различных приводных систем. Приводятся результаты моделирования и анализа деталей разрабатываемого устройства. Описан процесс изготовления и монтажа прототипа устройства для управления МКПП, а также результаты его полевых испытаний.

Ключевые слова

Беспилотный транспорт, навесные устройства, механическая КПП, картезианская кинематика, проектирование, испытание.

I.V. Gurin, M.S. Krasilo, P.G. Skubak

AUTOMATIC CONTROL OF THE MANUAL TRANSMISSION

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia, GurinIV86@yandex.ru, mihailkrasilo@yandex.ru, skubak.pavel92@gmail.com

Abstract

This article is devoted to the development of a device for controlling the manual transmission of an unmanned vehicle. The advantages of using unmanned vehicles, both personal and specialized, are described. A hypothesis is put forward about the use of software and hardware complexes of transport automation made in the form of add-ons for automating cars and specialized equipment mass-produced by Russian enterprises. The authors describe the process of developing a hinged device for automatic control of a manual transmission (manual transmission). The development begins with the analysis of the controls of the manual transmission, the formation of the concept of the device, taking into account the available technologies and existing limitations. A comparative analysis of various drive systems is performed. The results of modeling and analysis of the details of the device under development are presented. The process of manufacturing and installation of a prototype device for controlling the manual transmission, as well as the results of its field tests, is described.

Keywords

Unmanned vehicles, attachments, mechanical gearbox, Cartesian kinematics, design, testing.

Разработка прототипов беспилотного транспорта началась в 80х, одним из известных примеров можно считать полугрузовой микроавтобус Mercedes (Германия), который, находясь в автономном режиме, смог двигаться со скоростью 100 км/ч, был способен менять полосу движения и следовать по заданной траектории [1]. Причина, по которой концепция беспилотного автомобиля приобрела столь

важное значение в настоящее время – запрос на повышение безопасности движения. Автопроизводители, в основном в странах с развитой экономикой, заинтересованы в скорейшем внедрении новых технологий для повышения уровня автоматизации транспортных средств. Среди компаний, охотно внедряющих инновации выделяются Mercedes-Benz Group, VW Group, Volvo, Renault-Nissan и Tesla.

Инновации в транспортной отрасли Российской Федерации сильно отстают по количеству внедряемых решений и моделей, которые эти решения содержат. Несмотря на достижения российских разработчиков в создании программных продуктов, российская автомобильная промышленность значительно уступает конкурентам в части внедрения устройств автоматизации. При этом заинтересованность государства и частных компаний в развитии технологии беспилотного транспорта достаточно высока [2], несмотря на ряд проблем, затрудняющих быстрое внедрение разработок. К этим проблемам можно отнести: отсутствие необходимой инфраструктуры (точные карты, сеть для обмена информацией между транспортными средствами (ТС) и средой) [3], социально-экономическое значение профессии водитель [4], а также отсутствие правовых норм регулирования взаимодействия обычных и беспилотных транспортных средств на дорогах общего пользования.

Сферы применения беспилотных ТС

Беспилотным может быть не только транспорт для дорог общего пользования, но и специализированные ТС, такие как, грузовые автомобили, комбайны, карьерные самосвалы, тракторы, заводские электрокары и прочие, которые могут перемещаться и выполнять задачи на закрытых территориях со строгорегламентироваными правилами движения.

Преимуществами использования беспилотных ТС является:

– снижение транспортных расходов за счет более экономичного потребления топлива. Экономия составит около 1,5 млн. руб. в год с одной машины [5];

– исключение человеческого фактора, что позволит снизить вероятность возникновения ДТП на 70 % [6];

– повышение объема перевозок за счет рационального использования транспорта;

– возможность безопасной доставки грузов в потенциально опасные районы (зоны техногенных и природных катастроф и т.д.).

Таким образом, разработка беспилотного транспорта для персонального использования, не смотря на огромую целевую аудиторию, становится менее привлекательной по сравнению с автоматизацией специализированной техники. Первопроходцем на рынке беспилотной тяжелой техники считается американская компания Catterpillar. Свой первый автоматизированный карьерный самосвал они представили в 1996 году [7]. Автоматизированные самосвалы позволяют снизить вероятность травм персонала на рабочем месте. Так, только в России за период с 2017 по 2021 год произошло 36 крупных обвалов породы, под завалами оказались тысячи горняков, не обошлось и без летальных случаев. Автоматизированные системы могут заменить водителей в тех ситуациях, когда управление транспортным средством вредит здоровью. Такими ситуациями, например могут быть испытания новых автомобилей. В процессе ходовых испытаний водитель-испытатель проезжает порядка 10000 км на экспериментальном автомобиле по сложному маршруту с искусственными и естественными препятствиями и неровностями. Водители-испытатели переносят критические нагрузки на организм, что негативно сказывается на суставах и нервной системе.

Помимо безопасности автоматизация транспортных средств позволяет оптимизировать затраты. Создание систем автоматического управления колесными транспортными средствами, также позволит создавать автономные колонны транспортных средств, в которых человеком будет управляться ведущая машина, а остальные будут следовать за ней. Данное решение положительно скажется на затратах логистических компаний. Автоматизированные системы также могут использоваться и в сельскохозяйственной технике. При выгрузке зерна из комбайна в грузовой автомобиль, автоматизированные системы помогут синхронизировать скорость движения и контролировать наполнение кузовов и прицепов.

На сегодняшний день Российская Федерация, как и многие другие страны не имеет чётко сформированной позиции относительно требуемого уровня автономности транспортных средств, в ввиду чего большинство существующих решений относятся к первому – второму уровню автоматизации, согласно международной классификации SAE [8]. Уровни автономности складываются из различных факторов, в том числе и количества параметров, контроль над которыми принимает на себя система управления транспортного средства для реализации функций водителя.

Теоретическое обоснование работ

Разработка навесных программно-аппаратных модулей, подразумевающая отсутствие вмешательства в узлы и механизмы серийного ТС, которые позволят заменить человека на водительском месте - первый этап на пути создания полностью автономных ТС, не нуждающихся в водителе человеке. Одна из таких функций, которую автоматизированной системе необходимо взять под свой контроль - выбор и включение передачи в коробке переключения передач (КПП). В этом случае разрабатываемая система будет воздействовать на рычаг переключения механической КПП (МКПП) или автоматической КПП (АКПП). Российской Федерацией производится и используется, преимущественно механическая КПП, кроме того, механическая КПП является атрибутом профессионалов, за счёт возможности гибко использовать мощность и крутящий момент двигателя. Механическая коробка переключения передач – вид трансмиссии, в котором переключение ступеней осуществляется вручную водителем транспортного средства. Число ступеней МКПП варьируется от четырёх до семи, не считая нейтральной и задней передач. Основной отличительной чертой транспортных средств, оснащенных МКПП, является наличие узла сцепления. Сцепление – элемент трансмиссии, передающий крутящий момент от двигателя и позволяющий временно осуществить механическое размыкание двигателя от остальных элементов трансмиссии.

Преимущества МКПП:

- низкая сложность и стоимость работ по ремонту и обслуживанию, по сравнению АКПП;
- уменьшение затрат на производство, по сравнению с АКПП;
- высокая надёжность при правильной эксплуатации;
- наличие дополнительных функций (торможение двигателем, использование пониженной передачи в качестве стояночного тормоза и возможность движения «накатом»).

Недостатки МКПП:

- сложность правильной эксплуатации для водителей с малым стажем;
- необходимость контролировать выбранную передачу - дополнительный фактор, влияющий на утомление водителя;
- неправильная эксплуатация увеличивает расход топлива и сокращает срок службы узлов и агрегатов ТС.

Можно заметить, что все преимущества МКПП связаны с процессом производства и обслуживания транспортного средства, а недостатки заключаются в процессе эксплуатации. Во многом имеющиеся преимущества определили преобладание транспортных средств с механической КПП в России. По статистическим данным действующий парк транспортных средств гражданского назначения Российской Федерации состоит на 99,5% [9] из техники, имеющей МКПП.

Устройство автоматического управления МКПП планируется использовать без значительных конструктивных доработок транспортных средств, поэтому первым этапом работы стал анализ процесса переключения передачи с точки зрения водителя. Ручка рычага МКПП может быть перемещена в соответствии со схемой (см. рис. 1), данная схема расположения передач актуальна для большого количества автомобилей различных автопроизводителей, имеющих пять ступеней и реверс, в том числе и для автомобиля LADA GRANTA с МКПП.

Исходя из схемы, выбор необходимой передачи осуществляется перемещением ручки рычага вдоль поперечной оси транспортного средства. Включение передачи осуществляется перемещением ручки рычага вдоль продольной оси транспортного средства. Перемещения ручки происходят не ли-

нейно, а по радиусу, заданному длинной рычага, так как основание рычага закреплено в опоре и прикреплённого к корпусу ТС. Таким образом, для управления МКПП необходимо совершать перемещение рычага по двум осям, являющимися ходами, основанными длинной рычага и величиной его рабочего хода.

Рисунок 1 — Схема перемещения рычага МКПП с пятью ступенями

Анализ типов приводных механизмов

Следующий этап работ - анализ существующих типов линейных приводных механизмов и передач с целью подбора оптимального способа воздействия на рычаг МКПП. Основными критериями для отбора будут служить сложность изготовления и монтажа, а также точность позиционирования.

Для перемещения в плоскости установок небольшой массы используются компактные системы прецизионного двухкоординатного позиционирования. Примерами подобных систем являются:

- шарико-винтовая передача;
- передача рейка-шестерня;
- пневматическая или гидравлическая система;
- ременная передача.

Шарико-винтовая передача (ШВП) - разновидность линейного привода, превращающего вращательное движение винта в поступательное движение гайки. Винт взаимодействует с гайкой не напрямую, а через шарики, что обеспечивает крайне малое трение и как следствие высокий КПД работы передачи. Винт и гайка производятся с жесткими допусками, и могут быть использованы в оборудовании, где требуется высокая точность перемещения и позиционирования. Основные значимые характеристики отражены в таблице 1.

Таблица 1 — Основные характеристики шарико-винтовой передачи

Достоинства	Недостатки
Малые потери энергии на трение	Гайка имеет сложную конструкцию
Низкий уровень шума при работе	Диапазон рабочего хода ограничен длинной винта и не может быть увеличен без его замены
Высокая точность перемещений	Ограничение по скорости вращения винта (из-за вибрации)
Реализация равноускоренного движения	Значительные масса-габаритные характеристики
	Высокая стоимость

Рейка-шестерня – один из видов механических передач, преобразующий поступательное движение во вращательное. Состоит из ведущей шестерни и зубчатой рейки, по которым перемещается каретка.

Шарико-винтовая передача и рейка-шестерня обладают существенным недостатком – значительными масса-габаритными параметрами, что может затруднить монтаж и эксплуатацию устройства автоматического управления МКПП.

Таблица 2 — Основные характеристики передачи рейка-шестерня

Достоинства	Недостатки
Высокая скорость перемещения рабочего органа	Шум при высоких скоростях
Высокий КПД (до 98%)	Невозможность бесступенчатого изменения передаточного числа
Постоянство передаточного числа	Необходимость высокой точности изготовления и монтажа
Простота конструкции	Незащищенность от перегрузок
Возможность стыковки для получения больших длин	Значительные масса-габаритные характеристики
	Наличие вибраций при неточном изготовлении и сборке

Системы на пневматических или гидравлических приводах, требуют размещения ресивера с рабочей массой (газ или жидкость) и компрессора, осуществляющего перемещение рабочей массы (газа или жидкости).

Таблица 3 — Основные характеристики пневматических или гидравлических систем.

Достоинства	Недостатки
Высокая скорость перемещения рабочего органа	Сложность точного позиционирования
Быстродействие	Необходимость в ресивере и рабочем веществе (газе или жидкости)
Постоянство передаточного числа	Необходимость прокладки магистралей от ресивера к исполнительному органу
Толерантность к ударным нагрузкам	

В случае утечки рабочей жидкости у гидравлической системы она выходит из строя или значительно снижается её эффективность, кроме того это может вывести из строя другие узлы и элементы. Также к недостаткам можно отнести и низкую точность позиционирования. Несмотря на недостатки, у подобных систем есть и весомое преимущество – быстродействие.

Одним из старейших типов механических передач, применяемых в различных отраслях промышленности, являются ременные передачи. Ременная передача – передача трением с гибкой связью. Состоит из ведущего и ведомого шкивов и ремня, надетого на шкивы с предварительным натяжением. В состав передачи могут входить натяжные устройства и ограждения. Возможны передачи с двумя и более ведомыми шкивами. Использование ремней различной формы поперечного сечения и различной конструкции позволяет варьировать параметры ременных передач в широких диапазонах. Помимо традиционных ременных передач, широко применяются и зубчато-ременные передачи. Ремни таких передач имеют на внутренней поверхности зубья, и передача движения осуществляется путем зацепления зубьев ремня с зубьями шкива [10].

Таблица 4 — Основные характеристики пневматических или гидравлических систем

Достоинства	Недостатки
Возможность передачи движения на значительные расстояния	Значительные габариты
Плавность и бесшумность работы	Непостоянство передаточного отношения;

Достоинства	Недостатки
Возможность работы с высокими частотами вращения	Необходимость устройств для натяжения ремня
Предохранение механизмов от резких колебаний нагрузки и ударов	Малая долговечность ремня в быстроходных передачах
Защита от перегрузки	
Высокий КПД до 98 %	
Низкая стоимость	

Частным случаем ременных передач являются механизмы на основе картезианской кинематики. Такие механизмы имеют достаточную жесткость конструкции и точность перемещения, при этом значения их масса-габаритных характеристик ниже, чем у реечной и шарико-винтовой передач, рассчитанные на аналогичные задачи.

Картезианская кинематика имеет несколько разновидностей, таких как, Makerbot, H-bot и Core XY. В связи с перечисленными преимуществами и недостатками, для первого рабочего прототипа устройства управления МКПП была выбрана картезианская кинематика.

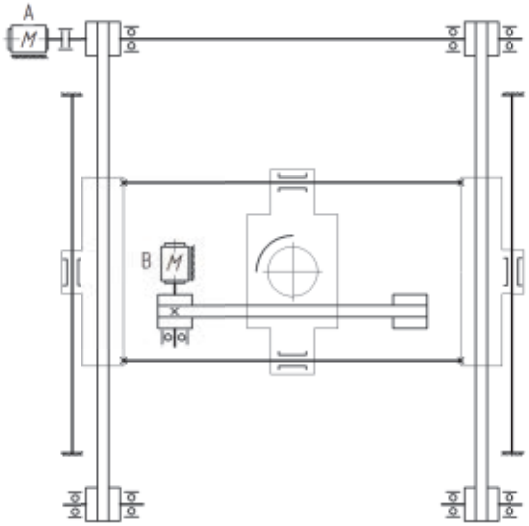


Рисунок 2 — Кинематическая схема Makerbot

Системы, основанные на картезианской кинематике схожи общими компонентами, но отличаются их компоновкой и количеством. Makerbot имеет в своей основе два независимо работающих привода, один из которых (привод оси X) установлен на ортогональной оси (ось Y) [11]. Ремни используются независимые, для оси X используется меньшего размера закольцованный ремень, а для оси Y применяется два закольцованных ремня (см. рис. 2).

Таблица 5 — Достоинства и недостатки кинематики Makerbot

Достоинства	Недостатки
Используемые ремни склонны к растяжению	Дополнительная неравномерная нагрузка на ось Y
Простота сборки	Необходимость балансировки оси X

H-Bot, в отличии от Makerbot функционирует с использованием одного длинного ремня, для передачи движения на подвижные элементы от двигателя. Ещё одним отличием является то, что оба двигателя крепятся к общему каркасу и не перемещаются ни по одной из осей (см. рис. 3). Схема подразумевает, что перемещение каретки по разным осям происходит за счет смены направления вращения приводов. Движение по оси Y происходит при противоположном по направлению и равном по скоро-

сти вращении приводов A и B. По оси X перемещение каретки производится при равном по направлению и скорости вращении двигателей A и B [12]. При вращении одного двигателя происходит перемещение по диагонали. При передвижении каретки по оси X проявляется основная проблема схемы H-bot – шум и вибрация. За счет не симметричного распределения нагрузки на каретку от приводов, могут возникать вибрации между кареткой и направляющей. Данная кинематика требовательна к качеству сборки и комплектующим.

Таблица 6 — Достоинства и недостатки кинематики H-bot

Достоинства	Недостатки
Высокая скорость перемещения	Сложный процесс масштабирования механизма
Легкость обслуживания	Требуется жесткая рама
Относительно низкая стоимость сборки	Высокие требования к качеству комплектующих
	Требовательность к качеству сборки
	Вибрации в каретке оси X

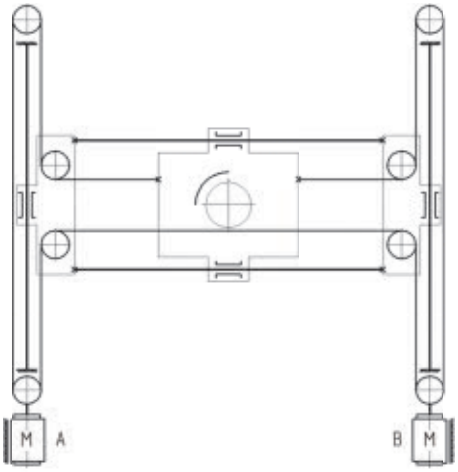


Рисунок 3 — Кинематическая схема H-bot

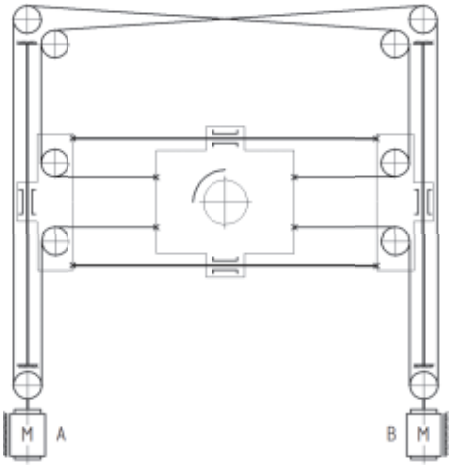


Рисунок 4 — Кинематическая схема CoreXY

CoreXY во многом схож с H-bot, за исключением того, что вместо одного закольцованного ремня используется два разомкнутых и доработана система роликов. Каждый из ремней короче на 30%, чем в схеме H-Bot (при тех же размерах области перемещения) (см. рис. 4). За счет двух ремней распределение нагрузки от приводов, происходит равномерно, что в свою очередь устраняет шум и вибрации при перемещении по оси X.

Немаловажным преимуществом использования системы является потенциально малая масса подвижного портала за счет расположения двигателей на раме. Также CoreXY позволяет повысить точность перемещения. Перемещение по оси X, также как по оси Y, реализуется одновременной работой двух приводов (кроме движения по диагонали), по тому же принципу, что и у H-Bot. Это дает возможность в 2 раза точнее позиционировать каретку, в сравнении со схемой Makerbot. Для примера: при перемещении ремня мотором A на $\Delta A = 0{,}1$ м, получаем перемещение каретки на $\Delta X = 0{,}05$ м, т. е. в 2 раза меньшее расстояние (1).

$$\Delta X = 0{,}5*(\Delta A + \Delta B). \quad (1)$$

$$\Delta Y = 0{,}5*(\Delta A - \Delta B).$$

Сложность реализации системы CoreXY заключается в том, что из-за особенности конструкции, два ремня должны перекрещиваться. Чтобы они не касались друг друга при работе, рациональным решением будет помещение ремней параллельно, один над другим.

Таблица 7 — Достоинства и недостатки кинематики CoreXY

Достоинства	Недостатки
Мало вибраций	Энергетическая неэффективность
Относительно высокая точность позиционирования	
Легкость масштабирования	
Относительная легкость сборки	

Кроме того, необходимо решить проблему с приложением усилия к ручке рычага КПП, вне зависимости от её смешения, вызванного выбором той или иной передачи. Шарообразность перемещения рычага возможно нейтрализовать применением шарового шарнира. Шарнир выполняется в виде шара с проходящим через ось сквозным отверстием с втулкой, которая скользит по рычагу. Снаружи на шаре находятся выемки для набивки консистентной смазки. Шар контактирует внешней поверхностью с пазом в каретке. При линейном движении каретки, шар скользит одновременно и по рычагу, и вращается в пазу, передавая усилие на рычаг.

Проектирование прототипа устройства

При разработке навесных систем автоматизации транспорта ключевыми факторами для авторов устройства являлись сложность сборки и отладки прототипа. Соответственно, предпочтение было отдано той кинематической системе, реализация которой потребовала бы наименьших ресурсов, но позволила бы обеспечить контроль моложения рычага МКПП с точностью до 5 мм. Данной схемой является кинематика CoreXY.

Концепция модульности навесной системы предполагает, что каждое из устройств автоматизации, в том числе и устройство автоматического управления МКПП, может устанавливаться на транспортное средство и существовать отдельно от остальных устройств. Для соблюдения данного условия основной узел с исполнительным механизмом изготавливаются как отдельный модуль, монтируемый на собственный каркас из листовой стали СТ3сп. Каркас позиционирует устройство автоматического управления МКПП, относительно рычага. Крепление каркаса к корпусу ТС осуществляется в 4 точках, винтами в резьбовые отверстия для элементов интерьера салона. На каркас при помощи 4х винтов крепится пластина с исполнительным механизмом и соединительными проводами (см. рис. 5).

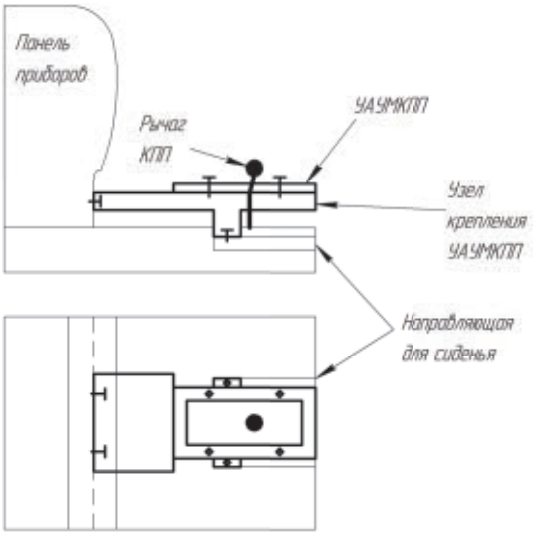


Рисунок 5 — Схема крепления устройства автоматического управления МКПП

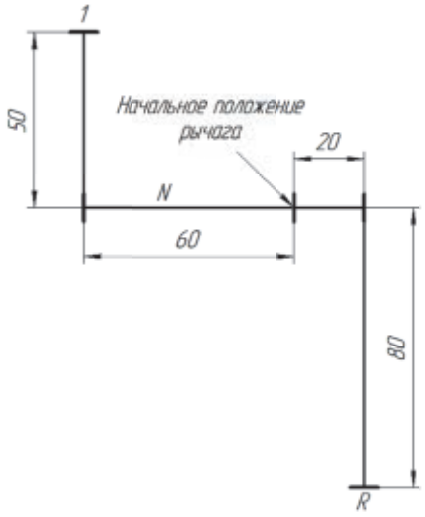


Рисунок 6 — Схема ходов рычага МКПП для переключения из начального положения в первую и заднюю передачи

Перед составлением 3D модели необходимо было определить рабочую область разрабатываемого устройства. Эти данные были получены в ходе измерений ходов рычага на автомобиле без износа механизмов переключения передач (см. рис. 6).

Далее необходимо определить пространство, доступное для развёртывания навесной системы. С этой целью разработчиками было принято решение демонтировать декоративные элементы интерьера автомобиля - кожух механизма переключения передач и накладку храпового механизма ручного тормоза. Так же были проведены замеры межосевых расстояний крепежных отверстий транспортного средства и их положения, относительно рычага КПП. Все эти данные необходимы для построения 3D модели устройства (см. рис. 6).

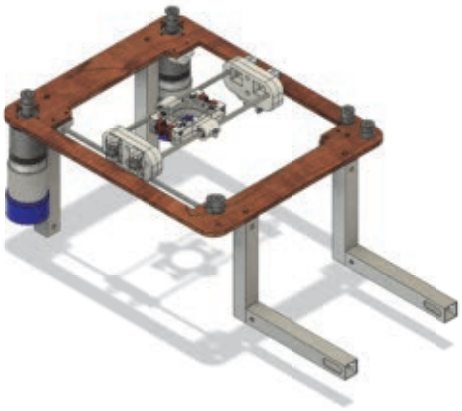


Рисунок 6 — Упрощённая 3D модель

Рисунок 7 — Примерка прототипа устройства автоматического управления МКПП на автомобиль

Упрощённая модель нужна для изготовления макета, размещения электроприводов и соединительных проводов. Так же здесь была расположена каретка с шаровым шарниром для крепления рычага МКПП. Для дальнейшей разработки устройства необходимо выбрать линейные направляющие для осей. Данные детали конструкции выполняют функцию опорных и направляющих элементов. Чтобы избежать искривления от возникающих нагрузок, необходимо провести расчет, для определения минимально допустимого диаметра направляющих.

Расчёт элементов конструкции

Для расчета выбрана ось Y, как наиболее нагруженная. Принимается ситуация, когда каретка занимает центральное положение по оси Y (см. рис. 8). Длина направляющей l = 0,24 м. Действующие силы на ось, представляют собой сосредоточенную нагрузку P и реакции в опорах A и B (R_A, R_B и H_A) [13].

Рисунок 8 — Схема нагружения линейной направляющей оси Y

Масса оси X вместе с направляющими, подшипниками и кареткой с шаровым шарниром, по результатам моделирования, составляет 1 кг. Значение сосредоточенной силы P равно:

$$P = m * g.$$
$$P = 1кг * 9,8\frac{м}{с^2} = 9,8\,Н. \quad (2)$$

Для определения численного значения реакций в опорах, необходимо составить и решить систему уравнений (3).

$$\begin{cases} \sum F_x = H_A = 0; \\ \sum M_A = -P * \frac{l}{2} + R_B * l = 0; \\ \sum M_B = -P * \frac{l}{2} + R_A * l = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Составленные уравнения являются условиями равновесия системы. Первое уравнение – уравнение проекций. В уравнении представлены проекции всех сил на ось X.

Откуда:

$$\sum F_x = H_A = 0.$$
$$H_A = 0.$$

Оставшиеся уравнения являются суммами моментов относительно опор A и B соответственно. Решением уравнений будут численные значения сил реакций в опорах R_A, R_B.

Для опоры A:

$$-P * \frac{l}{2} + R_A * l = 0;$$
$$R_A = \frac{P * \frac{l}{2}}{l};$$
$$R_A = \frac{P}{2};$$
$$R_A = \frac{9{,}8H}{2} = 4{,}9H.$$

Для опоры B:

$$-P * \frac{l}{2} + R_B * l = 0;$$
$$R_B = \frac{P * \frac{l}{2}}{l};$$
$$R_B = \frac{P}{2}.$$
$$R_B = \frac{9{,}8H}{2} = 4{,}9H.$$

Для проверки правильности решения составляется уравнение проекций по оси Y:

$$\sum F_y = R_A + R_B - P = 0.$$
$$\sum F_y = R_A + R_B - P = 4{,}9H + 4{,}9H - 9{,}8H = 0. \quad (4)$$

Следовательно, реакции в опорах определены верно.

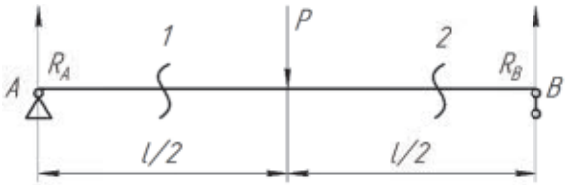


Рисунок 9 — Схема разделения линейной направляющей

При изгибе линейной направляющей, в сечениях возникают поперечная сила Q и изгибающий момент M. Для расчета линейная направляющая разделена на два равных участка 1 и 2, длиной l/2 (см. рис.). Для определения численного значения поперечной силы и изгибающего момента, каждый участок произвольно делиться на два (см. рис. 9).

Для участка №1 численные значения равны:

$$Q_1 = R_A = 4{,}9 \text{ Н}.$$
$$M_1 = R_A * z,$$

где z – расстояние от опоры A до конца участка №1. Рассматриваются 2 случая: z = 0, тогда $M_1 = R_A * 0 = 0$; z = l/2, тогда $M_1 = R_A * l/2 = 4{,}9$ Н * 0,12 м = 0,588 Н*м.

Два полученных значения означают, что эпюра изгибающего момента на участке №1 будет изображена наклонной линией.

Для участка №2 численные значения равны:

$$Q_2 = R_A - P = 4{,}9\ \text{Н} - 9{,}8\ \text{Н} = -4{,}9\ \text{Н}.$$
$$M_2 = R_B * z,$$

где z – расстояние от опоры B до конца участка №2. Рассматриваются 2 случая: z = 0, тогда $M_2 = R_B*0 = 0$; z = l/2, тогда $M_2 = R_B* l/2 = 4{,}9$ Н * 0,12 м = 0,588 Н*м.

Два полученных значения означают, что эпюра изгибающего момента на участке №2 будет изображена наклонной линией.

Эпюры поперечной силы и изгибающего момента представлены на рисунке 10. Линейные направляющие изготавливаются из высоколегированных нержавеющих сталей и подвергаются, зачастую, индукционной закалке. Индукционная закалка обеспечивает большую продолжительность работы и меньший износ. Последним этапом производства линейных направляющих является полировка до шероховатости Ra 0,02 – 0,4.

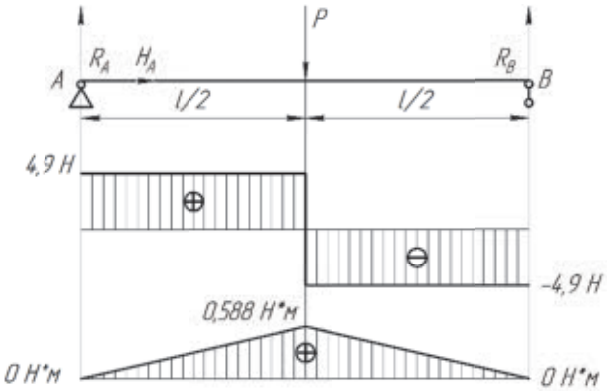


Рисунок 10 — Эпюры поперечной силы и изгибающего момента

Нержавеющая высоколегированная сталь 95Х18 применяется после закалки с низким отпуском, из неё изготавливают в том числе и валы, оси и стержни, к которым предъявляются высокие требования высокой твердости и износостойкости. Сталь, при нормальных условиях, обладает пределом прочности δВ = 770 Мпа. Минимально допустимые размеры поперечного сечения (диаметр, в случае круглого сечения) находится исходя из условия прочности (5).

$$\delta_{max} \le [\delta_B], \tag{5}$$

где δ_B – предел прочности материала, δ_B = 770 МПа; δ_{max} – максимальное напряжение, возникающее в сечении.

Максимальное напряжение в сечении рассчитывается исходя из значения максимального изгибающего момента и момента сопротивления поперечного сечения линейной направляющей.

$$\delta_{max} = \frac{M_{max}}{W}. \tag{6}$$

Т.к. в сечении линейная направляющая является кругом, то момент сопротивления поперечного сечения равен:

$$W_{кр} = \frac{\pi d^3}{32}. \tag{7}$$

Подстановкой выражения (7) в выражение (6) производится упрощение выражения (6):

$$\delta_{max} = \frac{32 * M_{max}}{\pi * d^3}. \quad (8)$$

Выполнив подстановку выражения (8) в условие прочности, получается:

$$\frac{32 * M_{max}}{\pi * d^3} \leq [\delta_B], \quad (9)$$

Из формулы (9) можно выразить диаметр сечения:

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{32 * M_{max}}{\pi * [\delta_B]}}.$$
$$d \geq \sqrt[3]{\frac{32 * 0{,}588\,Н * м * 10^3}{3{,}14 * 770}} = 1{,}984\,мм. \quad (10)$$

Соответственно, минимально допустимый диаметр направляющей 2 мм. Исходя из стандартных диаметров направляющих и линейных подшипников, диаметр направляющей принимается равным 6 мм.

Разработка 3D модели

Разработка 3D модели (см. рис. 11) устройства автоматического управления МКПП и рабочей документации к нему (габаритный чертеж представлен на рис. 12). При разработке за основу брались расчет, упрощённая 3D модель и схема установки устройства в транспортное средство.

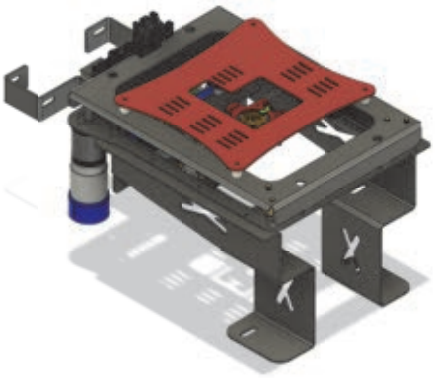


Рисунок 11 — 3D модель устройства автоматического управления МКПП

Основным критерием при разработке устройства было обеспечение технологичности общей конструкции и её составных частей. Конструкция деталей должна удовлетворять не только эксплуатационные требования, но также и требования рационального экономического изготовления изделия. В этом и состоит технологичность конструкции [14]. Чем меньше затрат требуется для изготовления детали, с сохранением её эксплуатационных характеристик, тем более она технологична. К критериям технологичности изделия относится:

- широкое использование унифицированных и стандартизированных деталей и элементов;
- уменьшение количества деталей оригинальной и сложной конструкции;
- создание деталей наиболее рациональной формы, с легкодоступными для обработки поверхностями;
- выбор наиболее рационального способа получения заготовок для деталей;
- упрощение сборочного процесса и возможность выполнения параллельной во времени и пространстве сборки отдельных сборочных единиц.

Исходя из критериев технологичности, приводным ремнем для устройства автоматического управления МКПП был выбран стандартный ремень GT2-6 с шагом в 2мм, толщиной ремня 1,38 мм и высотой зуба 0,75 мм. Также, для уменьшения номенклатуры деталей, был применен один тип шкивов – стандартные, с 20 зубьями и диаметром 12,7 мм. Каркас устройства состоит из четырех деталей, две из которых однотипны (одна из деталей является зеркальным отражением другой, полностью копируя конструкцию). Детали двух кареток, устанавливаемых на ось X, идентичны и взаимозаменяемы. Держатели направляющих одинаковы, но не взаимозаменяемы между направляющими разных осей. Каретка с шаровым шарниром состоит из двух однотипных деталей. Процесс сборки устройства можно разделить на несколько сборочных операций, большинство из которых можно выполнять параллельно. Сборку каретки с шаровым шарниром можно производить параллельно сборке кареток, перемещающихся по оси Y. Установку оси X в сборе, на направляющие оси Y, производить параллельно сборке каркаса всего устройства.

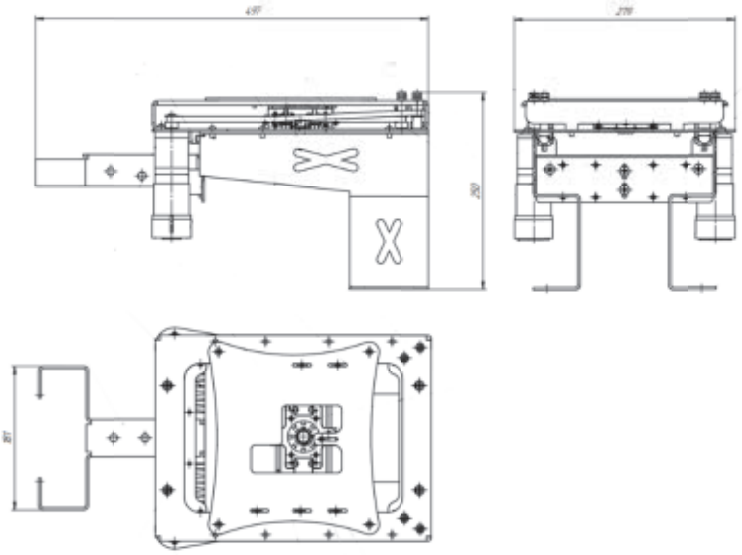


Рисунок 12 — Габаритный чертеж устройства автоматического управления

Заготовки для корпусных и каркасных деталей устройства получают из листовой стали СТ3сп методом лазерной резки. Данный метод экономически эффективней при штучном и малосерийном производстве. Окончательная форма детали придается операцией гибки. Гибка, также является экономически эффективным методом при выпуске единичной или мелкосерийной партии. Т.к. представленное устройство автоматического управления МКПП является экспериментальным образцом, то его выпуск осуществляется в единичном объеме.

Рисунок 13 — Внешний вид установленного на машину устройства

Исходя из описанного выше, можно сделать вывод, что конструкция устройства технологична в мере, достаточной для изготовления единичным (экспериментальным) экземпляром.

В целях облегчения позиционирования рычага, на устройство автоматического управления была разработана пластина с матрицей из 6 датчиков Холла. На торце рычага МКПП был закреплен неодимовый магнит, который отслеживался датчиками. Таким образом, удавалось определять нейтральное среднее положение, нейтральное левое, нейтральное правое, первую передачу, вторую передачу и заднюю передачу (собранное и установленное устройство представлено на рис. 13).

Испытания устройства

Завершающим этапом работ стали испытания разработанного устройства, установленного на серийный автомобиль LADA GRANTA с МКПП. Полевые испытания беспилотного транспорта проводились на полигоне компании «ГАЗ» возле Нижнего Новгорода. Испытания носят название «Робокросс», проводятся ежегодно, начиная с 2010 года и имеют соревновательный характер (автомобиль в ходе испытаний см. рис. 14). В испытаниях могут принимать участие транспортные средства разных типов, от квадроциклов до малотоннажных грузовиков. Командой Ресурсного центра робототехники Донского государственного технического университета был выбран, в качестве экспериментальной платформы, автомобиль LADA GRANTA. GRANTA - самый дешевый серийный автомобиль, который можно приобрести новым.

Рисунок 14 — Автомобиль в ходе испытаний

В рамках данной работы была собрана информация о работе устройства автоматического управления МКПП. Выявлен ряд недостатков, к которым относятся проблемы с растяжением ремня со временем, которая присуща большинству ременных передач. Проблема заключается в сложности перенатяга ремня, которая является конструкторской недоработкой, из-за которой для перенатяга надо разобрать часть каретки оси X. Данная операция требует значительных трудовых и временных затрат. Неудобства вызвала компоновка силовой электроники, доступ к которой был осложнен. Критическим недостатком являлась также скорость переключения передач, порядка 5 секунд на переход из нейтрального положения в передачу. Данная проблема вызвана не кинематическими ограничениями или ошибкой подбора двигателя, а скоростью срабатывания управляющего микроконтроллера на сигналы от датчиков положения. На данных испытаниях, к одному управляющему микроконтроллеру было подключено одновременно 5 устройств. Данное решение сильно повлияло на быстродействие системы. Скорость перемещения исполнительного узла устройства автоматического управления МКПП была программно занижена. Помимо недостатков были выявлены и достоинства. К ним относится стабильность работы, за все время испытаний (5 дней) не было ни одного отказа или ошибки в работе устройства. Также к достоинствам можно отнести неприхотливость в обслуживании устройства. Единственное обслуживание, которое требуется - смазка шарового шарнира и роликов. Помимо недостатков и преимуществ есть и некритичные к использованию замечания по конструкции. Итоговое устройство имеет крупные габариты. В целом по результатам испытаний, устройство автоматиче-

ского управления признано эффективным и работоспособным. Устранение выявленных недостатков и замечаний позволит увеличить скорость функционирования устройства, облегчит его обслуживание и повысит эргономику устройства в частности и автомобиля в целом. Результаты исследования получены в рамках выполнения государственной программы “Приоритет 2030” и будут использоваться в дальнейших работах в области беспилотного транспорта.

Коллектив лабораторий Ресурсного центра робототехники и Научно-исследовательской лаборатории «интеллектуальные электрические сельскохозяйственные машины и комплексы» выражает благодарность Государственной программе поддержки университетов Российской Федерации «Приоритет 2030» и Донскому государственному техническому университету за помощь и поддержку в проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Литература

1. Есть ли будущее у беспилотного транспорта в Европе и в России // Fastmb автожурнал URL: https://fastmb.ru/ (дата обращения: 24.08.2022).

2. Министерство транспорта подготовило проект развития инфраструктуры для беспилотных транспортных средств // TRANS.RU Единый транспортный URL: https://trans.ru/ (дата обращения: 27.08.2022).

3. Беспилотные поезда как пример автономного транспорта // АВТОНЕТ URL: http://rosautonet.ru/ (дата обращения: 25.08.2022).

4. Названа самая массовая профессия в России. // RBC.ru URL: https://rostov.rbc.ru/ (дата обращения: 30.08.2022).

5. Беспилотные автомобили. Состояние рынка, тренды и перспективы развития // iot.ru Новости Интернета вещей URL: https://iot.ru/ (дата обращения: 30.08.2022).

6. Рудаков Д. Беспилотное будущее: зачем бизнесу новый вид транспорта // Forbes URL: https://www.forbes.ru/ (дата обращения: 05.09.2022).

7. Беспилотная техника. Минусы и плюсы // Инжиниринговая компания СНАБРЕМСЕРВИС URL: https://iksrs.ru/ (дата обращения: 09.09.2022).

8. Беспилотные автомобили: объяснение 6 уровней автономности // vc.ru URL: https://vc.ru/ (дата обращения: 17.09.2022).

9. Трифонов Н.Ю., Ливинская В.А., Коржуков В.В. Регрессионная модель оценки автомобилей на основе парсинга интернет-данных // Системный анализ и прикладная информатика. – Минск: 2020. – №2. – С. 4-9.

10.Коновалов А.Б., Гребенникова В. М. Ременные передачи. - учебное пособие. - Санкт-Петербург: СПбГТУРП, 2011. - 106 с.

11.Разновидности кинематик FDM 3D-принтеров // 3DIY Shop URL: https://3d-diy.ru/ (дата обращения: 12.09.2022).

12.Гавшин А.П., Анискович Д.А., Тибейкин В.В. Обзор кинематических схем 3D принтеров // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им В.Г. Шухова. Сборник материалов научно-практической конференции. – Белгород: 2018. – С. 2089-2093.

13.Резунов А.В., Синозерский «Расчет балки на прочность» метод указания: Воронежский ГАСУ, - Воронеж, 2013. 21 с.

14.Егоров М.Е., Дементьев В.И., Дмитриев В.Л., Технология машиностроения. - Учебник для вузов - 2-е изд. - Москва: «Высшая школа», 1976. - 534 с.

Г.М. Исраелян, А.А. Назаров, Е.О. Гаранин

СИНТЕЗ И ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОУРОВНЕВОЙ АРХИТЕКТУРЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ УЗЛАМИ БЕСПИЛОТНОГО ТС

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Israelyan-harry@mail.ru, sasha.nazarov.nazarov@mail.ru, garanin1392@gmail.com

Аннотация

Доклад посвящен разработке системы управления навесными мехатронными модулями, взаимодействующими с органами управления движением ТС. Органы управления включают в себя: педали газа, сцепления, тормоза, рычаг механической КПП и рулевое колесо. Первичной целью разработки было создание системы, которая бы обеспечила возможность телеуправления беспилотного транспортного средства.

Представленная система управления имеет верхний и нижний программно-аппаратные уровни. Связь между ними обеспечивается при помощи последовательных портов и UART-протоколов передачи данных.

Верхний уровень представляет из себя ЭВМ на базе операционной системы Ubuntu 20.04, алгоритмы управления функционируют в среде фреймворка управления роботами ROS2. Нижний уровень составляют несколько микроконтроллеров, которые подключены к сигнальным проводам управления приводами и датчиков обратной связи.

Нижний уровень представлен двумя микроконтроллерами, выполняющие исполнительные задачи. Первый управляет рулевым механизмом за счет воздействия на электроусилитель. Второй обеспечивает должное управление всеми оставшимися подсистемами: педальным узлом, механической коробкой передач, система измерения одометрии – все это выдерживается с помощью установленной операционной системы реального времени FreeRTOS.

Тестирование системы управления проводилось в несколько этапов

Ключевые слова

Робототехника, микроконтроллер, ЭВМ, фреймворк, операционная система реального времени.

H.M. Israelyan, A.A. Nazarov, E.O. Garanin

SYNTHESIS AND APPLICATION OF A MULTI-LEVEL ARCHITECTURE OF AN UNMANNED VEHICLE NODE MANAGEMENT SYSTEM

Don state technical university, Rostov-on-Don, Russia, Israelyan-harry@mail.ru, sasha.nazarov.nazarov@mail.ru, garanin1392@gmail.com

Abstract

The article describes the development of a control system of mechatronic modules, which interact with the controls of vehicle movement. The controls include: gas pedal, clutch pedal, brake pedal, mechanical gearbox lever and steering wheel. The primary goal of the development was to create a system that would enable the telecontrol of an unmanned vehicle.

The presented control system has upper and lower hardware and software levels. Communication between them is provided by means of serial ports and UART data transfer protocols.

The upper level is a computer based on the Ubuntu 20.04 operating system, the control algorithms function in the ROS2 robot control framework environment. The lower level consists of several microcontrollers, which are connected to the actuator control signal wires and feedback sensors.

The lower level is represented by two microcontrollers that perform executive tasks. The first one controls the steering mechanism by acting on the electric power steering. The second provides proper control of

all the remaining subsystems: the pedal assembly, the manual transmission, the odometry measurement system - all this is sustained by the installed real-time operating system FreeRTOS.

Testing of the control system was carried out in several stages

Key words

Robotics, microcontroller, computer, framework, real-time operating system.

Robot Operating System (ROS) — это набор программных библиотек и инструментов для создания приложений роботов. От драйверов и современных алгоритмов до мощных инструментов разработчика, ROS предлагает инструменты с открытым исходным кодом, необходимые для вашего следующего проекта в области робототехники [1]. ROS1 имеет некоторые архитектурные ограничения, которые исправляются во втором поколении. Помимо этого, ROS2 следует индустриальному стандарту и реализует real-time взаимодействие через так называемую концепцию Data Distributed Services (DDS) [2].

Ниже будет описано архитектурное решение по управлению ТС с использованием фреймворка ROS2. Как и полагается в этом случае все алгоритмы будут описаны в разных программах, которые в среде ROS принято называть нодами. Они связываются между собой при помощи топиков - связующие элементы, которые передают сообщения между программами.

Удобство использования фреймворка заключается в том, что сообщения, передаваемые между алгоритмами, имеют определенную структуру, универсальность. То есть некоего рода стандартизацию.

Транспорт разрабатывался для задачи телеуправления. Рассмотрим функциональные требования информационной системы:

Главное требование — это возможность управления движением транспортным средством (ТС) дистанционно, система должна преобразовывать сигналы пульта в параметры движения автомобиля. То есть в этом случае необходимо наличие физического контроллера, посредством которого можно осуществлять управление. В качестве контроллера был выбран геймпад, который подключается к электронно-вычислительной машине (ЭВМ) по Bluetooth.

Производительность в режиме реального времени. Временные границы для внутреннего контура управления задаются боковой и продольной динамикой транспортного средства. Период внутреннего программного контура управления транспортным средством составляет около 10 миллисекунд, что обычно является самым коротким по сравнению с остальными аппаратными и механическими решениями. Чтобы обеспечить стабильный результат управления, задержка должна находиться в диапазоне нескольких микросекунд [3].

Требуется также визуализация изменений состояния автомобиля. Для этого используется колесная одометрия. Все перемещения ТС отражены пользователю на мониторе ЭВМ в программе Robot Visualization (RViz).

К требованиям стоит отнести функцию передачи информации к микроконтроллерам нижнего уровня. Через универсальную последовательную шину к ЭВМ подключаются микроконтроллеры. При помощи Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (UART) - протоколов осуществляется передача информации между нижним и верхним уровнем системы управления. Схема системы управления (см. рис. 1) изображена в графическом виде.

К нефункциональным требованиям отнесем:

Легкость и простота в использовании - необходимо свести процедуру запуска ТС и всего программного и аппаратного обеспечения к минимальному количеству действий. Программное обеспечение верхнего уровня должно запускаться автоматически при старте ЭВМ или при запуске соответствующего приложения и визуализировать все параметры и модель движения ТС.

Надежность - в случае выхода их строя или ошибки какой-либо из программ необходимо обеспечить экстренную остановку ТС, чтобы исключить возможность принесения вреда окружению и самому автомобилю.

Система управления выстроена таким образом, что на верхнем уровне осуществляется формирование требуемой скорости и угла поворота руля ТС. Информация в метрах в секундах и радианах соответственно передается двум микроконтроллерам. В обратную сторону ЭВМ получает текущий угол поворота руля, а также текущую скорость движения автомобиля (вращения задних колес).

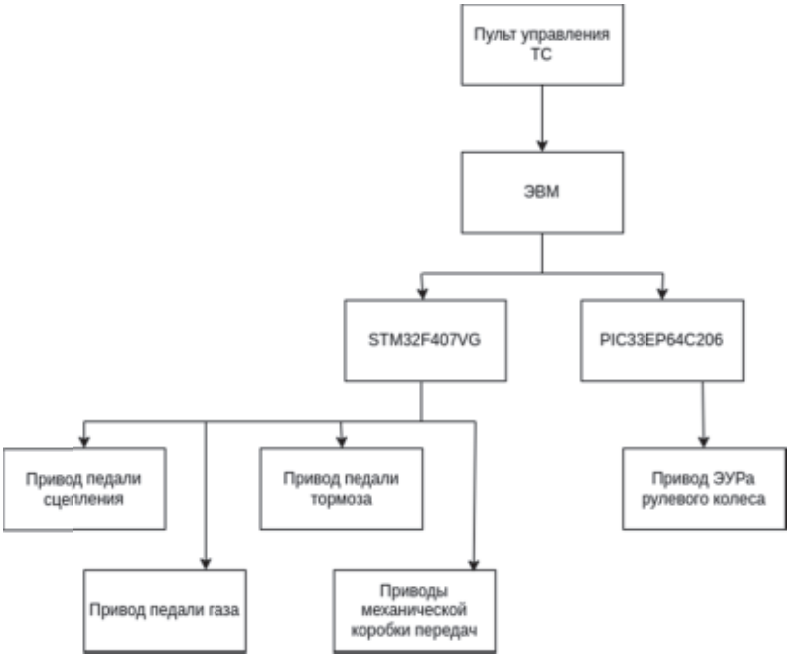


Рисунок 1 — Компоненты системы управления ТС

PIC - контроллер, который является встроенным в драйвер бесколлекторного двигателя, благодаря которому осуществляется вращение рулевого колеса, а, соответственно, и передних колес автомобиля для поворота. Установленный на руле датчик положения возвращает данные о текущем угле поворота руля.

STM - контроллер, который подключен к узлам управления педалями автомобиля и коробкой передач. В зависимости от передаваемой скорости алгоритмы нижнего уровня определяют необходимость переключения передачи, и нажатия необходимой педали, для перехода из режима стоп в режим движения и наоборот. На задних колесах ТС установлены датчики оборотов, микроконтроллер считывает с них данные и преобразует угловые скорости в линейные.

Приводы педалей представляют из себя электрические шаговые двигатели и пневматические цилиндры со штоком, которые осуществляют прямое давление на педали. На механическую коробку передач установлен портальный манипулятор, эффектор которого закреплен непосредственно на ручке переключения передач. Вращение рулем осуществляется при помощи стандартного для автомобиля электроусилителя руля.

Рассмотрим поподробнее архитектуру системы управления в ROS2 (см. рис. 2).

Подпрограмма controller_node — это коммуникатор, который связывается с микроконтроллерами и производит с ними обмен данными. От ноды gamepad_node поступает информация о требуемой скорости движения и положения руля, она записывается в топик /car/output передающим сообщения типа AckermannDrive. Такой тип сообщения содержит в себе значения steering_angle и speed. Обратно коммуникатор присылает данные о текущей скорости и положении угла руля (поскольку система имеет существенные задержки в управлении на механическом уровне) требуется определенное время для изменения параметров движения автомобиля. На основании приходящих данных рассчитывается одометрия, то есть перемещение ТС в пространстве, в глобальной системе координат. Все эти изменения отправляются в топики /tf и /car/odometry.

Программное обеспечение нижнего уровня представляет собой набор управляющих команд, подаваемых на исполнительные элементы ТС: педальная система, узел КПП, блок расчетов перемещения в пространстве. Программа загружается непосредственно в микроконтроллер через стандартные интерфейсы загрузки прошивок (SWD, OpenOCD). В данном случае был задействован микроконтроллер STM32F407VG, работающий на частоте 168 МГц.

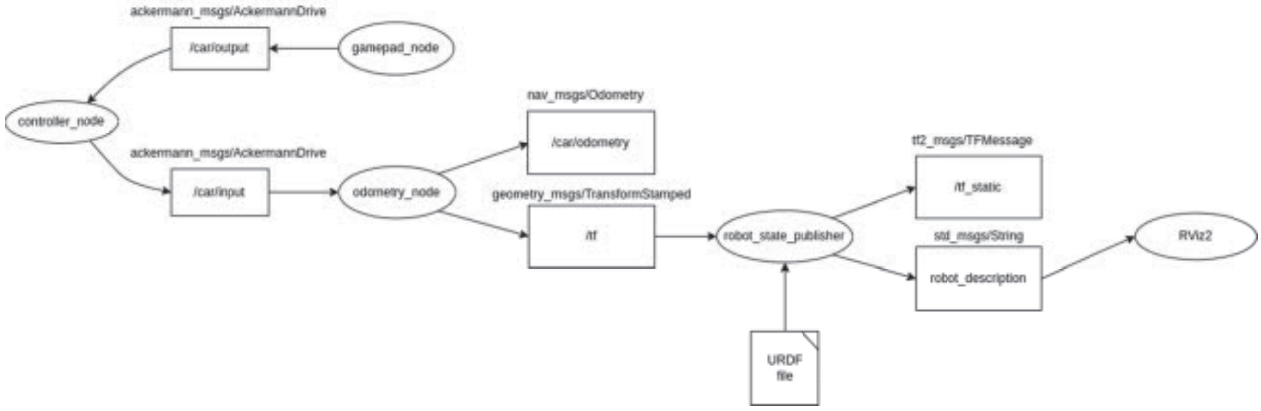


Рисунок 2 — Архитектура системы управления в ROS2

Работа микроконтроллера, в отличие от персонального компьютера, базируется на возможности управление в режиме реального времени, отличается более «жесткими» требованиями из-за ограничений аппаратных ресурсов. Данный контроллер, хоть и имеет 196 Кбайт памяти для хранения программ, но ограничения все равно будут влиять с ростом требований к выдержке по времени и другим параметрам.

Использование операционных систем реального времени (ОСРВ) для микроконтроллеров имеет ряд преимуществ нежели классический вариант последовательно выполняемого алгоритма [4]:

1. Многозадачность. ОСРВ представляет программисту готовый и отлаженный набор инструментов для создания многопоточного программного обеспечения, в котором каждую задачу можно программировать по отдельности, независимо от других. Таким образом, архитектурно можно разделить задачи между несколькими людьми и с максимальной простотой объединить в единый фрагмент кода.
2. Временная база. Большинство ОСРВ представляют интерфейс отчета временного интервала, который необходим для выстраивания и синхронизации программы с различными внешними событиями.
3. Обмен данными между задачами. ОСРВ предоставляют инструмент хранения и передачи данных – очередь. С помощью очередей можно безопасно передавать данные между отдельными задачами.
4. Синхронизация. Если потребуются иные средства синхронизации событий с задачами, то существуют ряд возможностей, реализованных в ОСРВ: мьютексы для управления обращениями нескольких задач к одному ресурсу, семафоры для выполнения группы действий по наступлению ключевого события действия программы.

В данном проекте была задействована ОСРВ FreeRTOS, которая является одной из популярных и конкурентоспособных систем, которое является полностью бесплатных для некоммерческого и коммерческого распространения [5].

Архитектурная структура управления подсистемой нижнего уровня (см. рис. 3) транспортного средства представлена несколькими блоками. Основным и начальным блоков является стартовая задача (vStartTask), которая инициирует запуск исполнительных задач и различных обработчиков и группы событий (EventGroup). Через обработчик прерывания интерфейса обмена данными (UART Interrupt Handler) считываются данные с регистра хранения и регистрируются блоком ожидания сообщений (vWaitingEvent). При успешном приеме пакета с данными задача-обработчик(vModBusManagement) переходит в активное состояние и производит проверку на целост-

ность данных. Задача-сторож(vSecurityMemoryManagement) получает обработанные данные и, чтобы обеспечить выдержку по скорости, отправляет команды задачам-исполнителям.

Рисунок 3 — Архитектурная структура алгоритма нижнего уровня

Во время выполнения основного цикла программы задачи-исполнители и обработчик занимают все процессорное время. Под исполнителями подразумеваются управление педальным узлом, рулевой рейкой и механической коробкой передач. Помимо исполнительных задач, для отслеживания перемещений всех узлов используются аппаратные внешние (External) и прерывания по таймеру.

Частота таймера находится по формуле (1):

$$f_{timer} = \frac{f_{bus}}{(PSC+1)\times ARR}, где \quad (1)$$

f_{bus} – частота шины, используемая в качестве ресурса для выбранного таймера, Гц; PSC – предделитель таймера, Регистровые единицы; ARR – период таймера (значение регистра заполнения), Регистровые единицы.

Расчет одометрии транспортного средства используется с таймером, настроенным на частоту $f_{timer} = 10\,Гц$. Для этого были найдены значения предделителя и заполнения согласно следующему алгоритму:

1. Используемый микроконтроллер STM32F407 имеет частоту по шине таймером №7 $f_{bus} = 42\,МГц.$

2. Предделитель таймера подбирался из соображений максимального значения в соответствии с разрядностью: таймер имеет 16-разрядные регистры prescaler (PSC) и auto-reset register (ARR), поэтому значения не должны превышать 65535 единиц. В данном случае значение для предделителя было выбрано равным 419 единиц.

3. Согласно формуле (2) было найдено численное значение периода:

$$ARR = \frac{f_{bus}}{f_{timer} \times (PSC + 1)},$$

$$ARR = \frac{420000000}{10 \times (419 + 1)},$$

$$ARR = \frac{42000000}{4200} = 10000\,ед.$$

Значения были успешно записаны в регистры и таким образом таймер для отчета времени был настроен на 10 Гц. Другой таймер, настроенный на режим считывания импульсов с энкодера позволяет получить точное значение перемещения в дискретном формате, которое в дальнейшем обрабатывается и преобразуется в единицы перемещения и скорости.

Для расчета скорости использовался обыкновенный дискретный высокочастотный метод обработки по следующей формуле:

$$v = \frac{Sum \times StepWheel}{T_{timer}}, где \qquad (2)$$

Sum – среднее арифметическое количество импульсов с левого и правого колеса; $StepWheel$ – длина шага срабатывания магнитного датчика, определяющийся по формуле (3):

$$StepWheel = \frac{2 \times \pi \times R}{n}, где \qquad (3)$$

$R = 280\,мм$ – радиус колеса транспортного средства; $n = 48$ – количество магнитов, находящихся в кодировочном диске.

Следовательно, значение шага согласно формуле равно:

$$StepWheel = \frac{2 \times 3{,}14157 \times 0{,}28}{48} = 0{,}03665\,м.$$

$$T_{timer} = \frac{1}{f_{timer}} = 0{,}1\,с. - период\,отсчета\,(настроенный\,таймер\,на\,10\,Гц);$$

Синтезированное математическое обоснование было интегрировано в программный код и протестировано на ТС, поднятое на стойки для безопасности эксперимента. Ввиду отсутствия оптимальных средств оценивания скорости вращения приводных колес эксперимент проводился с замером расстояния, которое ТС должно пройти. В рамках тестирования совершался ровно один оборот колеса (регистрировалось по специальному нарисованному маркеру), затем оценивается степень приближенности расчетного и реального значения (см. рис. 4) – при ошибке менее 5% можно считать, что метод достоверный.

Приведенный график показывает пригодные для полевого тестирования данные: погрешность вычисления составляет в среднем 1,3%. Следовательно, данный метод подходит к использованию.

Управление коробкой передач происходило за счет двух электроприводов, находящихся в сопряжении с ременной системой. Воздействие напрямую через силовой драйвер приводило к тому, что селектор передач перемещался со смещением. Причина этого – неравнозначная скорость каждого из приводов. Одним из предлагаемых решений является программная модификация управляющего алгоритма пропорционально-интегрально-дифференциальным (ПИД) регулятором.

Регулятор скорости был интегрирован в проект и обрабатывался со интервалами отсчета времени 100 Гц. Для этого был использован таймер №7, расчет которого был произведен по аналогии с вышеприведенным методом настройки. Далее, калибровка значений коэффициентов регулятора была осуществлена простым эмпирическим и методом Зиглера [6, с.22].

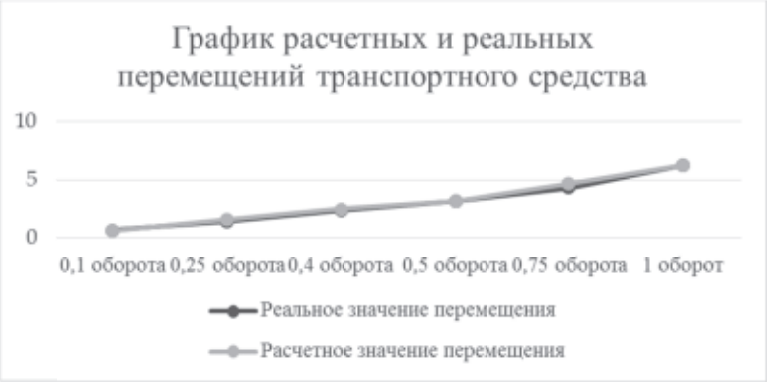


Рисунок 4 — График перемещений ТС при обычной скорости

В случае простого эмпирического метода были произведены следующие действия:

1. Коэффициенты интегральной и дифференциальной составляющей обнулены. Пропорциональный коэффициент был увеличен в 10 раз и постепенно уменьшался на 1-2 единицы до тех пор, пока не было замечено заметное уменьшение вибрации.

2. Интегральная составляющая в начальном приближении была выбрана в значении 0,1. Постепенно увеличение на шаг 0,1 единиц осуществлялось до тех пор, пока не наступит запаздывание срабатывания. В итоге при нулевом значении система управления не должна была совершать колебаний.

3. Дифференциальный коэффициент был введен из соображений несущественно малых колебаний (зарегистрировано отладчиком программного кода). В начальном приближении значение установлено равным 0,1. Далее нарастание производилось с шагом 0,02 до тех пор, пока не возникают ошибочные колебания, вызванные малыми шумами.

Итоговые коэффициенты для двух электроприводов отражены в сводной таблице (см. таблицу 1):

Таблица 1 — Сводная таблица коэффициентов ПИД-регулятора (простой эмпирический метод)

Название параметра	Электродвигатель № 1	Электродвигатель № 2
Пропорциональный коэффициент	1,3	1,2
Интегральный коэффициент	0,27	0,29
Дифференциальный коэффициент	0,15	0,15

После проведенного тестирования ПИД-регулятора передвижение селектора передач осуществлялось с большей точностью: движения в вертикальном и горизонтальном направлении не приводили к диагональным смещениям.

Однако, в рамках улучшения качества движения селектора был задействован метод эмпирический метод Зиглера. Он не гарантирует оптимальных результатов, однако на практике используется для быстрой настройки и показывает себя лучше привычного классического эмпирического метода. Суть метода заключается в измерении периода устойчивых и незатухающих колебаний T. После измерения периода коэффициенты станет возможным определить по формулам 4,5 и 6.

Итоговый пропорциональный коэффициент:

$$K_p = 0,6 \times K_0, \text{ где} \quad (4)$$

K_0 – значение пропорционального коэффициента, при достижении которого были зарегистрированы незатухающие колебания.

Итоговый интегральный коэффициент:

$$K_i = \frac{2 \times K_p}{T}. \quad (5)$$

Итоговый дифференциальный коэффициент:

$$K_d = \frac{2 \times T}{8}. \quad (6)$$

Критический период при незатухающих колебаниях регистрируется, в рамках проекта, с помощью системного 24-разрядного таймера, способного осуществлять измерения вплоть до 1 миллисекунды. В ходе проведенного второго эксперимента с ПИД-регулятором удалось обеспечить следующую конфигурацию (см. таблицу 2):

Таблица 2 — Сводная таблица коэффициентов ПИД-регулятора (эмпирический метод Зиглера)

Название параметра	**Электродвигатель №1**	**Электродвигатель №2**
Пропорциональный коэффициент	1,2	1,26
Интегральный коэффициент	4,1	4,2
Дифференциальный коэффициент	0,15	0,15

Результат расчетов второго метода был протестирован на коробке передач. Различия в интегральной составляющей приводят к задержке срабатывания регулятора, поэтому коэффициенты были подстроены под первым метод, показавший безотказную работу.

Результирующая траектория движения селектора коробки передач автомобиля была приемлемой для переключения в нейтральную, первую и заднюю передачу. В рамках участия всероссийских испытаниях беспилотного транспорта «РОБОКРОСС 2022» не требовалось переключение в остальные передачи ввиду максимально допускаемой скорости движения 20 км/ч.

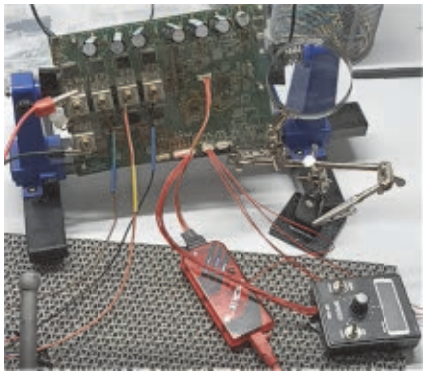


Рисунок 5 — Прототип драйвера для управления электроусилителем

Управление рулевой рейкой осуществляется с помощью электроусилителя руля. Интегрированный блок управления, через который изначально планировалось передавать воздействие, должен иметь возможность связи с электронным блоком управления (ЭБУ) транспортного средства. В противном случае блок управления перейдет в защищенное состояние, в котором невозможна передача управляющих сигналов. В связи с ограниченными сроками реализации, драйвер было решено заменить на прототип (см. рис. 5), который был разработан научно-исследовательской лабораторией «Интеллектуальные Электрические Сельскохозяйственные Машины и Комплексы» (НИЛ «ИЭСМиК») старшим научным сотрудником – Назаренко Дмитрием Владимировичем.

Как видно из рисунка, драйвер представляет собой отладочный вариант, в доступе предоставляется два последовательных порта, через которые осуществляется управление и отладка.

Устройство необходимо было оснастить протоколом, по которому станет возможным обмен с подсистемой высшего уровня. Был выбран модифицированный протокол ModBus ASCII, представляющий собой символы и знаки, по которым можно отслеживать отправляемые между устройствами управляющие сообщения. ROS2 передаёт на драйвер целевой угол в радианах, а привод ЭУРа выпол-

няет регулировку своего положения, стремясь к целевому значению угла. Также в узел установлен магнитный энкодер AS5040, работающий в абсолютном режиме, который через зубчатую передачу преобразовывает 4,2 оборота руля в 1 оборот энкодера. Сделано это для того, чтобы всегда знать точное положение руля и передних колёс в конкретный момент времени и отслеживать ошибки программы. Нельзя не принять во внимание, что при достаточно мощном двигателе, электроусилитель, разрабатывался и применялся в штатном режиме как вспомогательный элемент для водителя автотранспорта. Поэтому, не реализован в полной мере отлаженный алгоритм вращения рулевой подсистемы при полностью остановленном ТС.

Для проверки целостности сообщений использовалась контрольная сумма режима ASCII – LRC (Longitudinal Redundancy Check), представляющая собой восьмиразрядное число, передаваемое как два символа [7]. Для её вычисления используется формула (7):

$$LRC = (0xFF - Sum) + 0x1, где \quad (7)$$

Sum – младшие 8 бит от суммы всех данных в сообщении, кроме стартового байта 0x3A.

Алгоритм работы системы нижнего уровня (см. рис. 6) после реализации всех выше оговорённых функций содержит участок самотестирования подсистем и основной рабочий режим. Частые переключения между задачами и промежуток бездействия – следствие задержек при перемещении всей механики комплекса. Была использована структура булевых переменных, выступающая ограничителем параллелизма, во избежание переходных процессов в механике, приводящей к глушению двигателя.

Перед заездом, по регламенту необходимо было устанавливать все подсистемы в штатное положение (нейтральная передача, тормоз нажат), поэтому в алгоритм введен сценарий проверки всех подсистем (Self-test). Все проверки и манипуляции выполняются перед запуском протокола ModBus во избежание получения управляющих команд в систему до команды на старт судьей.

Получение такого результата было осуществлено с помощью 11 задач, среди которых одна стартовая, которая не участвует в основном участке выполнения алгоритма. Было использовано 5 очередей для передачи управления между задачами. Использовалась структура EventGroups для передачи между задачами флагов готовности, препятствующих выполнению каких-либо действий до того момента, когда это необходимо. Итоговый размер программы (память программы и память для данных) составляется 112 кБайт, что составило 57% от общего объёма оперативной памяти.

Имея модель робота в универсальном формате, который поддерживает ROS2 можно получить визуализацию перемещений ТС и изменение состояния его колес в RViz.

Здесь одометрия помогает выполнять исключительно визуальную функцию - отображение движения на мониторе ЭВМ. Однако проверка работы датчиков обратной связи и корректности алгоритмов одометрии необходима, в случае дальнейшей разработки автопилотируемого ТС.

Отладка ПО производилась несколькими способами:

Во-первых, была разработана симуляция в программе Gazebo. Таким образом, можно было проверить работоспособность подпрограмм управления ЭВМ. При помощи пульта управления осуществлять перемещение 3Д модели автомобиля в симуляции (см. рис. 7). Благодаря этому, можно выяснить корректность работы пульта и программы обработки данных с него, также корректность алгоритмов построения одометрии.

Во-вторых, физическое ТС, расположенное в гараже лаборатории было установлено на опорные стойки, таким образом, что все четыре колеса были подвешены в воздухе и можно было запускать двигатель и начинать их вращение без перемещения ТС в пространстве. На этом этапе удалось исправить все ошибки связанные с программой связи с микроконтроллерами. Также посчитаны примерные задержки (см. рис. 8) в механическом переключении передач и состояний педалей приводами.

Эти задержки объясняются недостаточно мощными приводами механической части ввиду чего, для достижения необходимых усилий нажатий, требовалась установка редукторов, которые, соответ-

ственно, снижают скорость. Проблема заключалась в том, что ТС оборудована учебным комплектом педалей. Стандартные усилия, которые необходимы для нажатия педалей легкового автомобиля находятся в районе 10-20 кг, в то время как учебные педали, ввиду особенностей механических связей, требуют усилия от 35 до 45 кг.

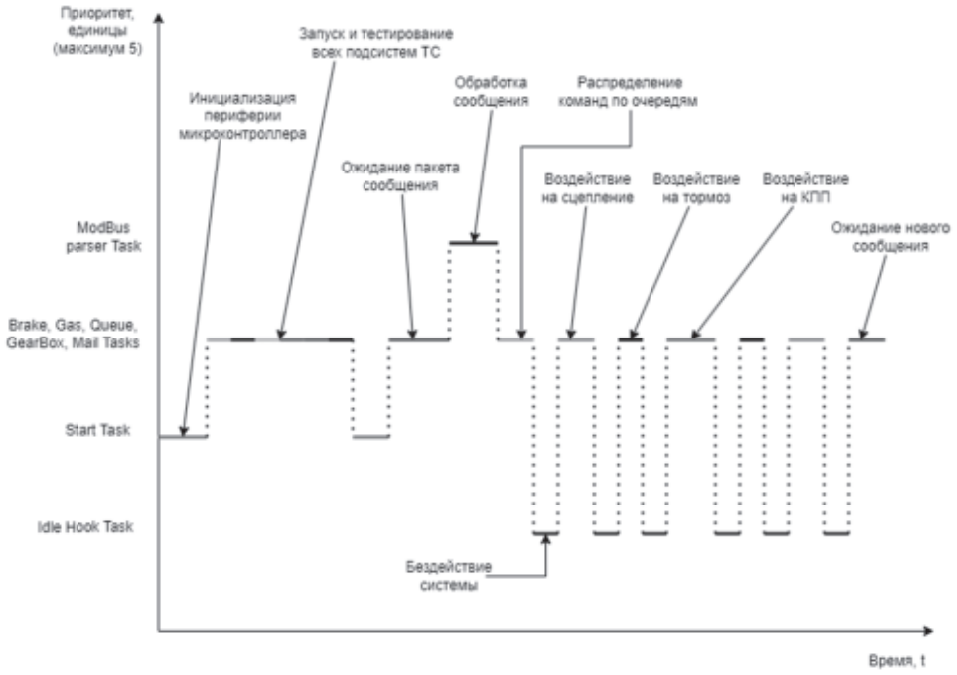


Рисунок 6 — График распределения процессорного времени между задачами

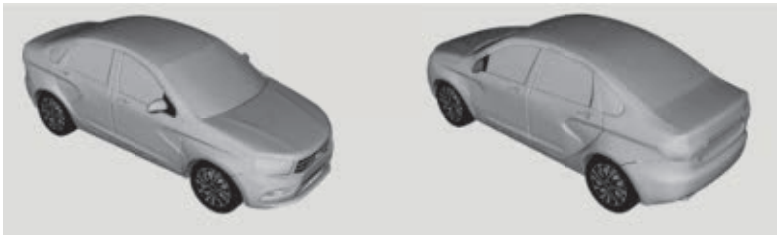


Рисунок 7 — 3Д модель ТС в среде симуляции Gazebo

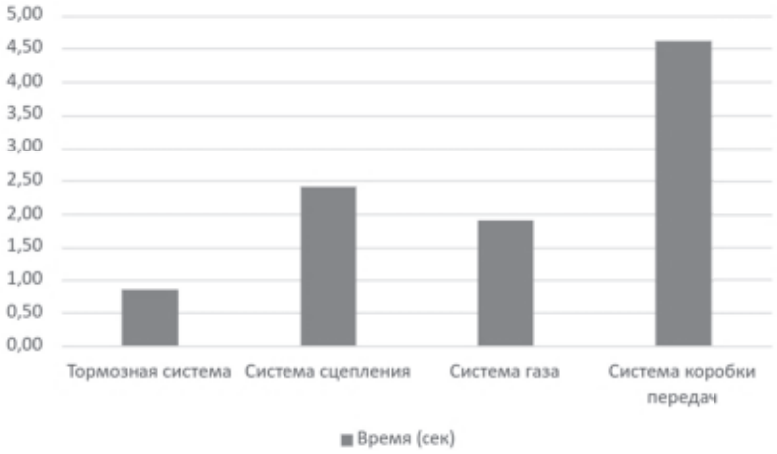


Рисунок 8 — Время переключения состояний механических узлов ТС

Последним этапом отладки и одновременно тестирования послужило участие в испытаниях РОБОКРОСС2022 – полевых испытаниях беспилотных робототехнических систем, где ТС выполняют задания на специально оборудованной трассе. Основным заданием является проезд испытательной трассы в

двух направлениях, объезжая произвольно расставленные препятствия. Дополнительная часть Испытаний предлагает задания по разработке и тестированию систем ADAS (Advanced Driver Assistance Systems, Системы активной помощи водителю), установленных на ТС параллельно с основной робототехнической системой или являющихся частью основной робототехнической системы [8].

Благодарность выражается Донскому государственному техническому университету за поддержку и предоставленную возможность проводить исследование и разработку. Также выражаем благодарность государственной грантовой программе «Приоритет 2030» за предоставленную материальную поддержку разработок в области беспилотных ТС. Команда также выражает огромную благодарность старшему научному сотруднику НИЛ “ИЭСМиК” Назаренко Дмитрию Владимировичу за оказанную поддержку и предоставление законченного устройства – блока управления рулевой рейкой ТС.

В заключение отметим, что в этой статье была представлена архитектура системы управления ТС для телеуправления. Система все еще находится на стадии разработки, все описанные тесты лишь помогли исправить некоторые проблемы, а также проверить соблюдение всех функциональных и нефункциональных требований. Однако все полученные результаты послужат хорошей помощью для перехода к разработке автопилотируемого ТС. ROS2 проявил себя как хороший фреймворк для работы с поведением робота в реальном времени. Переход на него оказался правильным решением, которое существенно сократило время на разработку и другие ресурсы. В будущем планируется и дальше использовать ROS2 в разработке. Участие в данных испытаниях рассматривалось как вводный пункт развития проекта. На подготовку к участию было отведено 4 месяца, что несравненно мало по сравнению с функционалом, которого удалось достичь. Основная цель, преследуемая в рамках участия – продемонстрировать безотказную работу механических элементов автомобиля. В ходе испытаний удалось протестировать в реальных условиях работу одометрии, выяснились проблемы, связанные с ошибками в расчетах перемещений. Задержки оказались крайне ощутимы на полигоне и стали бы большой проблемой в случае использования автопилота для движения по полигону.

Следующим этапов разработки планируется увеличение модульности системы, а в качестве нового протокола передачи данных использовать стандартизированный набор сообщений, предоставляемый фреймворком Micro-ROS. Улучшение показателей движения и ориентации предполагается осуществить с использованием программного пакета MatLab для достижения более качественного движения как отдельно взятых элементов, так и всего транспортного средства.

Литература

1. ROS2 Documentation // ROS2 Documentation: Foxy URL: https://docs.ros.org/en/foxy/index.html (дата обращения: 11.07.2022).

2. ROS2 vs ROS1.Установка ROS2 на Ubuntu 18.04 // Habr URL: https://habr.com/ru/post/492058/ (дата обращения: 13.08.2022).

3. Reke M., Peter D., Schulte-Tigges J., Schiffer S., Ferrein A., Walter T., Matheis D. A Self-Driving Car Architecture in ROS2 // Computer Science / 2020 International SAUPEC/RobMech/PRASA Conference. - IEEE, 2020.

4. Курниц Андрей FreeRTOS - операционная система для микроконтроллеров // Компоненты и Технологии. 2011. №9 (122). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/freertos-operatsionnaya-sistema-dlya-mikrokontrollerov-4 (дата обращения: 13.06.2022).

5. FreeRTOS Real-time operating system for microcontrollers // FreeRTOS - Market leading RTOS for microcontrollers URL: https://www.freertos.org/ (дата обращения: 15.07.2022).

6. Карпов В.Э. ПИД-управление в нестрогом изложении. - НИИ Информационные технологии, 2012. - 27 с.

7. ModBus Technical Resources // ModBus URL: https://modbus.org (дата обращения: 08.07.2022).

8. РОБОКРОСС // RussianRobotics URL: https://www.russianrobotics.ru/competition/robocros/ (дата обращения: 08.07.2022).

А.В. Михайличенко, И.Б. Паращук

НАДЕЖНОСТЬ КОМПОНЕНТОВ ХРАНЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НАЗЕМНЫМИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, Санкт-Петербург, shchuk@rambler.ru

Аннотация

Исследования посвящены анализу современных научно-практических подходов к совершенствованию методологии и инструментария оценки надежности компонентов хранения и обработки данных для систем управления наземными робототехническими комплексами военного назначения. Основное содержание материалов доклада составляет анализ объекта исследования, анализ планируемого к применению математического аппарата гранулярных вычислений и предварительное описание возможных этапов синтеза системы параметров надежности и оценки надежности средств хранения и обработки данных для повышения достоверности управления боевыми роботами в различных условиях обстановки и с учетом различных аспектов неопределенности (нечеткости) и зашумленности исходных данных о текущих и прогнозных значениях параметров технической надежности объектов такого класса.

Ключевые слова

Надежность, оценка, компоненты хранения и обработки данных, система, управление, робототехнический комплекс, гранулярные вычисления.

A.V. Mikhailichenko, I.B. Parashchuk

RELIABILITY OF DATA STORAGE AND PROCESSING COMPONENTS FOR CONTROL SYSTEMS OF GROUND-BASED ROBOTIC COMPLEXES FOR MILITARY PURPOSES

Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia, shchuk@rambler.ru

Abstract

The research is devoted to the analysis of modern scientific and practical approaches to improving the methodology and tools for assessing the reliability of data storage and processing components for control systems of ground-based robotic complexes for military purposes. The main content of the materials of the report is an analysis of the object of research, an analysis of the mathematical apparatus of granular computing planned for use and a preliminary description of the possible stages of the synthesis of a system of reliability parameters and evaluation of reliability of data storage and processing facilities to increase the reliability of control of combat robots in various conditions and taking into account various aspects of uncertainty (fuzziness) and noisy of the initial data on current and forecast values of parameters of technical reliability of objects of this class.

Key words

Reliability, evaluation, data storage and processing components, system, control, robotics complex, granular computing.

Военно-политическая обстановка, сложившаяся в современном мире, объективно требует принятия срочных мер в плане построения и совершенствования наземных робототехнических комплексов (НРТК) военного назначения (ВН), а также систем управления такими уникальными силами и средствами вооруженной борьбы [1, 2]. В этой связи наиболее актуальными являются задачи доведения оперативной боевой управляющей информации до всех НРТК ВН в кротчайшие сроки и с требуемым качеством. Именно поэтому все большее значение приобретает необходимость перехода на каче-

ственно иной, новый уровень управления робототехническими комплексами, все более возрастает важность включения НРТК ВН в единое информационно-разведывательное пространство поля боя. Необходимым условием для обеспечения своевременного и точного управления НРТК ВН является построение и использование новейших, современных систем управления такими объектами, базирующихся на последних мировых и отечественных достижениях в IT-сфере и в кибернетике.

Важность и актуальность этой задачи обусловлена тем, что в настоящее время практически все разрабатываемые и принятые на вооружение НРТК ВН используются в режиме дистанционного управления. Опыт применения таких роботов в Сирии и во время специальной военной операции на территории Украины показал их высокую эффективность, они способны осуществлять разведку обстановки на поле боя, поиск и выбор цели, стрельбу и анализ ее результатов, принятие решений по разминированию и собственно разминирование, и многое другое.

Однако, сложные опасные условия их работы показали, что, во-первых, трудно управлять боевым роботом или группой роботов ВН с рабочего места полевого оператора, без системы поддержки принятия решений по управлению, тем более, с учетом противоборства, а во-вторых, даже при наличии систем управления НРТК ВН, невозможно прогнозировать технические отказы таких систем управления и их компонентов при работе именно в экстремальных ситуациях или на чрезвычайно «трудных» территориях (территориях природных пожаров и иных стихийных бедствий, пустыня, Арктика и т.п.). Все это подчеркивает тот факт, что все большую значимость приобретают научно-практические направления исследований, ориентированные на разработку высокотехнологичных и отказоустойчивых систем управления (СУ) как обычных экстремальных робототехнических комплексов, так и НРТК ВН [1-6].

Ключевыми компонентами таких систем управления являются аппаратно-программные средства хранения и обработки данных (ХОД). Компоненты ХОД для СУ НРТК ВН – взаимосвязанная совокупность организационных и аппаратно-программных средств, предназначенных для создания высокопроизводительной и отказоустойчивой инфраструктуры, отвечающей за обработку и хранение контрольной (управляющей) информации. При этом внимание специалистов в сфере построения единого информационно-разведывательного пространства поля боя и специалистов в сфере военной кибернетики и робототехники сегодня сосредоточено на поиске новых технических и программных решений по хранению и обработке больших массивов данных, приближенных к местам боевых действий, к местам сосредоточения сил и средств вооруженной борьбы и систем управления ими, включая районы непосредственного боевого применения НРТК ВН.

И это не удивительно, поскольку мобильность и компактность средств ХОД для СУ НРТК ВН (в интересах доступности данных и команд управления в любом месте боевого применения таких комплексов) и кросс-платформенная переносимость данных все более востребованы современными высокотехнологичными роботизированными силами и средствами вооруженной борьбы. Это обуславливает актуальность разработки и внедрения в интересах СУ НРТК ВН гибких и масштабируемых систем хранения и обработки данных, таких, как мобильные (переносимые) мини-центры обработки данных (мини дата-центры) или современные дисковые средства ХОД [7-9].

При этом компоненты ХОД способны хранить и обрабатывать большие массивы контрольной (управленческой) информации, позволяют организовать рациональное содержание (сохранение) данных и процедуры манипулирования этой информацией как на блейд-серверах («лезвиях») мини дата-центров в составе СУ НРТК ВН, так и на отдельных дисковых площадках СУ с оптимальным распределением ресурсов хранения и обработки.

Компоненты ХОД для СУ НРТК ВН способны хранить и обрабатывать различную информацию, необходимую для управления роботизированными силами и средствами вооруженной борьбы – сценарии (скрипты) протоколов управления боевыми роботами, наборы (коды) команд, файлы, в том числе медиа, структурированные (СУБД) и неструктурированные данные (Big Data), архивы и резервные копии.

Особенно актуально это для компонентов ХОД военного назначения, в интересах обеспечения

управления НРТК ВН вычислительными мощностями и ресурсами хранения данных в труднодоступных регионах, а также в тропических и пустынных районах ведения боевых действий. Компоненты ХОД для СУ НРТК ВН способны работать в широком диапазоне температур, от жаркой пустыни до арктических холодов, и даже в зонах с высокой сейсмоактивностью. Кроме того, компоненты ХОД для СУ НРТК ВН в большинстве – герметичны, а потому их можно перемещать, например, по грунтовым дорогам, морским (речным) или авиатранспортом.

Иными словами, компоненты ХОД являются важным и эффективным инструментом в военной информационной инфраструктуре для боевой (экстремальной) робототехники, а от их качества и технической надежности многое зависит в устойчивом, непрерывном, оперативном и скрытном управлении НРТК ВН. Вместе с тем, пока не существует единого подхода в вопросах управления качеством компонентов ХОД для СУ НРТК ВН и в вопросах оценки и обеспечения их надежности. Эти обстоятельства делают, безусловно, актуальной проблему выработки системного подхода в вопросах оценки и обеспечения надежности компонентов ХОД для СУ НРТК ВН, а также задачу разработки моделей и методов повышения технической надежности таких объектов.

В роли носителей контрольной (управленческой) информации, т.е., в качестве аппаратных средств ХОД для НРТК ВН, могут выступать современные технические решения. Например, это могут быть жесткие диски, в основном типа SSD (системы All Flash Array), а также гибридные решения, сочетающие SSD- и HDD-накопители в одном компоненте ХОД, которые, безусловно, должны обладать высоким уровнем технической надежности.

Именно поэтому выбор оптимального множества анализируемых параметров безотказности, долговечности и ремонтопригодности компонентов ХОД в интересах комплексного контроля надежности таких объектов при их применении в составе СУ НРТК ВН, является актуальной и первостепенной задачей.

Эта задача является важным элементом и этапом решения проблемы создания достоверных и оперативных механизмов и математических методов оценки надежности, которые позволят максимально точно, в отведенные сроки, многокритериально и достоверно оценить надежность компонентов ХОД. При этом оценка надежности компонентов ХОД должна происходить с учетом динамики изменения условий их боевого (и иного экстремального) применения, а также с учетом неопределенности и зашумленности исходных данных, необходимых для принятия решения по оценке и проактивному управлению надежностью компонентов ХОД для СУ НРТК ВН.

Неопределенность – недостаточная осведомленность лиц и систем, принимающих решения по оценке состояния и управлению НРТК ВН. Это неполное или неточное представление о значениях различных параметров надежности компонентов ХОД, порождаемых различными причинами и, прежде всего, неполнотой, нечеткостью или неточностью информации об условиях реализации оценки, в том числе связанных: со средой применения НРТК ВН, со стохастичностью поведения объекта анализа, с опытом должностных лиц органов и систем управления НРТК ВН, с нестабильностью условий оценки состояния (надежности) и управления НРТК ВН, с нестабильностью параметров самого процесса оценки надежности компонентов ХОД, с нечеткостью, неполнотой и противоречивостью наблюдаемых (измеряемых) данных о параметрах надежности компонентов ХОД для СУ НРТК ВН [10]. Зашумленными данными (наблюдения, измерения) принято считать данные, которые повреждены, искажены или имеют низкое отношение сигнал/шум. Это, так называемые «поврежденные» данные о значениях параметров надежности, данные с большим количеством дополнительной, ненужной для анализа надежности (бессмысленной) информации, часто называемой «шумом» [11]. Поэтому задачи оценки надежности сложных технических объектов в составе контура управления боевыми роботами приобретают особую актуальность в условиях, когда присутствует различного рода неопределенность как задания (формулировки) самих параметров надежности (ПН) компонентов ХОД, так и неопределенность данных наблюдения (измерения) за значениями этих ПН в динамике жизненного цикла СУ НРТК ВН. Подобные задачи обычно решаются поэтапно, отдельно для каждого вида неопределенности и с помощью методов теории нечетких множеств, теории искусственных нейронных сетей или нейро-нечетких вычислений [10].

Вместе с тем, неопределенность и зашумленность исходных данных, важных для обобщенной, комплексной оценки надежности компонентов ХОД для СУ НРТК ВН (с одновременным учетом всех видов неопределенности и зашумленности данных), обуславливает необходимость привлечения для задач анализа новых методов и средств, например, таких, как применяемые в рамках интеллектуальной обработки данных математические методы гранулярных вычислений [12].

Сущность «гранулярной» оценки надежности компонентов ХОД для СУ НРТК ВН заключается в следующем. Данные, которые используются в задачах оценки надежности сложных технических систем, зачастую носят неопределенный, нечеткий, но формализованный, не зашумленный, упорядоченный характер. Нечеткие данные могут быть описаны (наблюдаемы) как точные, формализованные и однозначные лингвистические переменные и функции принадлежности, а могут иметь большую размерность (избыточность) и быть неточными, зашумленными.

В этом случае могут и должны быть сформированы массивы данных, характеризующие степень принадлежности или не принадлежности конкретного параметра надежности компонентов ХОД для СУ НРТК ВН к некому конкретному множеству. Причем, ввиду большого объема, ошибок наблюдения (измерения, прогнозирования, идентификации), неупорядоченности и слабой формализованности, эти данные могут иметь некоторый «разброс» значений. При этом сложно, а порою невозможно определить точные границы разрозненных множеств (массивов) данных. Иными словами, эти данные не только неопределенные, нечеткие, но и неточные, зашумленные [13].

Для преодоления данных проблем в рамках оценки надежности компонентов ХОД для СУ НРТК ВН предлагается использовать современные «гранулярные» математические подходы, нацеленные на слияние массивов нечетко заданных, зашумленных данных в группы (информационные «гранулы») по принципу семантического и функционального сходства и на математически корректную обработку этих данных в интересах повышения достоверности анализа и принятия решений. Таким образом, предварительный анализ результатов современных исследований показывает, что для решения задач оценки надежности компонентов ХОД для СУ НРТК и формирования точных, формализованных и однозначных значений (на основе нечетких знаний) исходных данных для такой оценки надежности, могут использоваться математические методы и алгоритмы гранулярных вычислений (ГрВ) [12, 13].

Гранулярные вычисления часто называют нечетко-гранулярными (fuzzy-granular computing), причем в рамках решения подобных задач также говорят о «неточных множествах», как о широко известных в настоящее время подходах к гранулированию информации. При этом под гранулой понимается группа информационных объектов (данных), объединяемых неразличимостью, сходством, близостью, т.е. отношениями, обладающими, по крайней мере, свойствами симметричности и рефлексивности. Термин «гранула» означает динамическую целостную информационную структуру, организованную для достижения некоторой цели, а гранулярные вычисления (методы математической обработки и преобразования информационных гранул) применяются наряду с методами обработки нечеткой информации [12, 13].

Гранулярные вычисления могут быть использованы еще на этапе синтеза подсистемы параметров надежности (ПН) компонентов ХОД для СУ НРТК ВН. Алгоритмы ГрВ позволяют выбрать оптимальные объем и номенклатуру оцениваемых параметров надежности в условиях неопределенности (нечеткости) и зашумленности данных и мнений экспертов.

Исходными данными является множество неопределенных (нечетких) и зашумленных данных – мнения экспертов об оптимальном составе множества (подсистемы) ПН компонентов ХОД для СУ НРТК ВН. При этом все элементы этого неопределенного (нечеткого) и зашумленного множества (по количеству экспертов и рекомендуемых ими ПН для их включения в оптимальную подсистему параметров надежности средств ХОД) имеют соответствующие функции принадлежности. Проблема оптимального выбора анализируемых параметров состоит в том, что эксперты сформулировали несколько (в худшем случае – множество) мнений о включении или не включении конкретного ПН в оптимальную подсистему параметров надежности компонентов ХОД для СУ НРТК ВН.

Первый подэтап в рамках ГрВ в интересах синтеза подсистемы ПН компонентов ХОД для СУ НРТК ВН – информационное гранулирование. Исходными данными для данного подэтапа являются неточные, зашумленные мнения и предпочтения экспертов в виде нечетких множеств, характеризующие возможные оптимальные количество и номенклатуру подсистемы параметров надежности компонентов ХОД. По сути, это нечетко сформулированные мнения экспертов о том, должен или не должен принадлежать конкретный ПН к оптимальному множеству контролируемых параметров надежности компонентов ХОД для СУ НРТК ВН. Неопределенные, зашумленные нечеткие данные – предпочтения экспертов группируются в информационные гранулы по принципу сходства (близости значений) функций принадлежности. В одну информационную гранулу входят нечеткие данные с минимальным численным расстоянием между их функциями принадлежности.

Далее в рамках ГрВ в интересах синтеза подсистемы ПН компонентов ХОД, входящих в состав СУ НРТК ВН, следует процедура (подэтап) гранулярного суммирования. В ходе этой процедуры происходит математически корректное объединение нескольких мнений экспертов об оптимальных количестве и номенклатуре ПН средств ХОД. Эта процедура реализуется путем дефаззификации и нечетко-гранулярного математического объединения, например, двух неточно заданных («зашумленных») нечетких множеств, компоненты которых характеризуют, например, параметры – среднее время восстановления и интенсивность потока восстановления.

Третий подэтап в рамках ГрВ в интересах синтеза подсистемы ПН компонентов ХОД для СУ НРТК ВН – расчет функции следа гранулярной суммы, что позволяет определить тренд предпочтений экспертов, при выборе, например, из четырех компонентов. Другими словами, на результаты этого подэтапа опираются при выборе из нескольких (например, четырех) разных мнений экспертов о желательности (предпочтительности) включения конкретного параметра надежности, например, среднего времени восстановления в состав формируемой оптимальной, безызбыточной подсистемы параметров надежности компонентов ХОД для СУ НРТК ВН.

Заключительный подэтап ГрВ в интересах синтеза подсистемы ПН компонентов ХОД – поиск минимума в информационных гранулах (минимизация следа гранулярной суммы), причем минимума, характеризующего не нечеткие, не зашумленные данные, а значения их функций принадлежности. Это позволяет получить множество ПН, элементы которого математически корректно, с учетом зашумленных, неопределенных (нечетких) данных и их функций принадлежности, определяют суммарные, обобщенные (с помощью ГрВ), мнения экспертов о важности того или иного ПН в интересах анализа надежности компонентов ХОД для СУ НРТК ВН в целом.

Следует отметить, что рассмотренные подэтапы и сам предложенный в интересах повышения достоверности оценки надежности компонентов ХОД для СУ НРТК ВН метод представления информационных гранул, индуцированных неопределенностью (нечеткостью) и зашумленностью, является наиболее часто применяемым, при этом нечеткая гранула (в общем случае нечеткое множество) может быть представлена как произведение скалярных экспоненциальных функций.

Помимо задачи синтеза подсистемы ПН компонентов ХОД, алгоритмы ГрВ и гранулярное представление нечетких множеств могут быть применены для задач непосредственного анализа надежности данных компонентов СУ НРТК ВН в условиях неопределенности. При этом подэтапы (процедуры) ГрВ остаются такими же, но результаты расчетов в рамках ГрВ численно характеризуют уточненные (точные, не зашумленные) значения конкретного элемента исходного нечеткого множества, содержащего информацию о количественном значении соответствующего конкретного оцениваемого параметра надежности компонентов ХОД для СУ НРТК ВН. Таким образом, рассмотренные основы алгоритмов ГрВ позволяют повысить достоверность оценки надежности компонентов ХОД для СУ НРТК ВН за счет уточнения (реконструкции, верификации) неточных, зашумленных нечетких исходных данных большой размерности. Данный подход позволяет устранить неопределенность (нечеткость) и зашумленность при формировании исходных данных для оценки надежности средств ХОД. Это, в свою очередь, позволяет повысить объективность задания исходных данных, а в конечном итоге, повысить до-

стоверность оценки уровня надежности, реально присущего таким сложным информационным системам, как аппаратно-программные средства хранения и обработки данных в составе высокотехнологичных и отказоустойчивых систем управления как сугубо гражданских экстремальных робототехнических объектов, так и наземных робототехнических комплексов военного назначения.

Литература

1. Шеремет И.Б., Рудианов Н.А., Рябов А.В., Хрущев В.С. О необходимости разработки концепции построения и применения автономных робототехнических комплексов военного назначения // Экстремальная робототехника. Труды Международной научно-технической конференции. – СПб.: ООО «АП4Принт», 2016. С. 35-39.

2. Лапшов В.С., Носков В.П., Рубцов И.В., Рудианов Н.А., Гурджи А.И., Рябов А.В., Хрущев В.С. Перспективы разработки автономных наземных робототехнических комплексов специального военного назначения // Известия ЮФУ. Технические науки. №1 (174). – Таганрог: Технологический институт ЮФУ, 2016. С. 156-168.

3. Борисов О.И., Громов В.С., Пыркин А.А. Методы управления робототехническими приложениями. Учебное пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2016. – 108 с.

4. Юревич Е.И. Управление роботами и робототехническими системами – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. – 167 с.

5. Хомченко В.Г. Робототехнические системы: Учебное пособие. – Омск: Омский государственный технический университет. 2016. – 195 стр.

6. Андреев В.П., Кирсанов К.Б., Подураев Ю.В. Территориально-распределенное многооператорное управление роботизированными системами с использованием сетевых технологий // Экстремальная робототехника. Труды международной научно-технической конференции. – СПб.: Изд-во Политехника-сервис, 2015. С. 71-76.

7. Паращук И.Б., Крюкова Е.С., Михайличенко Н.В. Многопараметрические системы хранения данных, дата-центры и электронные библиотеки: способ контроля параметров технического состояния и анализа качества // Региональная информатика (РИ-2020). XVII Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика (РИ-2020)». Санкт-Петербург, 28-30 октября 2020 г.: Материалы конференции. Часть 1 \ СПОИСУ. – СПб.: 2020. С. 102-104.

8. Сомасундарам Г., Шривастава А. От хранения данных к управлению информацией. 2-е изд. – СПб.: Питер, 2016. – 544 с.

9. Парфенов Ю.П. Постреляционные хранилища данных: учеб. пособие. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 120 с.

10. Паращук И.Б., Башкирцев А.С., Михайличенко Н.В. Анализ уровней и видов неопределенности, влияющей на принятие решений по управлению информационными системами // Информация и космос. №1, 2017. С. 112-120.

11. Паращук И. Б., Михайличенко А. В., Крюкова Е. С. Анализ зашумленных и неоднородных данных о значениях параметров надежности дата-центров // Современные технологии: актуальные вопросы теории и практики: сборник статей Международной научно-практической конференции. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», 2021. С. 74-77.

12. Бутакова М.А., Гуда А.Н., Иванченко О.В., Карпенко Е.В. Элементы теории гранулярных вычислений с нечеткими приближенными информационными гранулами. // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2015. № 4(60). С. 27-33.

13. Паращук И.Б., Михайличенко Н.В., Михайличенко А.В. Нейро-нечеткие сети и алгоритмы гранулярных вычислений в задачах интеллектуальной обработки данных для оценки надежности мобильных дата-центров // Применение искусственного интеллекта в информационно-телекоммуникационных системах. Сборник материалов научно-практической конференции. – СПб.: ВАС, 2021. С. 110-115.

Д.С. Яковлев, А.А. Тачков

МЕТОД ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ БЕСПИЛОТНОГО ДВИЖЕНИЯ НАЗЕМНЫХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ

НУЦ «Робототехника» МГТУ имени. Н.Э. Баумана, Москва, yakovlevds@bmstu.ru, tachkov@bmstu.ru

Аннотация

В работе рассматривается метод обеспечения безопасности беспилотного движения мобильного робота (МР) на основе риск-ориентированного подхода, позволяющий учитывать условия применения и динамические характеристики МР. Представлена функциональная схема системы управления беспилотным движением МР с реализацией предложенного метода в виде модуля обеспечения безопасности движения МР. Показан пример решения задачи оптимизации по критерию минимизации ожидаемых потерь (ожидаемого ущерба) с целью адаптации представленного метода под конкретные требования к выполнению МР поставленной задачи. Проведено имитационное моделирование движения МР при выполнении поставленной задачи и выполнено сравнение результатов работы предложенного метода и аналогичных подходов при решении задачи обеспечения безаварийного движения.

Ключевые слова

Мобильный робот, система управления движением, столкновение мобильного робота, риск столкновения, безопасность беспилотного движения, безопасная скорость движения, аварийная ситуация, вероятность столкновения с препятствием, автономность.

D.S. Iakovlev, A.A. Tachkov

METHOD FOR ENSURING THE SAFETY OF MOTION OF GROUND MOBILE ROBOTS

Science and Educational Center «Robotics» Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia, yakovlevds@bmstu.ru, tachkov@bmstu.ru

Abstract

The paper considers a method for ensuring the safety of the unmanned movement of a mobile robot (MR) based on a risk-based approach, which allows taking into account the conditions of use and the dynamic characteristics of the MR. The functional diagram of the MR unmanned movement control system with the implementation of the proposed method in the form of a MR movement safety module is presented. An example of solving the optimization problem by the criterion of minimizing the expected losses (expected damage) is shown in order to adapt the presented method to the specific requirements for the MR task implementation. Simulation modeling of the MR movement when performing the task was carried out with the comparison the proposed method's result and similar approaches in solving the problem of ensuring accident-free movement.

Key words

Mobile robot, motion control system, mobile robot collision, risk of collision, safety of unmanned movement, safe speed of movement, emergency, obstacle collision probability, autonomy.

Введение

Вектор научно-технического развития в области автономного движения беспилотных транспортных средств (мобильных роботов) главным образом направлен на повышение уровня автономности их систем управления. В силу того, что беспилотное транспортное средство является очень дорогостоящим продуктом, а также признается объектом повышенной опасности обеспечение его безаварийного (безопасного) движения представляет актуальную научную задачу.

Безопасность сложной технической системы (СТС) определяется как состояние системы, при котором не возникает негативных воздействий на составные объекты внутри данной системы или на другие объекты, находящиеся в этой среде [1]. Под безопасностью движения мобильного робота (МР) как целеустремленной СТС авторами понимается состояние, при котором не возникает воздействий на составные части робота или объекты внешней среды, препятствующие выполнению роботом поставленной задачи с учетом условий применения.

Безаварийное движение МР обеспечивается, в общем случае, решением двух основных задач: задачи поиска безопасной траектории и задачи определения скорости движения МР. Существует множество различных подходов и алгоритмов к поиску траекторий, обеспечивающих движение МР без столкновений с окружающими объектами [2-5], в которых безопасной считается такая траектория, которая не пересекает препятствие или вероятность пересечения минимальна.

Одним из первых подходов к оценке безопасной скорости движения МР является метод динамического окна [6], который получил несколько модификаций [7], а также синтез с алгоритмами планирования траектории [8-9]. В данных методах отсутствует учет стохастичности поведения внешних объектов и случайных ошибок в информационно-измерительной системе, что не позволяет выполнять анализ многих факторов аварийных ситуаций. Метод, представленный в работе [10] хорошо учитывает неопределенность локализации МР, но не имеет обоснованных критериев выбора безопасной скорости движения.

Следует отметить, что особенность существующих подходов заключается в их использовании в других ключевых задачах автономного движения, косвенно связанных с обеспечением безопасности движения: планирование траектории, локализация, контроль за отработкой МР траектории. Это в свою очередь ставит решение задачи безаварийного движения в прямую зависимость от подходов, решающих эти ключевые задачи, что не позволяет выполнять анализ большинства факторов аварийных ситуаций как в окружающей среде, так и внутри системы управления автономным движением.

Описание работы системы управления беспилотным движением мобильного робота

Система управления беспилотным движением МР имеет модульную структуру (рис. 1), где под модулем понимается программная реализация алгоритмического решения определенной подзадачи.

Рисунок 1 — Функциональная схема системы управления беспилотным движением МР

Оператор формирует задачу перед МР, описываемый кортежем $Task =< Tr, V_{\max}, \overline{V} >$, где $TR = (\mathbf{tr}_j)_{j=1}^{m}$ – опорный маршрут движения, определяемый последовательностью целевых точек $\mathbf{tr}_j = (x_j, y_j, \gamma_j)$, где $(x_j, y_j) \in \mathbb{R}^2$ – j-я целевая точка, $\gamma_j \in S^1$ – требуемая ориентация МР в точке (x_j, y_j), $V_{\max}$ – максимальная скорость движения МР, $\overline{V}$ – желаемое значение средней скорости движения МР. Мобильный робот последовательно осуществляет перемещение в каждую целевую точку маршрута, предварительно построив траекторию движения в данную точку $\mathbf{r} = \mathbf{r}(t)$. Построение траектории выполняется на основе результирующего слоя многослойной карты окружающей МР среды [11], которая строится за счет агрегации и комплексирования данных от сенсорной системы. Движение МР в соответствии с построенной траекторией реализует модуль траекторного регулятора. Пусть в области движения МР имеется множество дискретных препятствий $OB_i = \{\mathbf{ob}^{(k)} \mid k = \overline{0, K}\}$, каждое из которых задано как $\mathbf{ob}^{(k)} =< \boldsymbol{\omega}^{(k)}, \varphi^{(k)}, \mathbf{v}_{ob}^{(k)}, \boldsymbol{\Lambda}^{(k)} >$, где $\boldsymbol{\omega}^{(k)} = \left(\omega_x^{(k)}, \omega_y^{(k)}\right)$ – пространственные координаты, тип $\varphi^{(k)} \in \Phi$, где Φ – множество возможных типов препятствий, вектор скорости движения препятствия $\mathbf{v}_{ob}^{(k)}$ и габариты препятствия $\boldsymbol{\Lambda}^{(k)} = (\Lambda_x^{(k)}, \Lambda_y^{(k)}, \Lambda_z^{(k)}) \in \mathbb{R}^3$. Для статических препятствий справедливо $\left|\mathbf{v}_{ob}^{(k)}\right| = 0$, для динамических – $\left|\mathbf{v}_{ob}^{(k)}\right| > 0$. Система управления беспилотным движением должна обеспечивать безаварийное движение МР по маршруту в соответствии с требованиями к поставленной задаче и условиям применения.

Метод обеспечения безопасности беспилотного движения МР

Модуль обеспечения безопасного движения МР (рис. 1) представляет из себя программно-алгоритмическую реализацию предлагаемого (разработанного) метода обеспечения безопасности беспилотного движения МР, функциональная схема которого представлена на рисунке 2.

Работа метода обеспечения безопасности беспилотного движения МР разделена на 3 этапа.

На **первом этапе** выполняется оценка вероятности столкновения МР с препятствиями $p_{coll} = \max_{Ar}\left(p(\omega_{ij} \mid \theta) \cdot p(t, \omega_{ij})\right)$ [11]. С помощью анализа результирующего слоя многослойной карты внешней среды $\mathcal{L}_0(\Omega_h, cl)$ осуществляется построение карты вероятностей наличия препятствия $p(t, \omega_{ij})$. Кроме этого, учитывается возможное отклонение МР от построенной траектории движения с помощью координатного закона $p(\omega_{ij} \mid \theta)$. Для каждого k-го столкновения, ожидаемого в результате движения по i-ой траектории, определяется набор параметров $\mathbf{coll}_{ik} =< p_{coll}^{(k)}, \varphi^{(k)}, \mathbf{v}^{(k)}, \boldsymbol{\Lambda}^{(k)}, d^{(k)} >$, где $\mathbf{v}^{(k)}(t_{coll}) = \mathbf{v}_{ob}^{(k)}(t_{coll}) + \mathbf{v}^{(r)}(t_{coll})$, $\mathbf{v}^{(r)}(t_{coll})$ – скорость МР в момент потенциального столкновения t_{coll}. Стоит отметить, что оценка вероятности столкновения МР с препятствием на данном этапе может производиться с помощью различных подходов (например, [4] или [10]), а также с применением комбинации нескольких методов.

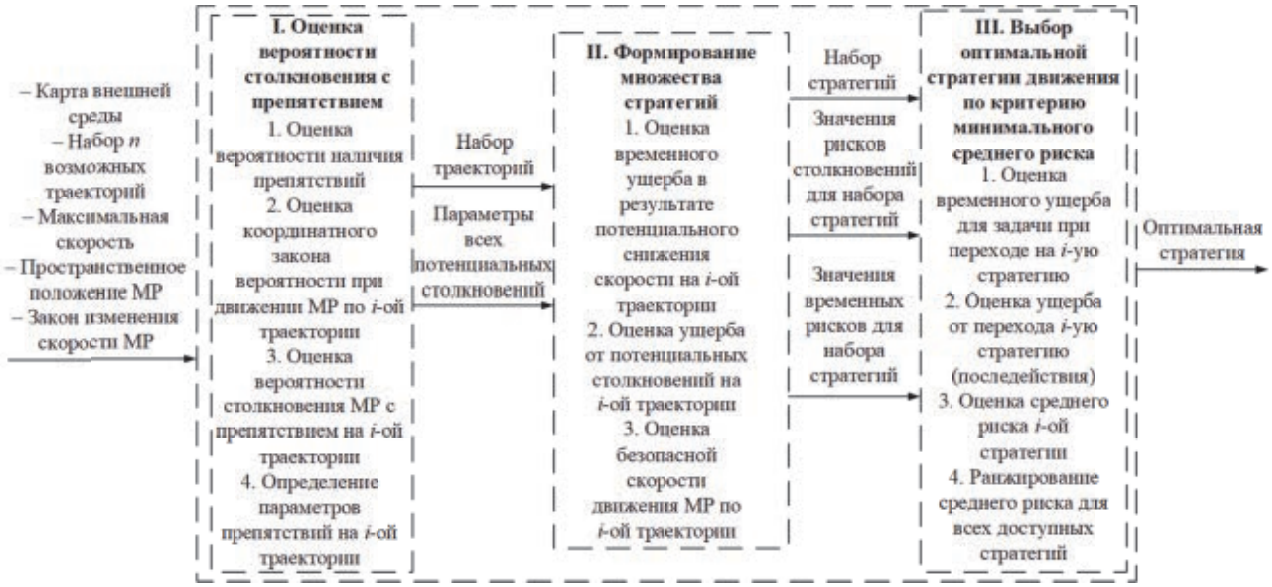


Рисунок 2 — Функциональная схема системы управления беспилотным движением МР

Второй этап подразумевает определение безопасной скорости движения для всех возможных траекторий $\{\mathbf{r}_i \mid i=\overline{1,n}\}$ путем взвешенного анализа ожидаемых ущербов (рисков) в результате возможных столкновений при движении МР и в результате снижения скорости до безопасной V_i с максимальной $V_{\max}$. Критерий поиска безопасной скорости движения МР по траектории $\mathbf{r}_i$ выражается как [12]:

$$\overline{r} = R_{coll} + R_{time} = p(\Psi_{coll}) \cdot W_{coll}(t) \cdot Q_1 + p(\Psi_s) \cdot W_s(t) \cdot Q_2 \to \min \qquad (1)$$

где $R_{coll} = p(\Psi_{coll}) \cdot W_{coll}(t) \cdot Q_1$ – риск (ожидаемый ущерб) от потенциального столкновения, $R_{time} = p(\Psi_s) \cdot W_s(t) \cdot Q_2$ – риск (ожидаемый ущерб) для поставленной задачи, $p(\Psi_{coll})$ – априорная вероятность возникновения аварии, $p(\Psi_s)$ – априорная вероятность безопасного движения, Q_1 – вероятность пропуска аварии (ошибка первого рода), Q_2 – вероятность ложного обнаружения возможной аварии системой безопасности (ошибка второго рода),

$$W_{coll} = \frac{w_{type}(\varphi) \cdot w_V(|\mathbf{v}(t_{coll})|) \cdot w_{size}(\mathbf{\Lambda})}{w_{dist}(d)} _$$

ущерб в случае пропуска аварии (столкновения) системой управления (ущерб от столкновения) [13], $W_s = w_{time}(t')$ – ущерб от реакции системы управления при отсутствии возможной аварии (столкновения),

где $t' = \frac{1}{\hat{V}_i} - \frac{1}{V_{\max}}$, $\hat{V}$ –

оценочное значение безопасной скорости движения МР.

Определение безопасной скорости осуществляется путем итерационного снижения допустимой скорости движения и соответствующего снижения потенциального ущерба W_{coll} до выполнения условия (1) [12]. Таким образом, формируется множество доступных в данный момент времени стратегий движения МР $\{\mathbf{st}_i \mid i=\overline{1,n}\}$, где $\mathbf{st}_i = <\mathbf{r}_i, V_i>$, V_i – безопасная скорость движения МР по соответствующей траектории $\mathbf{r}_i$.

На **третьем этапе** выполняется поиск оптимальной стратегии движения МР из множества $\{\mathbf{st}_i \mid i=\overline{1,n}\}$. Для каждой стратегии определяется средний риск:

$$\overline{R}(\mathbf{st}_i) = R_{coll} + R_{time} + W_{trans}(t) + W_{task}(t) \qquad (2)$$

где $W_{trans}(t) = w_{\Delta V}(\dot{\mathbf{v}}^{(r)}(t)) + w_{\Delta\gamma}(\Delta\gamma)$ – ущерб от перехода на данную стратегию (последействия), $W_{task}(t) = w_{task}(\Delta t)$, где $\Delta\gamma = |\gamma^{(r)}(t) - \gamma^{(\mathbf{tr}1)}|$ – необходимое изменение ориентации МР для выхода на траекторию $\mathbf{r}_i$ (маневр), $\dot{\mathbf{v}}^{(r)}(t)$ – необходимый закон изменения скорости для выхода на безопасную скорость V_i (маневр), Δt – оценка временных потерь при движении МР по траектории $\mathbf{r}_i$ с безопасной скоростью V_i в отличии от движения с максимальной скоростью по оптимальной по времени траектории, построенной с условием отсутствия опасных для МР объектов. Результатом работы метода является стратегия, удовлетворяющая условию $\mathbf{st}^* = \arg\min_{i \in \{1..n\}} \overline{R}(\mathbf{st}_i)$.

Определение весовых функций для оценки ожидаемых потерь в модели принятия решений

Корректная работа метода для конкретного класса МР (определяется массой, динамическими характеристиками приводного уровня и т.п.) обеспечивается настройкой его параметров. Настройка представленного в данной статье метода выражается в выборе весовых функций на основе специфики поставленной перед МР задачи и условий применения МР. Критерием оптимальной настройки метода обеспечения безопасности беспилотного движения МР является достижение минимального значения функционала [1,14-15]:

$$W = \min\{\int_0^T (c_t(t) + c_{dam}(t))dt + g_{dist}(T) + g_{dam}(T)\} \qquad (3)$$

где W – потери (ущерб) при перемещении МР в соответствии с поставленной задачей, $c_t(t)$, $c_{dam}(t)$ – функции траекторных потерь (функции временных и физических потерь соответственно), $g_{dist}(T)$, $g_{dam}(T)$ – функции терминальных потерь (функция потерь в зависимости от расстояния до конечной точки маршрута и функция физических потерь соответственно, T – момент окончания перемещения МР в соответствии с задачей).

Весовые функции можно определить как $w_{type}(\varphi) = k_{type} \cdot ind(\varphi)$, $w_V(|\mathbf{\upsilon}(t_{coll})|) = k_V \cdot |\mathbf{\upsilon}(t_{coll})|$, $w_{size}(\mathbf{\Lambda}) = k_{size} \cdot sz(\mathbf{\Lambda})$, $w_{dist}(d) = k_{dist} \cdot d$, $w_{time}(t') = k_{time} \cdot t'$, $w_{\Delta V}(\dot{\mathbf{\upsilon}}^{(r)}(t)) = k_{\Delta V} \cdot a$, $w_{\Delta\gamma}(\triangle\gamma) = k_{\Delta\gamma} \cdot \Delta\gamma$, $w_{task}(\triangle t) = k_{\Delta t} \cdot \Delta t$, где $ind : \Phi \to \mathbb{R}$, $sz : \mathbb{R}^3 \to \mathbb{R}$, a – ускорение МР. Таким образом, необходимо решить многокритериальную задачу оптимизации для коэффициентов $k_{type}, k_V, k_{size}, k_{dist}, k_{time}, k_{\Delta V}, k_{\Delta\gamma}, k_{task}$, чтобы движение МР соответствовало условию (3).

Данная задача оптимизации была решена методом Монте-Карло при условии фиксации значений коэффициентов $k_{type} = 1, k_{size} = 1, k_{dist} = 1$ и с помощью статистической имитационной модели подсистемы принятия решений. Для каждого вектора коэффициентов $\mathbf{Param} = (k_V, k_{time}, k_{\Delta V}, k_{\Delta\gamma}, k_{task})$ выполнялось моделирование движения МР по маршруту в количестве 2000 раз. Маршрут состоял из 20 целевых точек, в каждую из которых существовало 3 различных траектории движения с вероятностью столкновения $p_{coll} \in [0, 0.3]$. Максимальная скорость движения МР 4 м/с. Минимальное значение ущерба от столкновения МР с внешним объектом мог составить $W^{\min}$, критическое значение ущерба, при котором МР теряет возможность выполнять дальнейшее движение могло составить W^{stop}, максимальное значение ущерба – $W^{\max}$. Максимальное расстояния от конечной остановки МР до последней точки маршрута, при котором считалось, что МР успешно выполнил поставленную задачу равнялось 1 м. За оптимальное время движения МР по маршруту принималось

$$T^{optimal} = \frac{L_{Tr}}{\bar{V}},$$

где L_{Tr} – кратчайшая длина маршрута Tr. После проведения серии моделирований движения МР по маршруту с определенным вектором коэффициентов **Param** выполнялась оценка значения функционала (2) следующим образом:

$$\hat{W} = M(\int_0^T c_t(t)dt) + M(g_{dist}(T)) + M(g_{dam}(T)) \quad (4)$$

где $M()$

Значения функций $c_t(t) \in C_t, g_{dist}(T) \in G_{dist}, g_{dam}(T) \in G_{dam}$ являются безразмерными величинами, что обеспечивается размерностями коэффициентов из вектора **Param**. Для корректного сравнения значений функций была введена качественная шкала, обеспечивающая соответствие физических потерь с потерями, в результате не достижения МР конечной точки маршрута и потраченного МР времени на выполнение поставленной задачи (табл. 1). С помощью качественной шкалы выполняется отображение $f_{Gdist} : G_{dist} \to C_t$ и $f_{Gdam} : G_{dam} \to C_t$ для работы во множестве $C_t \subseteq \mathbb{R}$.

Таблица 1 — Качественная шкала соответствия потерь (ущербов)

Качественная шкала	**Значение возможного ущерба**	**Расстояние до конца маршрута при завершении движения МР**	**Время движения МР по маршруту**
0	$W^{\min}$	0	T^{optimal}
1	$0.5*W^{\text{stop}}$	$25*L$	$2*T^{\text{optimal}}$
2	W^{stop}	$50*L$	$3*T^{\text{optimal}}$
3	$W^{\max}/6$	$100*L$	$5*T^{\text{optimal}}$
4	$W^{\max}/3$	$250*L$	$7*T^{\text{optimal}}$
5	$W^{\max}$	$350*L$	$9*T^{\text{optimal}}$

Статистическое имитационное моделирование движения МР по маршруту

Качество применения МР при использовании метода обеспечения безопасности беспилотного движения было исследовано с помощью статистического анализа результатов имитационного моделирования движения МР с учетом линеаризованной модели динамики МР [16] (рис. 3).

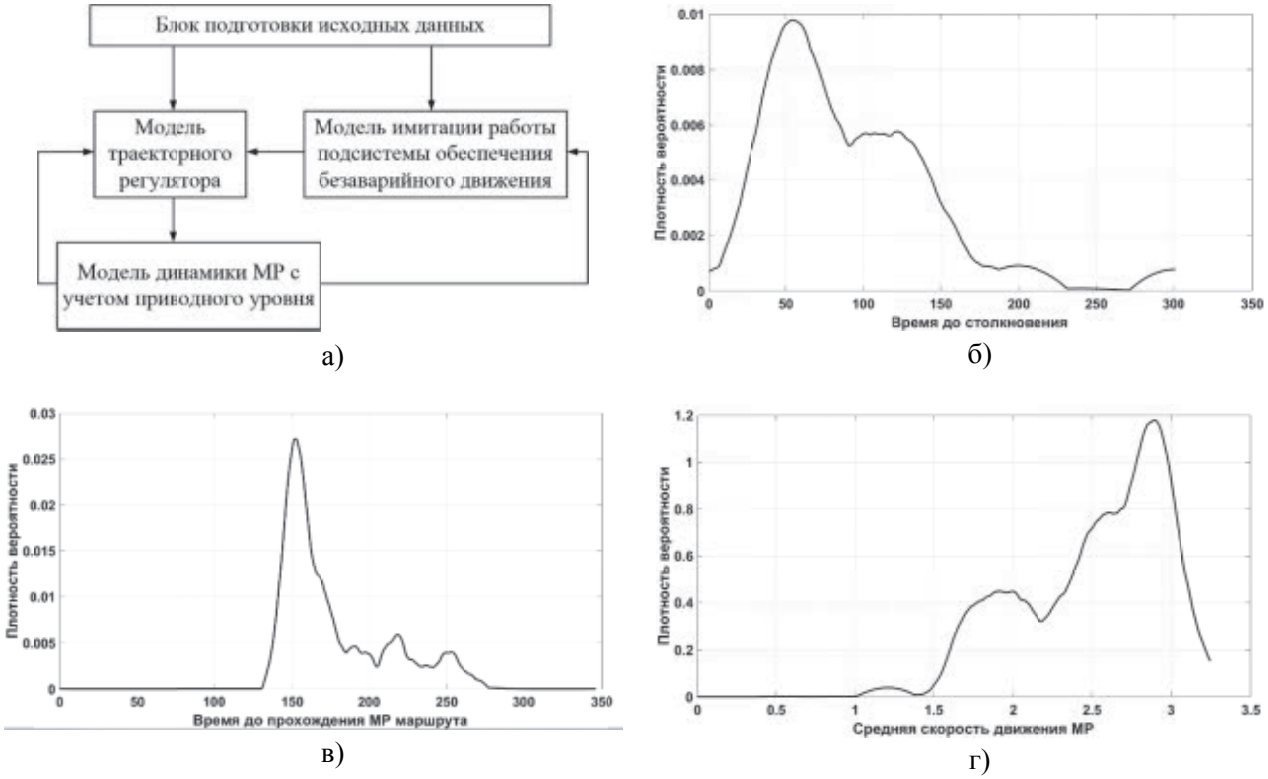


Рисунок 3 — Схема имитационной модели движения МР в целевую точку с учетом линеаризованной модели динамики МР (а), результаты статистического анализа (б-г)

Результаты проведенного моделирования отражены на рис. 3, *б-г*. в виде плотностей вероятностей для таких показателей, как «время до столкновения», «время прохождения МР маршрута», «средняя скорость движения МР» соответственно.

В качестве подсистемы обеспечения безаварийного движения в целях сравнения, кроме представленного в данной статье метода, были реализованы так же подходы [4] и [10]. Результаты проведенного моделирования представлены в табл. 2 для четырех показателей качества работы подсистемы обеспечения безаварийного движения.

Таблица 2 — Сравнение результатов имитационного моделирования

	Количество успешно выполненных задач (полных проходов по маршруту)	Количество столкновений	Количество остановок	Средняя скорость движения МР
Метод минимальной вероятности (Rios-Martinez J., Spalanzani A. and Laugier C.)	1386	3614	0	3,08
Метод безопасного управления скоростью (V. Kibalov, O. Shipitko.)	1312	3688	0	1,95
Метод обеспечения безопасности беспилотного движения	**3572**	**1428**	**0**	**2,49**

Анализ результатов имитационного моделирования показал, что представленный в статье метод обеспечения безопасности беспилотного движения для данных условий применения МР позволяет кратно уменьшить количество столкновений МР с препятствием при отсутствии вынужденных остановок (в результате отсутствия безопасных траекторий) и небольшом (относительно) снижении средней скорости.

Заключение

Представленный в данной статье метод обеспечивает поиск оптимальной безопасной траектории движения МР из множества доступных в данный момент времени с помощью критериев (1) и (2). Параметры метода, представленные в виде весовых функций, предоставляют возможность учитывать условия применения и физические возможности МР. Выбор весовых функций выполняется путем решения многокритериальной задачи оптимизации с целью выполнения условия (3) с учетом предъявляемых требований к поставленной перед МР задаче. Представленный в данной работе метод реализован в виде встраиваемого модуля в системе управления беспилотным движением МР (рис. 1), что позволяет использовать различные подходы к планированию траектории, локализации и регулированию движения МР, а задачу безаварийного движения вывести на уровень обеспечения функциональной безопасности [1]. Данный аспект, с учетом развития представленного метода, позволит выполнять учет различных факторов аварийных ситуаций, что обеспечит максимальный уровень безопасности движения МР при выполнении поставленной задачи.

Литература

1. Н.А. Северцев, А.В. Бецков. Системный анализ теории безопасности. М.:Издательство МГУ «ТЕИС», 2009. 452 с

2. Hart P. E., Nilsson N. J., Raphael B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. IEEE transactions on Systems Science and Cybernetics, 1968, Vol. 4, No. 2, pp. 100-107.

3. Koenig S., Likhachev M. D* lite // Eighteenth national conference on Artificial intelligence, 2002. pp. 476-483.

4. Rios-Martinez J., Spalanzani A., Laugier C. Understanding human interaction for probabilistic autonomous navigation using Risk-RRT approach. IEEE Int. Conf. IROS, 2011, pp. 2014-2019, DOI: 10.1109/IROS.2011.6094496.

5. Blake A. et al. FPR – Fast path risk algorithm to evaluate collision probability. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, vol. 5, no. 1, pp. 1-7, DOI: 10.1109/LRA.2019.2943074.

6. Dieter Fox, Wolfram Burgard, Sebastian Thrun. The dynamic window approach to collision avoidance. IEEE Robotics Autom. Mag. 4 (1997): 23-33.

7. C. Fulgenzi, A. Spalanzani and C. Laugier. Dynamic Obstacle Avoidance in uncertain environment combining PVOs and Occupancy Grid. *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation,* 2007, pp. 1610-1616, doi: 10.1109/ROBOT.2007.363554.

8. C. Stachniss and W. Burgard. An integrated approach to goal-directed obstacle avoidance under dynamic constraints for dynamic environments. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems,* 2002, pp. 508-513 vol.1, doi: 10.1109/IRDS.2002.1041441.

9. M. Seder, K. Macek and I. Petrovic. An integrated approach to real-time mobile robot control in partially known indoor environments. *31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005.*, 2005, pp. 6 pp.-, doi: 10.1109/IECON.2005.1569176.

10.V. Kibalov, O. Shipitko. Safe Speed Control and Collision Probability Estimation under Ego-Pose Uncertainty for Autonomous Vehicle. 2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems, ITSC 2020 : 23, Rhodes, 20–23 сентября 2020 года. Rhodes, 2020. P. 9294531. DOI 10.1109/ITSC45102.2020.9294531. EDN CKNPWU.

11.Яковлев Д.С., Тачков А.А. Вероятность столкновения автономного мобильного робота с препятствием. Мехатроника, автоматизация, управление. 2021;22(3):125-133. https://doi.org/10.17587/mau.22.125-133.

12.Iakovlev D. S. Collision Risk Analysis to Ensure the Safety of Autonomous Vehicle Motion Control, 2021 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). 2021, pp. 644-649, doi: 10.1109/RusAutoCon52004.2021.9537403.

13.А. А. Тачков, А. В. Козов, Д. С. Яковлев, Н.А. Бузлов, С.Ю. Курочкин. Принципы построения систем автономного управления движением наземных робототехнических комплексов специального назначения. Робототехника и техническая кибернетика, 2022, Т. 10, № 2, С. 121-132, DOI 10.31776/RTCJ.10205. EDN WKACSL.

14.Н. А. Северцев, А. В. Бецков, А. Н. Дарьина. Адаптивная модель оценки безопасности и надежности программного обеспечения. Надежность и качество сложных систем. 2018, № 4 (24), С. 19–28, DOI 10.21685/2307-4205-2018-4-2.

15.А.А. Красовский, А.С. Ермилов. Боевое применение и эффективность пилотажно-навигационных комплексов летательных аппаратов. ВВИА имени Н.Е. Жуковского, 1989 – 288 с.

16.А.А. Тачков, А. В. Козов, С. Ю. Курочкин, Д.С. Яковлев, Н.А. Бузлов. Реализация траекторного регулятора наземного робототехнического комплекса на основе модельного прогнозирующего управления. Робототехника и техническая кибернетика. 2022, Т. 10, № 1, С. 43-54, DOI 10.31776/RTCJ.10105. – EDN CSJJUM.

С.Ю. Курочкин, А.А. Тачков

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ГРУППОВОГО ДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ С УЧЕТОМ ВЕРОЯТНОСТНО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ СВЯЗИ И АВТОНОМНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ

НУЦ «Робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, kurochkin.smn@gmail.com

Аннотация

В статье рассмотрена задача статистического имитационного моделирования движения группы мобильных роботов (МР) по опорному маршруту с сохранением заданной формы строя. При моделировании учитываются вероятностно-временные характеристики системы связи и обмена информацией, системы автономного управления движением МР (САУД МР), а также динамика МР с учетом системы управления приводным уровнем. В качестве метода группового управления согласованным движением МР в модели рассматривается метод децентрализованной виртуальной структуры. Качество выполнения групповой задачи оценивалось двумя показателями: отклонением формы строя от заданной и средней скоростью движения группы МР по заданному маршруту. Проведенное статистическое имитационное моделирование позволило оценить влияние возникающих в канале связи запаздываний и качества работы САУД МР на выполнение группой МР согласованного движения.

Ключевые слова

Наземное беспилотное транспортное средство, групповое управление, управление строем, имитационное моделирование, система автоматического управления движением.

S.Yu. Kurochkin, A.A. Tachkov

STATISTICAL SIMULATION MODEL OF MOBILE ROBOT FORMATION MOVEMENT TAKING INTO ACCOUNT THE PROBABILISTIC CHARACTERISTICS OF THE COMMUNICATION AND AUTONOMOUS MOTION CONTROL SYSTEMS

Science and Educational Center «Robotics» Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia, Moscow, Russia, kurochkin.smn@gmail.com

Abstract

The article considers the problem of statistical simulation of a group of mobile robots performing the task of driving along a reference route while maintaining a given formation shape. This work takes into account probabilistic and temporal characteristics of the communication network, the autonomous motion control system of the mobile robot, as well as the dynamics of mobile robot. The group task effectiveness was analysed using two parameters: the deviation of the formation shape from the specified one and the average driving speed along the specified route. Statistical simulation made it possible to evaluate the performance of the task assigned to the group of mobile robots in the presence of communication delays and the quality of the mobile robot's autonomous driving system.

Key words

Formation control, virtual structure approach, mobile robot, MATLAB, parallel computing.

Массовое применение мобильных роботов (МР) в различных областях требует разработки систем управления, обеспечивающих их автономную работу в недетерминированной среде. Одним из таких элементов является автономное движение МР, в том числе в составе группы. Проверка применимости существующих методов группового управления движением МР для различных условий функциони-

рования требует разработки имитационной модели, которая учитывает влияние как качества системы связи в группе, так и системы управления автономным движением (САУД) каждого МР.

Архитектура системы управления МР соответствует принципам блочно-модульного построения на основе унифицированных программных компонентов, совместное функционирование которых реализует связующее программное обеспечение, использующее технологию «издатель-подписчик», например, Robot Operating System (ROS) [1]. Структура системы управления МР, изображенная на рисунке 1, состоит из следующих компонентов: аппаратного уровня (приводного уровня и сенсорной системы), программно-алгоритмических модулей САУД, системы логического управления групповыми действиями, например, движением роботов в составе группы, а также системы связи и обмена информацией с оператором и другими роботами, выполняющими общую задачу.

Рисунок 1 — Структура системы управления мобильным роботом

Неустойчивая работа системы связи в группе в следствие условий её функционирования может значимо влиять на качество работы системы логического управления групповым уровнем МР. Стохастическая природа условий, случайные ошибки в информационно-измерительной системе (ИИС) и несовершенство модели движения МР приводят к возникновению в САУД МР ошибок, снижающих скорость его движения [2]. Влияние условий функционирования на качество работы системы связи и САУД отражают вероятностно-временные характеристики (ВВХ) указанных систем. Основной ВВХ системы связи является время задержки сообщений в сети, САУД – интенсивность остановок МР. При разработке и настройке алгоритмов группового управления МР требуется имитационная модель, в которой учитываются ВВХ САУД и системы связи и обмена информацией, а также динамика МР.

Разработка имитационной модели

Рассмотрим задачу движения группы из трех МР по опорному маршруту с поддержанием заданной формы строя. Опорный маршрут движения формируется оператором или системой управления верхнего уровня с использованием имеющейся топографической информации в виде последовательности точек с ориентацией. Данный маршрут представляет собой вектор **W** размером $3 \bullet m$, где m – количество опорных точек:

$$\boldsymbol{W} = \left(x_1, y_1, \theta_1, \ldots, x_m, y_m, \theta_m\right).$$

Также оператором задается требуемая скорость движения группы. Геометрическая форма строя, в котором должна двигаться группа роботов, описывается при помощи набора точек, заданных в по-

лярной системе координат (рис. 2): вектор расстояний от полюса группы до желаемого положения МР $\boldsymbol{D} = (D_1,\ldots,D_N)$ и полярный угол $\boldsymbol{\Phi} = (\Phi_1,\ldots,\Phi_N)$, индекс каждой координаты соответствует порядковому номеру МР, входящему в состав группы, N – количество МР, входящих в группу. Для поддержания заданной формы строя в процессе движения МР осуществляют обмен информацией о своих координатах. На рисунке 2 представлен пример групповой задачи движения строем формы «Обратный клин» для группы из трех МР.

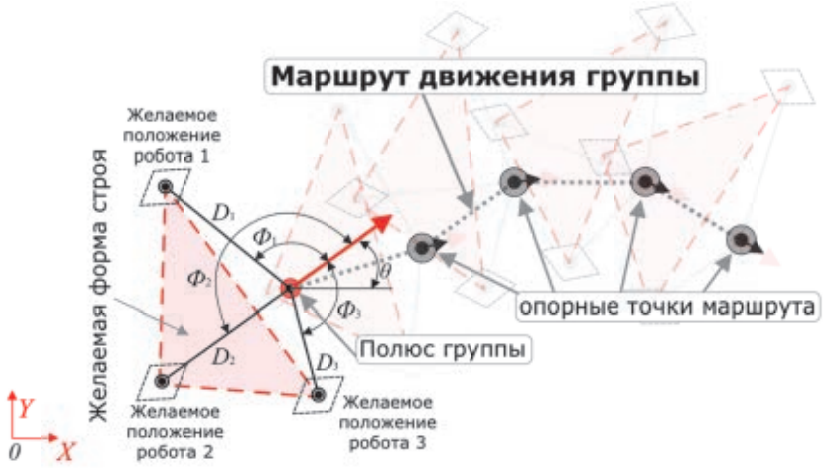


Рисунок 2 — Пример описания формы строя и постановки задачи группе МР

Движение группы МР, выполняющих поставленную задачу, исследуется с использованием разработанной имитационной модели, структура которой приведена на рисунке 3. Рассматриваемая модель включает следующие блоки: имитационная модель САУД и приводного уровня МР, система управления групповым движением МР, система связи и обмена информацией. Также в модель входит блок подготовки исходных данных, который имитирует постановку задачи оператором (передача опорного маршрута, максимальной разрешенной скорости движения и формы строя).

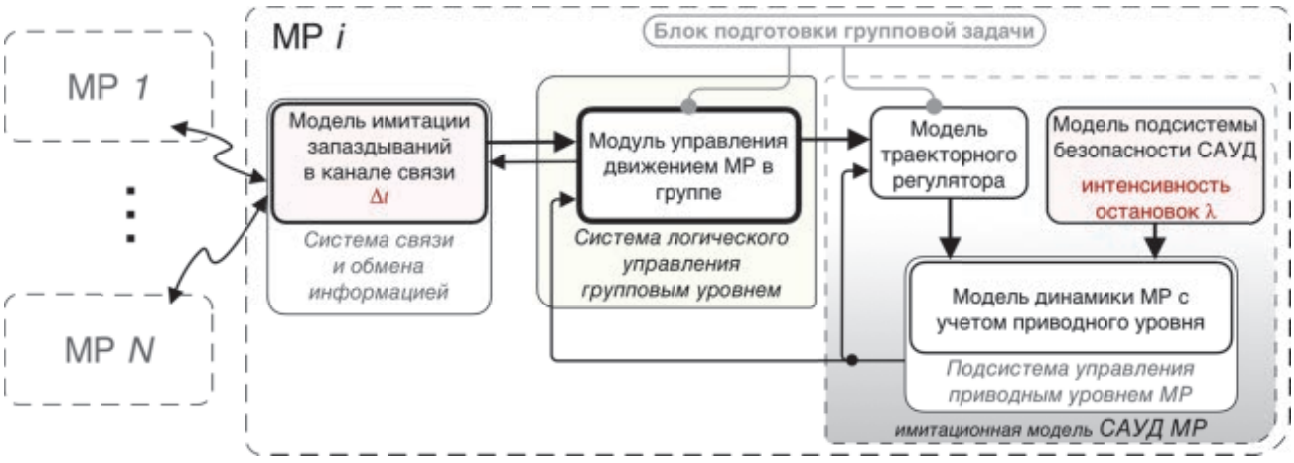


Рисунок 3 — Структура модели группы МР

Имитационная модель, описывающая динамику МР с учетом приводного уровня, может быть представлена, согласно публикации [3], в виде двух отдельных передаточных функций, отражающих динамику прямолинейного движения робота и динамику его поворота (рис. 4). Для описания прямолинейного движения используется линеаризованная модель третьего порядка с запаздыванием, динамика поворота МР описывается аналогичной моделью с учетом допущения, что МР движется только по поверхности с постоянным или незначительно изменяющимся коэффициентом трения [4].

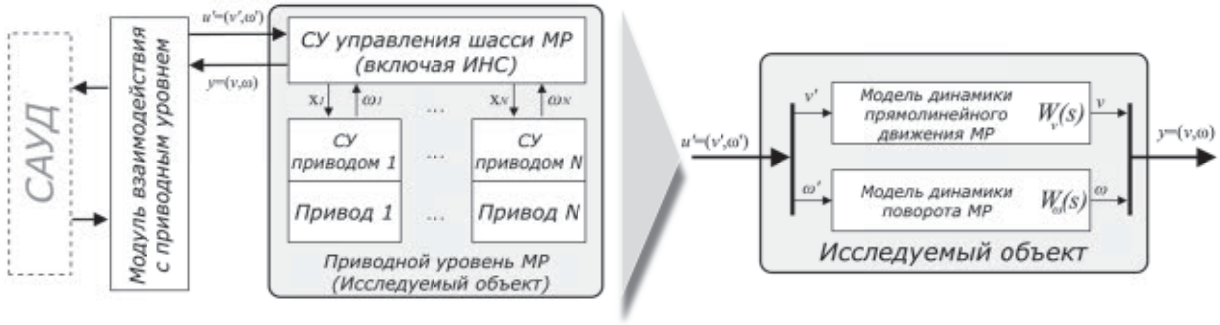


Рисунок 4 — Представление динамики МР с учетом системы управления приводным уровнем в виде двух линеаризованных моделей

ВВХ САУД, интенсивность остановок МР, учитывается в данной модели, благодаря блоку подсистемы безопасности САУД, в состав которого входит функция генерации сигналов остановки мобильного робота (требуемая линейная скорость МР равна нулю). Сигналы об остановке МР рассматриваются, как последовательность однородных событий, наступающих одно за другим в случайные промежутки времени – ординарный поток без последствия. Интенсивность потока, обозначенная λ, задает количество остановок в единицу времени. Время τ, через которое наступит событие, определяется по следующей формуле:

$$\tau = -1/\lambda \cdot ln(r),$$

где r – случайное число, равномерно распределенное в интервале от 0 до 1, получаемое при помощи генератора псевдослучайных чисел. Величина интенсивности потока λ определяется экспериментально по результатам обработки данных, записанных в процессе движения одного МР по маршруту.

В качестве метода группового управления, обеспечивающего движение МР в строю заданной формы по опорному маршруту, выбран метод децентрализованной виртуальной структуры (ДВС). Метод ДВС является модификацией централизованного метода виртуальной структуры [5], в котором желаемые положения каждого робота, входящего в группу, задаются относительно текущего положения робота-лидера или виртуального центра строя, вычисленного центральным устройством управления. В децентрализованном подходе алгоритмы, реализующие метод виртуальной структуры, внедряются непосредственно в систему логического управления групповым уровнем каждого МР, входящего в группу, а согласование их действий обеспечивается за счет применения алгоритма достижения консенсуса [6]. Алгоритм достижения консенсуса для робота под номером *i*, получающего координаты от роботов, номера которых перечислены в векторе $\mathbf{J}_i$, записывается следующим образом:

$$\mathbf{e}_i = \frac{1}{|\mathbf{J}_i|}\sum_{j\in\mathbf{J}_i}\gamma_r\left(\mathbf{P}_i - \mathbf{P}_j\right),$$

где $\mathbf{e}_i$ – ошибка, которую необходимо компенсировать *i*-му роботу, чтобы достичь общепринятого значения, $\mathbf{P}_i$ – координаты предполагаемого полюса группы для *i*-го робота, $\mathbf{P}_j$ – координаты предполагаемого полюса группы для МР под номером *j*, где $j \in \mathbf{J}_i$, $\gamma_r > 0$ – константа, использующаяся для настройки алгоритма.

Считается, что группа роботов достигла консенсуса, сформировала строй, в том случае, если оценки местоположения полюса строя, выполненные каждым роботом, достигают одного общепринятого значения $\mathbf{P}_i \to \mathbf{P}_j \to \mathbf{P}_O$ (рис. 5).

В процессе выполнения групповой задачи движения по траектории с поддержанием заданной формы строя оцениваются следующие показатели качества: искажение формы строя и средняя скорость движения МР, входящих в группу. Для оценки отклонения от заданной формы вычисляется

евклидово расстояние d_{io} между центром строя $\mathbf{P}_i \in \mathbb{R}$ для i-го МР и геометрическим центром (пространственной медианой) $\mathbf{O}(x_o, y_o)$:

$$d_{io} = \mathbf{P}_i - \mathbf{O}_2$$

Геометрический центр $\mathbf{O}$ вычисляется по формуле:

$$\mathbf{O} = \arg\min_{\mathbf{y}\in\mathbb{R}} \sum_{i=1}^{N} \mathbf{P}_i - \mathbf{y}_2 ,$$

где $\mathbf{y}$ – точка, для которой сумма всех евклидовых расстояний до $\mathbf{P}_i$ минимальна, N – количество роботов.

Вычисленное среднее значение евклидовых расстояний d для всех МР, входящих в группу, позволяет оценить искажение формы строя.

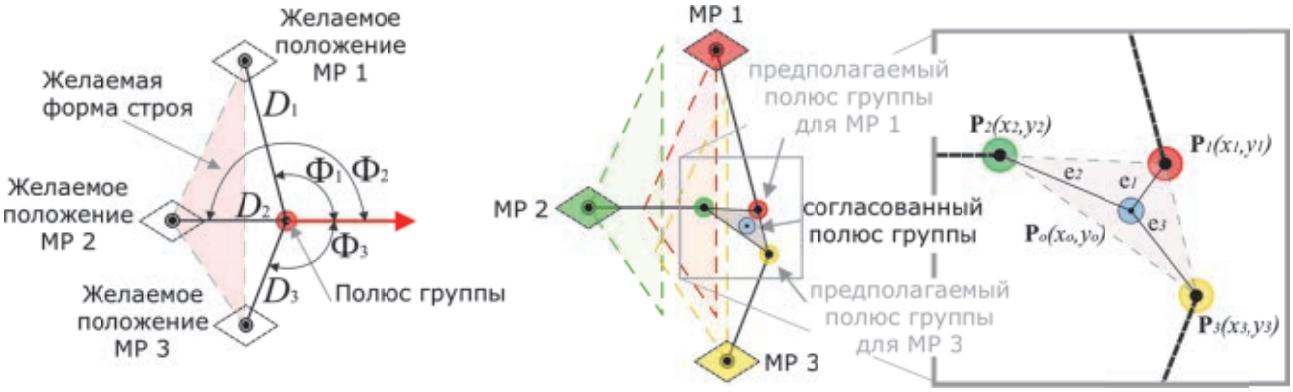


Рисунок 5 — Описание формы строя «Обратный клин»

Результаты имитационного моделирования

Для исследования рассматриваемой системы управления групповым движением МР в строю заданной формы была подготовлена следующая групповая задача: три мобильных робота, двигаясь в строю типа «Шеренга» с интервалом 5 метров, должны со скоростью 3 м/с пройти по опорному маршруту, заданному оператором. На рис. 6 приведены результаты моделирования: изображен опорный маршрут, траектории МР, роботы соединены черными линиями, имитирующими текущую форму строя, что позволяет оценить его искажение. В процессе движения группы МР моделировались случайные остановки МР под номером 1 и 3.

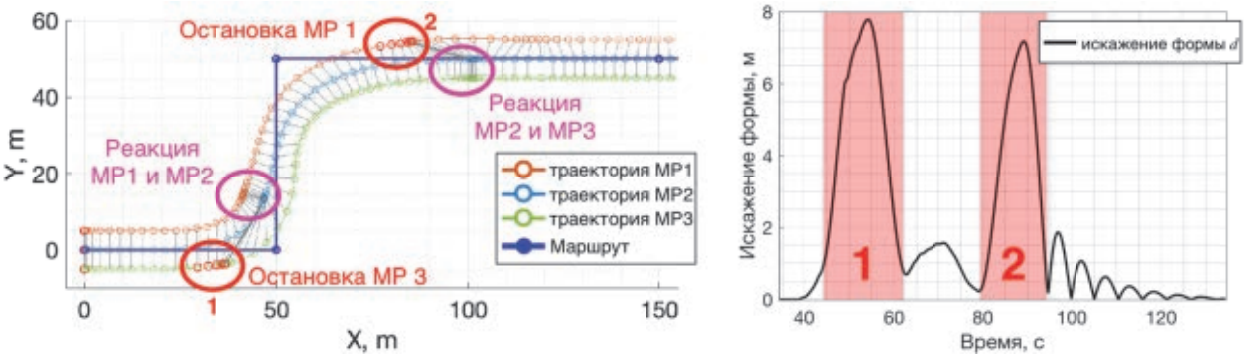


Рисунок 6 — Результат моделирования движения группы МР по маршруту в строю «Шеренга»

Для исследования влияния ВВХ системы связи и САУД на качество выполнения группой МР поставленной задачи было проведено статистическое имитационное моделирование. В рамках проведенных экспериментов изменялась интенсивность остановок МР λ (от 0 до 0,25 остановок в секунду), а также величина запаздывания Δt (от 0 до 10 секунд). Максимально возможное время моделир-

рования было ограничено 600 секундами. Для обеспечения доверительного интервала 99% и уровня значимости 90% было проведено 236 740 симуляций для различных величин плотности потока событий остановок, запаздываний и желаемых скоростей движения. На рисунке 7 представлены результаты проведенного эксперимента.

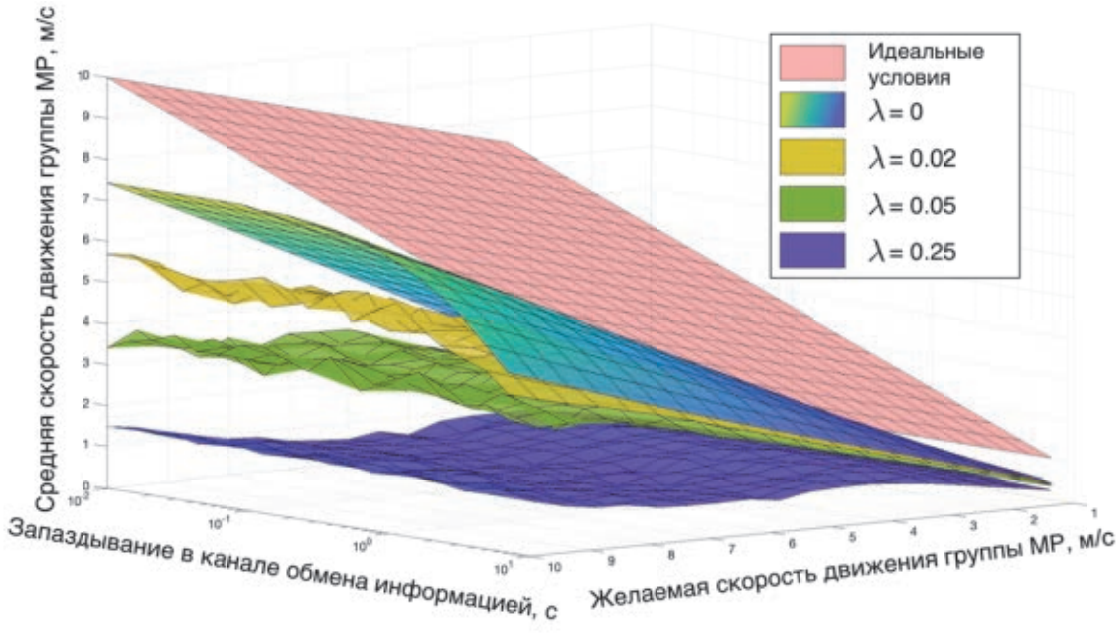


Рисунок 7 — Результаты статистического имитационного моделирования

На рисунке 8 приведен фрагмент предыдущего рисунка для различных величин запаздывания Δt при отсутствии случайных остановок ($\lambda = 0$).

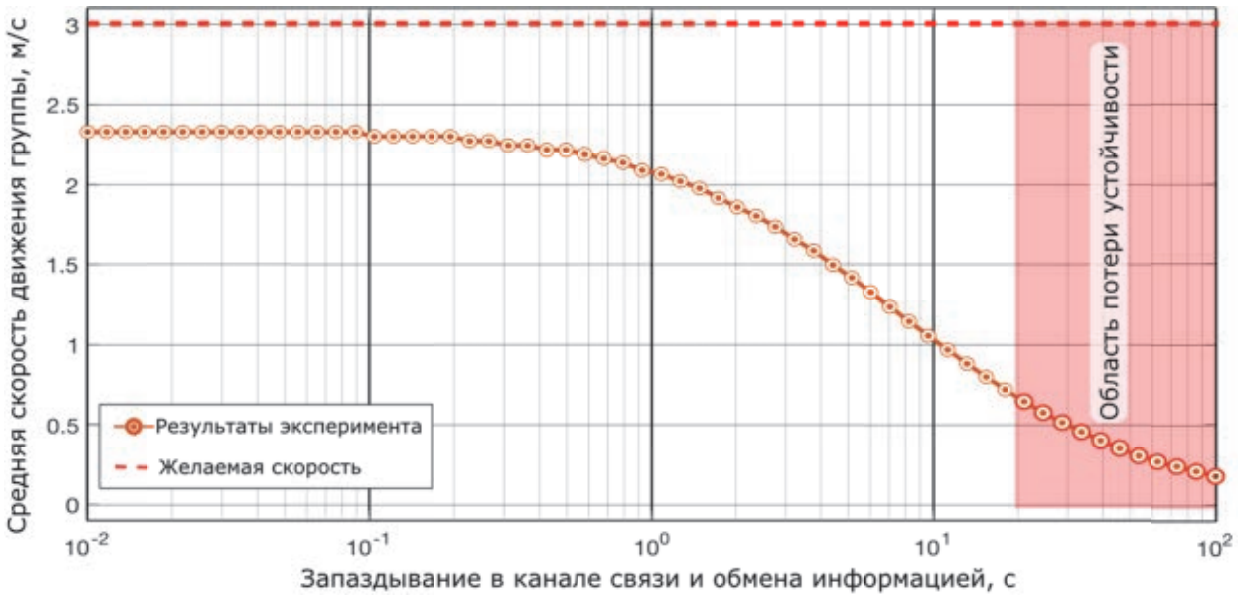


Рисунок 8 — Результаты статистического имитационного моделирования

По результатам проведенных экспериментов можно сделать вывод, что с ухудшением качества работы САУД снижается средняя скорость движения группы МР и увеличивается время выполнения задачи. Это обусловлено тем, что на остановку, как и на снижение скорости, одного из роботов группы реагируют все остальные, также снижая скорость, пытаясь поддержать заданную оператором форму строя. При значительном увеличении как плотности потока событий остановок, так и запаздываний система управления групповым уровнем теряет способность корректно управлять движением

МР в группе. Также можно отметить, что при отсутствии случайных остановок ($\lambda = 0$) и малых запаздываниях средняя скорость группы МР ниже требуемой на 20%.

Разработана имитационная модель децентрализованной группы МР, позволяющая оценить качество работы системы группового управления согласованным движением МР по опорному маршруту с поддержанием заданной формы строя. В качестве вероятностно-временных характеристик системы связи и САУД были выбраны, соответственно, величина запаздывания и интенсивность остановок МР в процессе автономного движения. При известных ВВХ системы связи и САУД МР возможно проведение статистического имитационного моделирования с целью тестирования и сравнения различных методов группового управления, а также настройка выбранного алгоритма при варьируемых ВВХ.

Литература

1. Тачков А.А. Принципы построения систем автономного управления движением наземных робототехнических комплексов специального назначения / А.А. Тачков [и др.] // Робототехника и техническая кибернетика. – Т. 10. - № 2. Санкт-Петербург: ЦНИИ РТК. 2022. С. 121-132.

2. Iakovlev D. S., Collision Risk Analysis to Ensure the Safety of Autonomous Vehicle Motion Control, 2021 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), 2021, С. 644-649.

3. Тачков А.А. Реализация траекторного регулятора наземного робототехнического комплекса на основе модельного прогнозирующего управления / А.А. Тачков [и др.] // Робототехника и техническая кибернетика. Т. 10. № 1. Санкт-Петербург: ЦНИИ РТК. 2022. С. 43-54.

4. Milanés V. et al. Cooperative adaptive cruise control in real traffic situations //IEEE Transactions on intelligent transportation systems. 2013. Vol. 15. №. 1. pp. 296-305.

5. Ren W. Consensus strategies for cooperative control of vehicle formations //IET Control Theory & Applications. 2007. Т. 1. №. 2. С. 505-512

6. Fax J. A., Murray R. M. Information flow and cooperative control of vehicle formations //IFAC Proceedings Volumes. – 2002. – Т. 35. – №. 1. – С. 115-120.

Е.В. Иванов

СХЕМА ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОГО ТРОСОВОГО МАНИПУЛЯТОРА ПОВЫШЕННОЙ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, egorvladivanov@mail.ru

Аннотация

В данной статье представлены способы повышения энергоэффективности крупногабаритных плоскопараллельных манипуляторов с тросовым приводом (ПТМ) за счет изменения их кинематической схемы. Автор рассматривает классификацию манипуляторов по типам кинематических схем, после чего представляет различные подходы к повышению их энергоэффективности и управляемости. В основной части приведен синтез новой кинематической схемы манипулятора и представлен ее сравнительный анализ с классической схемой ПТМ. При сравнительном анализе были рассчитаны моменты нагрузки на приводах для обеих схем и рассчитаны силы натяжения тросов. В разработанной схеме рабочий инструмент перемещается с помощью трех тросов. Схема не имеет вырождения сил тянущих кабелей, в результате чего повышается энергоэффективность и упрощается управление, поскольку отсутствуют сингулярные точки рабочего пространства. Новая схема манипулятора может найти применение в робототехнических проектах, где требуется большая рабочая зона и высокая грузоподъемность.

Ключевые слова

Крупногабаритный робот, плоскопараллельный манипулятор с тросовым приводом, подвесной параллельный манипулятор с тросовым приводом, энергоэффективность манипулятора с гибкими связями.

E.V. Ivanov

SHEME OF A CABLE DRIVEN PARALLEL MANIPULATOR OF INCREASED ENERGY

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia, egorvladivanov@mail.ru

Abstract

This article presents ways of improving the energy efficiency of large-scale cable-driven parallel manipulators by changing their kinematic scheme. The author considers the classification of manipulators by types of kinematic schemes. Various approaches to improve energy efficiency and manageability are reviewed. In conclusion, the author carried out a synthesis of a new kinematic scheme and presented comparative analysis with the classical CDPM scheme. In a comparative analysis the load moments on the pulling drives for both circuits were calculated. In the developed scheme a working tool is moved by three cables. Two cables are responsible for a vertical movement, one for horizontal. The scheme has no degeneration of the cable pulling forces. As a result it increases energy efficiency and simplifies management, because there are no singular points of the workspace. The new manipulator scheme can find application in robotic projects where a large working area and high load capacity are required.

Key words

large-scale robot, cable-driven parallel manipulator, CDPM, suspended cable driven parallel manipulator, energy efficiency.

За последние три десятилетия манипуляторы с гибкими звеньями прошли большой путь развития и на сегодняшний день привлекают к себе большой интерес разработчиков, поскольку обладают такими полезными качествами, как большое рабочее пространство, большая подвижная масса, быстрое развер-

тывание, высокая скорость, масштабируемость. Рабочий орган приводится в движение набором гибких звеньев, роль которых могут выполнять тросы. В литературе этот робототехнический класс называется плоскопараллельными манипуляторами с тросовым приводом (ПТМ). На данный момент эти роботы являются подходящим выбором для приложений, в которых может потребоваться перемещение рабочего инструмента более чем на 100-300 метров. Примером могут служить задачи проведения онлайн-съемки спортивных мероприятий на стадионах, для работы со стеллажами в логистических центрах, обслуживания больших радиотелескопов и многого другого. Следует отметить, что достижение такого большого рабочего пространства неосуществимо для большинства роботов. Области применения тросовых манипуляторов постоянно расширяются. Однако, несмотря на все свои преимущества, эти системы имеют свои недостатки, одним из которых является невысокая точность и управляемость системы, из-за влияния свойств упругих гибких звеньев и большее потребление электроэнергии по сравнению с классическими жесткими манипуляторами. Поэтому проблема управляемости и энергоэффективности ПТМ сегодня очень актуальна.

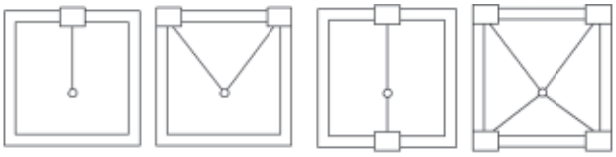
Существует два подхода к решению поставленной задачи. Первый - это программный метод, который заключается в динамическом управлении путем отслеживания сил натяжения тросов и поддержания их в минимально необходимом (оптимальном) значении [1][2]. Второй способ заключается в модернизации конструкции. При использовании классической схемы ПТМ с избыточными связями, стремятся избежать вырождения тянущих сил, это может быть достигнуто с помощью реконфигурируемой кинематической схемы, когда приводы лебедок могут перемещаться по направляющим [3] для формирования оптимальной конфигурации, или используются сторонние внешние элементы [4], изменяющие угол наклона троса. Также в одном исследовании [5] авторы рассмотрели возможность использования противовесов и пружин для компенсации веса рабочего инструмента. Таким образом, программный метод повышения энергоэффективности играет важную роль в системе управления и применим ко многим существующим схемам манипуляторов, но предел его использования всегда диктуется конструктивными особенностями ПТМ, поэтому особое внимание следует уделить кинематической схеме и конструкции.

В первой части нашей работы мы проанализировали существующие проектные решения и выявили их недостатки. После этого мы использовали теорию решения изобретательских задач (ТРИЗ) и синтезировали новую кинематическую схему, позволяющую разгрузить привода манипулятора и увеличить рабочую площадь. Определено, что тросовый манипулятор, работающий в вертикальной плоскости в прямоугольной рабочей зоне, может иметь только три привода и систему тросов, состоящую из трех основных (статических) и трех тянущих тросов. Во второй части мы провели оценочный энергорасчет манипулятора, определили зависимости нагрузочного мента на тянущих приводах в зависимости от положения рабочего инструмента. В заключение мы представили результаты сравнения нашей модернизированной схемы вполне ограниченного манипулятора и классической схемы ПТМ с избыточным количеством связей.

Основная часть

Объектом нашего исследования является параллельный манипулятор с тросовым приводом, предназначенный для работы в вертикальной плоскости. Конструктивная схема манипулятора состоит из лебедок, тросов и рабочего инструмента. Изменяя длину кабелей, можно перемещать рабочий инструмент по рабочей зоне. Мы рассмотрели кинематические схемы и конструктивные особенности таких манипуляторов. Если обозначить количество гибких звеньев (m), количество степеней свободы (n), то класс таких манипуляторов можно разделить на три типа [6]:

1. Неограниченные манипуляторы, для которых выполняется условие: $m < n+1$ (рис. 1а, 1б), они не полностью управляемы.
2. Вполне ограниченные манипуляторы, для которых выполняется условие: $m = n+1$ (рис. 1в).
3. Манипулятор с чрезмерным ограничением, для которого выполняется условие: $m = n+1$ (рис. 1г).



а) б) в) г)

Рисунок 1 — Типы CPDM: а, б) - ограниченные манипуляторы; в) - вполне ограниченный манипулятор; г) - манипулятор с чрезмерным ограничением (рабочий инструмент помечен кружком, привода прямоугольниками, расположенными на рабочей раме манипулятора)

В статье [7] авторы описывают манипуляторы третьего типа и указывают, что они представляют наибольший интерес, благодаря своим возможностям управления и безопасности. Соответственно, во многих статьях [8, 9] также рассматривается этот тип ПТМ. Однако стоит отметить, что в схеме таких роботов верхние приводы всегда находятся под влиянием нижних приводов, которые стремятся постоянно поддерживать требуемое положение рабочего инструмента. Получается, что первый и третий типы ПТМ проигрывают в энергоэффективности второму типу, поскольку эффективность силы, развиваемой приводами, уменьшается, когда рабочий инструмент перемещается к границам рабочей зоны. Из-за вырождения полезных сил потребляется больше электроэнергии, а так же возникают сингулярные решения управления. Второй тип ПТМ, хотя и менее функциональный, перемещает рабочий инструмент только вертикально (или горизонтально), но не имеет явления вырождения сил и появления сингулярности. Поэтому мы решили сосредоточиться на кинематической схеме второго типа CPDM и доработать ее, повысив возможности ее управляемости.

Плоскопараллельные механизмы, в которых каждый привод отвечает за перемещение по отдельной координате, обладают наибольшей энергоэффективностью и возможностями движениями. Примерами могут служить станки с ЧПУ, козловые краны или портальные роботы. Таким образом, была поставлена задача: «Как сделать так, чтобы каждый привод манипулятора отвечал за перемещение рабочего инструмента, не противодействуя смежным приводам». Чтобы решить эту проблему, мы рассмотрели схемы портальных роботов и модифицировали их элементы. На первом этапе мы заменили все жесткие направляющие тросами. В результате мы получили кинематические схемы, представленные на рисунке 2, в которых рабочий инструмент перемещается по одной из координат вдоль троса, а два перпендикулярных троса отвечают за перемещение по смежной координате.

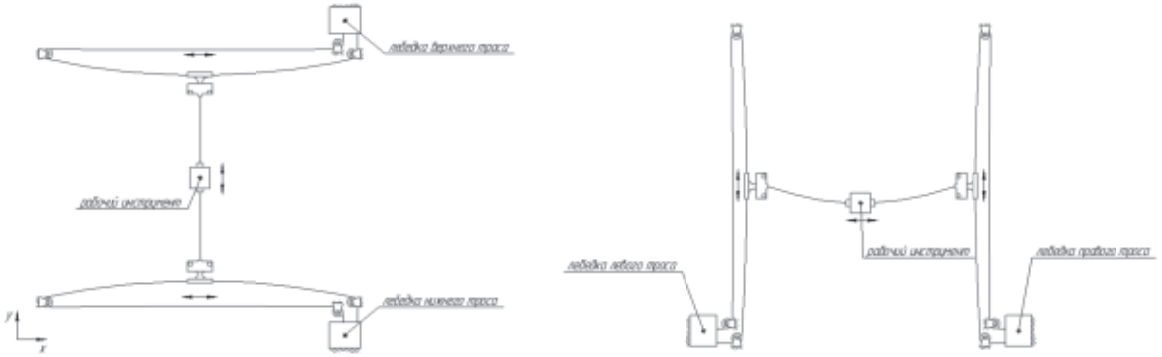


Рисунок 2 — Кинематические схемы ПТМ с гибкими направляющими

На первый взгляд, в новой схеме ничего особенного не изменилось, взаимовлияние осталось, поскольку, как и в классической схеме ПТМ, каждый привод обеспечивает натяжение троса и отвечает за перемещение рабочего инструмента. Однако есть одно отличие, в этой схеме приводы могут быть разгружены, так чтобы свести взаимовлияние к минимуму. Для этого мы ввели в конструктивную схему опорные тросы, которые будут находиться под статическим натяжением и принимать на себя основное усилие. Данная технология используется в одноканатных и многоканатных транспортных устройствах,

именуемых кабельными кранами. На опорных тросах расположены подвижные каретки, которые перемещаются с помощью тянущих тросов, закрепляемых обоими концами к барабанам лебедок. Таким образом, большая часть усилия, развиваемого приводом, будет направлена только на перемещение рабочего инструмента. Из двух схем, представленных на рисунке 2, вторую схему можно считать наиболее эффективной, поскольку вертикальные тросы имеют менее выраженный провис, а сила тяжести, действующая на горизонтальный трос, будет противодействовать инерции при вертикальном движении троса. Таким образом, для ПТМ, работающего только в вертикальной плоскости и имеющего две степени свободы, кинематическая схема представляется в виде, показанном на рисунке 3. Конструкция такой конфигурации манипулятора включает в себя:

1. Две лебедки (левая и правая) для управления тянущими тросами;
2. Два тянущих троса;
3. Три опорных кабеля: левый, правый и горизонтальный;
4. Блочная система;
5. Две каретки, к которым прикреплен горизонтальный трос;
6. Рабочий инструмент, в его конструкции имеется лебедочный механизм, позволяющий ему перемещаться по горизонтальному тросу.

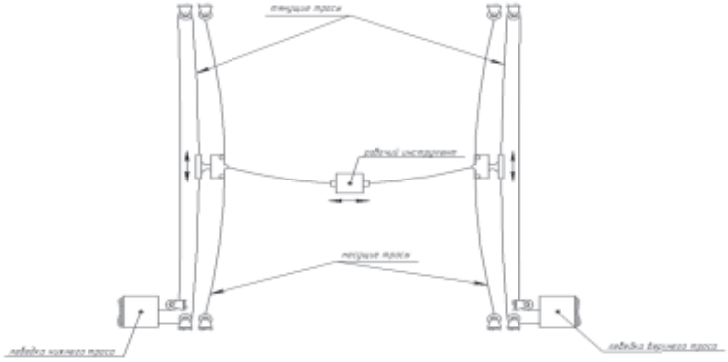


Рисунок 3 — Кинематическая схема вполне ограниченного плоскопараллельного тросового манипулятора с подвижным креплением гибкого звена

Анализ новой кинематической схемы

При анализе энергоэффективности полученной схемы мы сравнили ее с классической схемой манипулятора с избыточным управлением (рис. 1г). Для этого рассмотрели энергопотребление приводов при перемещении рабочего инструмента вдоль центральной вертикальной осевой линии рабочей зоны. Это самое энергозатратное движение. В классической кинематической схеме манипулятора полезная вертикальная сила, создающая ускорение движения, складывается из работы двух верхних приводов (T_i) и зависит от угла наклона троса к горизонтали (α_i), рисунок 4.

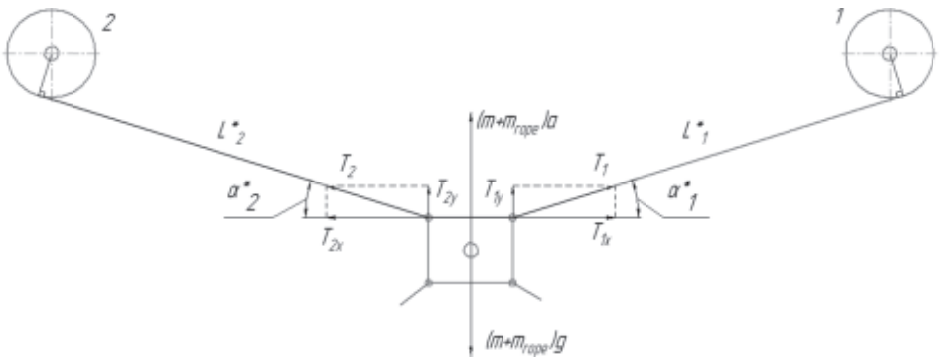


Рисунок 4 — Схема распределения усилий классической схемы ПТМ с четырьмя тросами

Таким образом, если пренебречь влиянием нижних приводов, момент нагрузки верхних двигателей (Q_p) выражается следующим выражением:

$$Q_p = (m + m_{rope})(a + g) * \frac{r}{2 * \sin(\alpha)} \quad (1)$$

(m) – масса рабочего инструмента; (m_{rope}) – масса горизонтального троса; (a) - ускорение перемещения рабочего инструмента; (r) - радиус блока; g - ускорение свободного падения.

Для представленной нами кинематической схемы (рис. 5) момент нагрузки тянущего (левого, правого) привода складывается из влияния массы каретки и силы натяжения горизонтального троса.

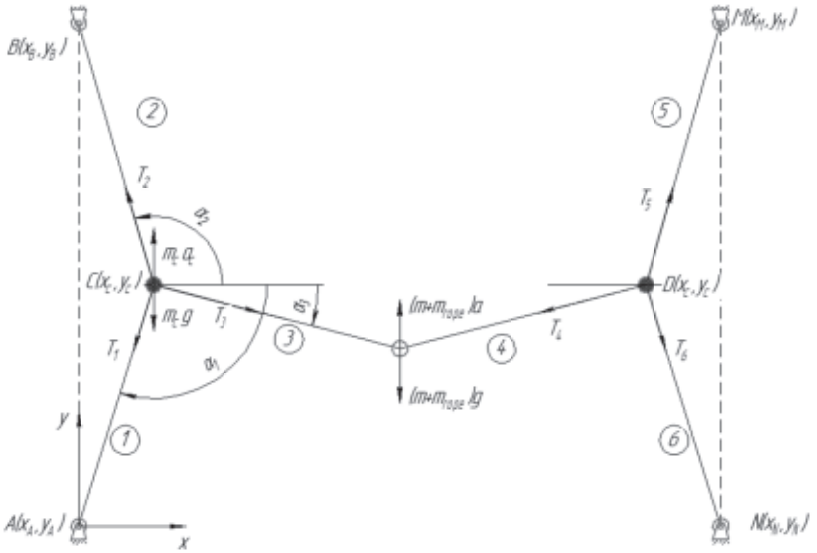


Рисунок 5 — Схема распределения усилий в новой кинематической схеме

В этой конфигурации левый и правый двигатели загружены одинаково, поэтому мы рассмотрели момент нагрузки левого привода, его можно рассчитать по формуле:

$$Q_{ld} = (T_2 - T_1) * r \quad (2)$$

T_1 (T_2) - силы натяжения первой и второй секций левого троса (так как оба конца троса закреплены на лебедке нижнего привода, значит полезный момент это разность сил натяжения); (r) – радиус блока;

Согласно второму закону Ньютона, уравнения движения вдоль вертикальной плоскости могут быть записаны для рабочего инструмента (3) и левой каретки (4):

$$(m + m_{rope})a = T_3 \sin(\alpha_3) + T_4 \sin(\alpha_4) - (m + m_{rope})g \quad (3)$$

$$m_c(a_c + g) = T_2 \sin(\alpha_2) + T_1 \sin(\alpha_1) - T_3 \sin(\alpha_3) - m_c g \quad (4)$$

(m) – масса рабочего инструмента; (m_{rope}) - масса горизонтального троса, (m_c) - масса каретки; (a) - ускорение движения рабочего инструмента; g - ускорение свободного падения.

Поскольку конфигурация симметрична, углы (α_3) и (α_4) равны и следовательно, отсутствует перемещение рабочего органа по горизонтали, получается, что горизонтальные силы компенсируются:

$$T_3 \cos\alpha_3 + T_4 \cos\alpha_4 = 0 \quad (5)$$

Мы подставили выражение (5) в (3), а затем результат в уравнение (4), в результате получили:

$$T_2 \sin(\alpha_2) + T_1 \sin(\alpha_1) = m_c (a_c + g) + \frac{(m + m_{rope})(a + g)}{2} \quad (6)$$

Учитывая, что горизонтальная составляющая компенсируется несущими тросами, которые прогибаются на небольшие углы от вертикали, Далее выражение (6) подставили в уравнение (2), получили выражение момента нагрузки на левом приводе:

$$Q_p = \left[m_c (a_c + g) + \frac{(m + m_{rope})(a + g)}{2} \right] r \quad (7)$$

При сравнении выражения (1) и выражения (7) можно заметить, что в классической схеме момент нагрузки увеличивается обратно пропорционально синусу угла наклона троса и в конечном итоге стремится к бесконечности при перемещении рабочего инструмента к краю рабочей зоны. В предложенной нами схеме момент нагрузки в начальный момент движения больше, так как добавляется масса каретки, но далее нагрузка остается постоянной на всем интервале перемещении рабочего инструмента. Также исчезает возможность сингулярных решений, так как не происходит вырождения полезного усилия привода. Для наглядного представления данного заключения и дальнейшего расчета были приняты параметры моделирования ПТМ обеих схем, представленные в таблице 1.

Таблица 1 — Параметры моделирования

Параметры	**Классическая схема ПТМ**	**Новая схема ПТМ**
Вес рабочего инструмента, кг	10	10
Ширина рабочей зоны, м	20	20
Высота рабочей зоны, м	20	20
Радиус блока лебедки, м	0.1	0.1
Начальное натяжение среднего троса, Н	-	500
Начальное натяжение боковых тросов, Н	-	1000
Масса каретки, кг	-	2
Модуль упругости тросов, Па	$3.79*10^5$	$3.79*10^5$
Площадь поперечного сечения троса [$м^2$]	$2.8274*10^{-5}$	$2.8274*10^{-5}$
Линейная весовая плотность троса, [Н/м]	0.4900	0.4900

На рисунке 6 представлены графики уравнений моментов, действующих на привода манипулятора, согласно формулам (1) и (7).

Также на основании принятых параметров манипуляторов, мы провели статический расчет сил натяжения тросов на всей площади рабочей зоны манипулятора. Для этого были решены прямые кинематические задачи для обеих схем манипуляторов, после чего были решены задачи статического анализа. На рисунке 7 представлены графики сил натяжения тросов в зависимости от положения рабочего инструмента на рабочей зоне для двух рассматриваемых схем (для новой схемы представлены силы натяжения несущих тросов). Исходя из представленных графиков, видно, что у новой представленной схемы ПТМ силы натяжения несущих тросов остаются практически постоянными, в отличие от значений сил натяжения тросов при классической схеме. Все это подтверждает ранее проведенный расчет.

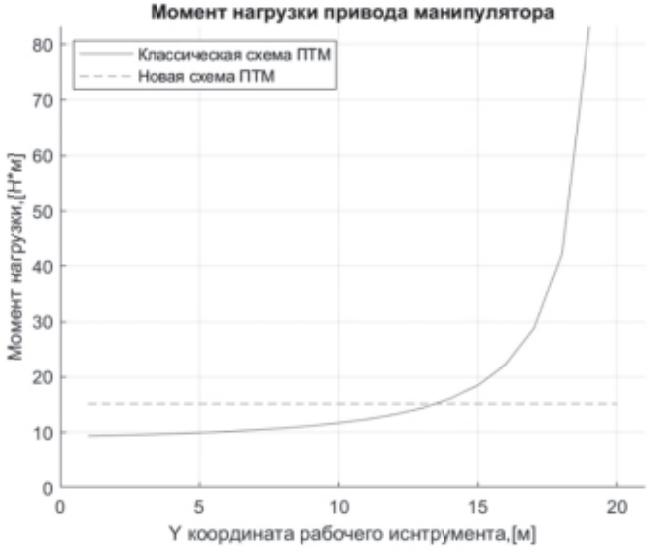
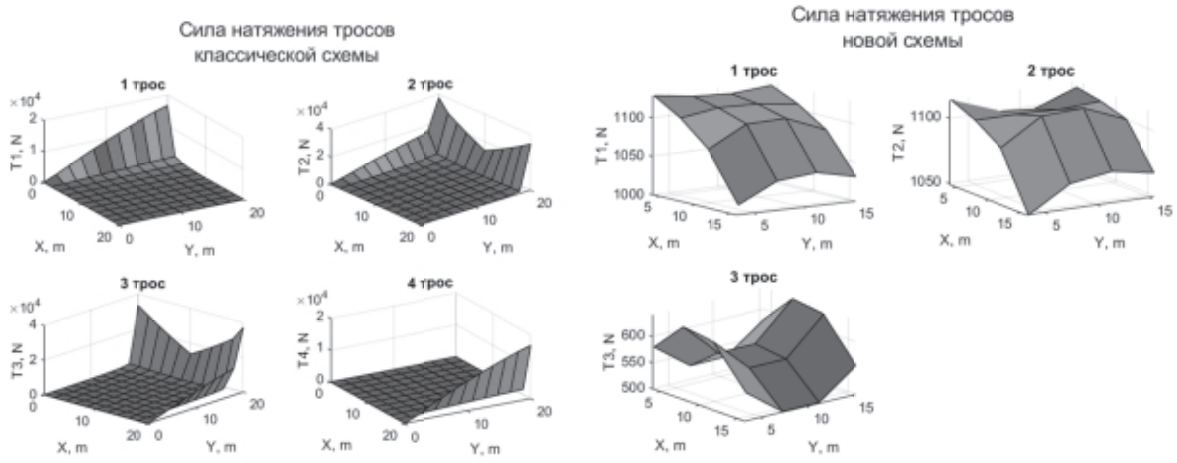


Рисунок 6 — Графики зависимости момента нагрузки на тянущий привод для классической и новой схемы ПТМ



а) б)

Рисунок 7 — Силы натяжения тросов в зависимости от положения рабочего инструмента: а) для классической схемы ПТМ; б) для новой рассматриваемой схемы ПТМ

Предлагаемая нами схема имеет преимущества перед классической схемой с четырьмя опорными тросами:

1. Повышение эффективности использования привода лебедки. Поскольку основная нагрузка приходится на опорный трос, на привод действует только тянущий трос;

2. Больший возможный размер рабочей зоны, отсутствие сингулярных решений, так как нет вырождения тянущих сил;

3. Меньшее количество приводов для работы в четырехугольной рабочей зоне;

4. Ожидается, что управляемость ниже, чем у классической схемы манипулятора с избыточным количеством связей, но выше чем у вполне ограниченных схем с двумя тросами.

Присутствует также ряд недостатков:

1. Значительную роль играет провисание тросов, которое необходимо учитывать при управлении рабочим инструментом. Другими словами, задача планирования траектории становится более сложной;

2. Меньшее количество степеней подвижности рабочего инструмента, в классической схеме рабочий инструмент может поворачиваться вокруг своей центральной оси;

3. Больший вес рабочего инструмента, так как в его конструкции находится механизм для перемещения вдоль горизонтального троса.

Для нивелирования недостатков новой представленной схемы в будущем планируется рассмотрение иной компоновки кинематической схемы манипулятора, которая соединит в себе элементы обоих схем, эскиз такого манипулятора представлен на рисунке 8. В такой конфигурации используются четыре троса как в классической схеме, но с добавлением верхнего несущего троса, вдоль которого может передвигаться каретка (3) (см. рис. 8), через которую будут проходить верхние тросы. В предлагаемой схеме результирующие силы верхних тросов будут по модулю больше сил натяжения самих тросов, а также направлены под меньшим углом к вертикали чем в классической, поэтому рабочая зона увеличится вдоль вертикали, однако также и сузится по горизонтали из-за того же эффекта. Кинематический и силовой расчет данной схемы манипулятора пока не проводился и будет рассматриваться в будущих работах.

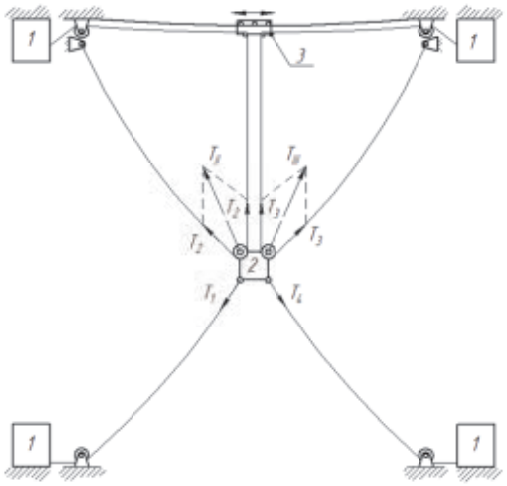


Рисунок 8 — Модернизированная схема ПТМ для дальнейшего рассмотрения

Представленные нами схемы манипуляторов могут найти свое применение в роботизированных проектах, где требуется большая рабочая зона и высокая грузоподъемность. Примером могут служить задачи автоматизированной мойки небоскребов и проведения высотных красящих работ, а также работ связанных с роботизацией складских помещений для обслуживания стеллажей. Для дальнейшей проверки работоспособности представленной кинематической схемы и доказательства ее эффективности необходимо провести математическое моделирование, а затем собрать прототип и провести ряд натурных экспериментов.

Литература

1. Rodriguez-Barroso A., Saltaren R. Tension planner for cable-drive suspended robots with unbounded upper cable tension and two degrees of redundancy// *Mechanism and Machine Theor*y-Madrid, Spain - Feb. 2020,vol.144, pp. 1-27.

2. Fang S., Franitza D., Torlo M., Bekes F., and Hiller M. Motion Control of a Tendon-Based Parallel Manipulator Using Optimal Tension Distribution// IEEE/ASME transactions on mechatronics – 2004 - vol.9, № 3 – p. 561-568.

3. Nguyen D.Q., Gouttefarde M. On the Analysis of Large-Dimension Reconfigurable Suspended Cable-Driven Parallel Robots// IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA) - Hong Kong, China , June 7, 2014 – pp.5729-5735.

4. Fang S., Franitza D., Torlo M., Bekes F., and Hiller M. Motion Control of a Tendon-Based Parallel Manipulator Using Optimal Tension Distribution// IEEE/ASME transactions on mechatronics – 2004 - vol.9, № 3 – p. 561-568.

5. Bruckmann T., Sturm C., Fehlberg L. and Reichert C. An Energy-Efficient Wire-Based Storage and Retrieval System// IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM) Wollongong, Australia, July 9-12, 2013.- pp.631-636.

6. Валюкевич Ю.А., Алепко А.В., Яковенко Д.М., Дубовсков В.В. Анализ влияния конструктивных параметров манипулятора с параллельной структурой на точность позиционирования схвата [Текст]// технические науки .фундаментальные исследования. -2016.- № 11. – С. 687 – 690

7. Kraus W., Spiller A. and Pott A. Energy Efficiency of Cable-Drive Parallel Robots//IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) - Stockholm, Sweden, May 16-21, 2016. – pp.894-901.

8. Bruckmann T, Mikelsons L. , Brandt T., Hiller M., and Schramm D. Wire robots part I - kinematics, analysis & design Parallel Manipulators - New Developments// ARS Robotic Books. I-Tech Education and Publishing - Vienna, Austria, 2008. – pp. 109–132.

9. Bruckmann T., Sturm C., Fehlberg L. and Reichert C. An energyefficient wire-based storage and retrieval system// IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2013 - pp. 631–636.

А.В. Козов

РЕАЛИЗАЦИЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ДИСКРЕТНО-СОБЫТИЙНОЙ СИСТЕМЫ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМИ РОБОТАМИ

НУЦ «Робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, alexey.kozov@gmail.com

Аннотация

Статья посвящена математической модели дискретно-событийной системы группового управления для мобильных роботов и её реализации в виде компьютерной модели. Проектирование дискретно-событийных систем группового управления связано с проблемами чрезвычайно большого числа состояний системы и с ограничениями существующих инструментов. На основе подхода модельно-ориентированного проектирования сформулированы требования к компьютерной модели. Представлена математическая модель дискретно-событийной системы группового управления на основе вычислительного графа алгоритма работы системы, а также проведён анализ существующих подходов к реализации компьютерной модели. Выбран подход с использованием предметно-ориентированного языка, описаны реализованные классы компьютерной модели на языке C++. Применение реализованной модели продемонстрировано на примере создания модели дискретно-событийной системы группового управления выходом на рубеж двух мобильных роботов.

Ключевые слова

Система управления, мобильный робот, дискретно-событийная система, групповое управление, математическая модель, компьютерная модель, реализация модели.

A.V. Kozov

AN IMPLEMENTATION OF THE COMPUTER MODEL OF DISCRETE-EVENT GROUP CONTROL SYSTEM FOR MOBILE ROBOTS

Science and Educational Center «Robotics» Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia, alexey.kozov@gmail.com

Abstract

This paper discusses mathematical and computer models of a discrete-event group control system for mobile robots. The requirements for the computer model of such a system are presented. The paper contains the description of the mathematical model of a discrete-event group control system and the analysis of existing approaches to the computer model implementation. The implementation considered in the paper uses a domain-specific language; the developed classes of the computer model in C++ are presented. The application of the implemented model is demonstrated on the example of control system for the group action of two robots.

Key words

Control system, mobile robot, discrete-event system, group control, mathematical model, computer model, model implementation.

Повышение эффективности и расширение области применения мобильных робототехнических комплексов (МРТК) возможно путём их объединения под управлением единой системы группового управления (СГУ). Для применения группы в недетерминированной изменяющейся среде при отсутствии или недостоверности априорной информации, например, при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций, СГУ должна соответствовать высоким требованиям по быстродействию, отказоустойчивости, автономности и адаптивности. СГУ осуществляет взаимодействие с человеком-оператором, обеспечивает согласование действий агентов и оперативное реагирование на изменения

внешней среды для достижения поставленной цели [1-3]. СГУ имеет иерархическую структуру, верхние уровни которой обеспечивают согласование действий МРТК и служат основой для реализации алгоритмов группового управления, обеспечивающих движение строем, манипулирование объектами или выполнение иных задач. Для этих уровней используют дискретно-событийное представление, при котором процесс функционирования системы описывается последовательностью событий [4, 5]. Разработка верхних уровней – дискретно-событийной СГУ (ДССГУ) – является одной из наиболее сложных и наименее автоматизированных задач создания СГУ [3, 4]. Проектант ДССГУ сталкивается не только с проблемой чрезвычайно большого числа состояний системы, но и с ограничениями инструментов. Существующие инструменты преимущественно предназначены для объектно-ориентированной разработки программного обеспечения и не учитывают в полной мере особенностей ДССГУ как объекта проектирования.

Проектирование ДССГУ имеет итерационный характер: вначале проектант создаёт математическую модель системы, выполняет верификацию и синтез управления, далее по этой модели происходит реализация системы управления в виде программного кода для бортовых вычислителей МРТК с последующим тестированием. Указанные шаги повторяются до достижения результата с требуемыми показателями качества. Для моделирования дискретно-событийной системы применяют математический аппарат конечных автоматов и сети Петри, которые имеют высокий уровень абстракции. Существующие инструменты программной реализации, например, фреймворки SMACH или DEVS, не обеспечивают полного соответствия системы исходной математической модели. Кроме того, в случае выявления проблем в реализованной системе и её модификации изменения зачастую не отражаются в модели, что ведёт к потере адекватности проектируемой системе. На протяжении жизненного цикла системы данная проблема, как правило, усугубляется.

Подход модельно-ориентированного проектирования направлен на решение указанной проблемы. Он предполагает, что проектант выполняет разработку, испытания и модификации проектируемой системы исключительно на модели, а программная реализация является её производной и формируется, например, путём генерации кода [6, 7]. Подход предполагает использование *компьютерной модели*, которая представляет собой совокупность данных и программного кода для работы с этими данными [8]. Отметим, что существующие инструменты, реализующие данный подход, например, MATLAB или OpenModelica, являются инструментами моделирования общего назначения, обладают избыточной для проектирования ДССГУ функциональностью, а используемые ими модели имеют большой размер, их редактирование и даже просмотр иными средствами затруднён.

Таким образом, для автоматизации процессов проектирования ДССГУ следует разработать компьютерную модель системы и специализированные инструменты для работы с ней. Такая модель, рассматриваемая как прототип цифрового двойника проектируемой системы, должна обеспечивать:

- отражение иерархической структуры и иных особенностей объекта проектирования;
- наглядное визуальное представление системы в привычном проектанту виде;
- просмотр информации о модели без использования специализированных инструментов;
- применение формальных методов верификации и синтеза управления;
- симуляцию работы ДССГУ в виртуальной компьютерной среде;
- автоматическую генерацию программного кода для развёртывания системы на бортовых вычислителях МРТК.

Основой для компьютерной модели служит математическая модель ДССГУ.

Математическая модель дискретно-событийной системы группового управления

Решение задачи синтеза управления для дискретно-событийной системы позволяет получить управляющий компонент (супервизор), который определяет структурные компоненты ДССГУ и алгоритм их взаимодействия [2]. Такой алгоритм имеет графовое представление в виде вычислительного графа – ориентированного мультиграфа $\langle A,C \rangle$, где A – множество вершин, а C – мультимноже-

ство информационных связей между ними. Каждая вершина $a_i \in A$, $i = 1,2,\ldots,|A|$, где $|\cdot|$ – мощность множества, соответствует одному шагу алгоритма или информационно-расчётной задаче (ИРЗ) и является структурным компонентом ДССГУ. Мультимножество дуг вычислительного графа C определяет информационные связи между ИРЗ, $C = \langle \tilde{C}, m_C \rangle$, где $\tilde{C} = A \times A$, $\cdot \times \cdot$ – декартово произведение множеств, $m_C : \tilde{C} \to \mathbb{N}$ – функция, определяющая кратность дуги, $\mathbb{N} = 0,1,2,\ldots$. Существование дуги $c_{i,j} \in C$, т. е. $m_C(c_{i,j}) > 0$, $c_{i,j} = \langle a_i, a_j \rangle \in \tilde{C}$, $a_i \in A$, $a_j \in A$, $j = 1,2,\ldots,|A|$, означает наличие информационной связи между вершинами a_i и a_j – передачу данных между ИРЗ, от a_i к a_j. Кратность дуг обусловлена возможностью существования разных интерфейсов взаимодействия между одними и теми же ИРЗ, например, при передаче данных разных типов в зависимости от результата выполнения. В ДССГУ информационная связь $c_{i,j}$ вычислительного графа означает взаимодействие структурных компонентов системы согласно некоторому интерфейсному контракту, интерпретируемое как возникновение события. Данные, характеризующие информационную связь $c_{i,j}$, описывает кортеж их типов $\langle T_1, T_2, \ldots, T_n \rangle$, где n – число передаваемых при взаимодействии a_i и a_j типов данных.

Для отражения процессов передачи и обработки информации в проектируемой системе и упрощения генерации кода целесообразно дополнить вычислительный граф информацией о передаваемом при взаимодействии кортеже типов, а также функцией, которая ставит в соответствие каждому событию такой кортеж. Результатом будет *графовая модель* ДССГУ, которая служит основой компьютерной модели проектируемой системы.

Для компьютерной модели ДССГУ целесообразно использовать визуальное представление в виде сетей Петри, которые имеют широкое применение для описания и моделирования процессов функционирования дискретно-событийных систем. Сеть Петри представляет собой кортеж $\langle P, T, I, O, \mu_0 \rangle$, где $P \neq \varnothing$ – конечное множество позиций, $T \neq \varnothing$ – конечное множество переходов, такие что $P \cap T = \varnothing$; $I : T \to P^\infty$ – входная функция, которая является отображением множества переходов T на мультимножество P^∞ позиций $p \in P$; $O : T \to P^\infty$ – выходная функция, которая также является отображением множества переходов на мультимножество позиций; μ_0 – начальная маркировка. Сеть Петри обеспечивает простое и наглядное представление как для последовательной, так и для параллельной (независимой) работы отдельных компонентов моделируемой системы. При моделировании событиям, т.е. информационным связям графовой модели, обычно сопоставляют переходы, а состояниям системы или ИРЗ – позиции сети Петри [9].

Сеть Петри имеет графическое представление в виде двудольного ориентированного мультиграфа с двумя типами вершин, соответствующим позициям (обозначаются кружками) и переходам (обозначаются отрезками прямых или прямоугольниками). Связи между позициями и переходами обозначаются стрелками согласно функциям I (от позиции к переходу) и O (от перехода к позиции) с соответствующей кратностью. Маркировка сети изображаются точками или цифрами внутри позиций. Такой способ представления работы системы обладает наглядностью и привычен разработчику.

Подходы к реализации компьютерной модели

Требования к компьютерной модели ДССГУ предполагают возможность её «запуска» в виртуальной среде для симуляции работы проектируемой системы. При этом следует обеспечить наглядность и интерпретируемость такой симуляции. Реализация компьютерной модели как детерминированного конечного автомата (далее просто автомата) позволит обеспечить указанные возможности. Для определения способа организации программного кода и структуры данных компьютерной модели рассмотрим существующие подходы к описанию и реализации автоматов (рис. 1). В зависимости от парадигмы и языка программирования можно выделить императивное, объектно-ориентированное и декларативное описание. Рассмотрим перечисленные подходы подробнее.

Рисунок 1 — Подходы к реализации компьютерной модели

Императивное описание автомата, характерное для процедурных языков, таких как Fortran или C, использует явное указание последовательности инструкций процессору для реализации состояний и переходов между ними. События кодируют переменные целочисленного типа или типа-перечисления. Для описания переходов между состояниями используются вложенные конструкции выбора (switch-case) или ветвления (if-else), которые обрабатывают значение переменной-события и возвращают новое состояние. Другим вариантом, более удобным на практике, является реализация таблицы переходов автомата в виде двумерного массива. В такой таблице каждой строке соответствует состояние, а столбцу – событие. Ячейка хранит идентификатор или указатель на функцию состояния, в которое должен перейти автомат из состояния, соответствующего строке ячейки, по событию, соответствующему её столбцу. Императивный подход ориентирован прежде всего на описание и реализацию конкретного автомата, а реализованную таким способом модель сложно модифицировать и повторно использовать, поскольку для этого необходимо фактически изменять её целиком. Частично устранить указанные недостатки позволяет объектно-ориентированный подход, применимый в языках с поддержкой парадигмы объектно-ориентированного программирования.

Парадигма объектно-ориентированного программирования подразумевает декомпозицию предметной области на взаимодействующие объекты (сущности), каждый из которых является экземпляром определённого класса. Целью объектной декомпозиции является упрощение независимой модификации выделенных сущностей и их повторного использования, при этом зачастую происходит усложнение организации программного кода. Так, для объектно-ориентированного описания автомата предназначен шаблон (паттерн) проектирования State, который позволяет объекту изменять своё поведение в зависимости от внутреннего состояния [10]. Шаблон State вводит абстрактный (не имеющий экземпляров) базовый класс AbstractState и класс Context, в котором определён интерфейс взаимодействия с автоматом для внешних по отношению к нему сущностей (рис. 2). Наследники AbstractState (ConcreteStateA, ConcreteStateB на рис. 2) реализуют конкретные состояния автомата и локализуют внутри себя зависящее от них поведение. Класс Context содержит указатель на экземпляр наследника AbstractState, который представляет текущее состояние и каким-либо образом заменяется при переходе автомата в другое состояние. Таким образом, путём более сложной организации описания достигаются большая гибкость и упрощение модификации автомата. Однако данный подход, так же как и императивный, предназначен для реализации конкретной системы и не обладает необходимым уровнем абстракции для описания и реализации компьютерной модели ДССГУ.

Декларативное описание автомата определяет состояния и правила переключения между ними, но в общем случае не задаёт конкретного алгоритма его реализации. Иными словами, описывается, *что* должно быть сделано, в отличие от императивных инструкций, задающих, *как* должна быть выполнена работа [11]. За счёт этого достигаются высокий уровень абстрагирования от реализации, выразительность и простота. Декларативное описание характерно для функциональных языков, например, Haskell, графических языков, например, UML или ДРАКОН, и специализированных предметно-

ориентированных языков (англ. domain-specific language, DSL). Графические языки и DSL при наличии инструментов редактирования и трансляции в исполняемую программу обеспечивают наилучшую наглядность и гибкость, т. е. простоту модификации, для пользователя, не являющего программистом. Кроме того, такое описание является универсальным и подходит для представления автомата произвольной конфигурации. Отметим, что DSL позволяет реализовать декларативное описание даже на императивных языках программирования и выполнить трансляцию такого описания на другой язык в требуемом стиле – процедурном, объектно-ориентированном, функциональном. Это делает использование DLS для описания автомата наиболее удобным способом программной реализации компьютерной модели ДССГУ.

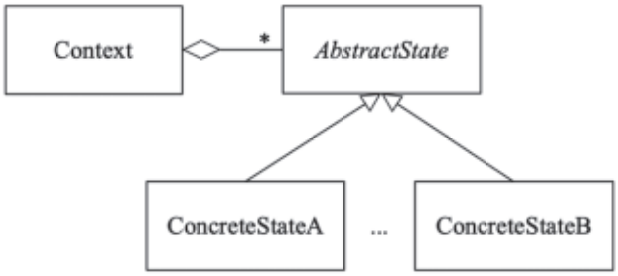


Рисунок 2 — Объектно-ориентированное описание автомата при помощи шаблона State

Таким образом, для организации программного кода и структуры данных компьютерной модели ДССГУ следует использовать DSL для описания автомата, однако для удобства взаимодействия пользователя с компьютерной моделью необходимы простой формат хранения и инструменты, обеспечивающие создание и модификацию моделей.

Реализация компьютерной модели дискретно-событийной системы группового управления

Для компьютерной модели ДССГУ реализован внутренний, т.е. использующий синтаксис языка реализации, DSL на языке C++ в объектно-ориентированном стиле (рис. 3). DSL представляет собой библиотеку классов, выделенных при декомпозиции предметной области для описания графовой модели ДССГУ.

В основе DSL лежат классы события Event и состояния State (ИРЗ графовой модели), которые содержат информацию для своего визуального представления на экране. Их использует базовый класс компонентного автомата Automation. Для симуляции работы системы предусмотрен механизм переключения, аналогичный правилам изменения маркировки сети Петри, где позициям соответствуют объекты состояний со счётчиком меток, а переходам – событий. Класс Automation содержит два контейнера для хранения событий и состояний в виде «ключ-значение». Ключом в каждом контейнере является уникальное строковое название события или состояния, а значением – объект вспомогательного шаблонного класса, содержащий соответствующий объект события или состояния и его входные и выходные связи. Дублирование информации о связях для событий и состояний связано с требованием быстрого поиска таких связей как для событий, так и для состояний. Согласованность (полнота и непротиворечивость) данных о связях обеспечена за счёт ограничения на их изменение, которое возможно только посредством открытых (публичных) методов класса Automation. Методы класса Automation также обеспечивают следующие инварианты: отсутствие связей между объектами состояний или между объектами событий, неотрицательная кратность связей, неотрицательное число меток.

Информация о требуемом поведении системы, т.е. спецификации поведения, для синтеза управляющего компонента представлена в классе Specification. Требуемое поведение задаётся в виде последовательностей событий, каждая из которых может ссылать на другую по правилам логической структуры последовательности строк [12]. Класс Specification хранит контейнер с такими последовательностями и служебную информацию для ускорения проверки спецификации на корректность.

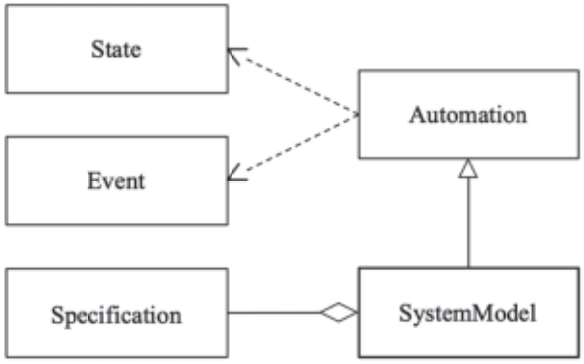


Рисунок 3 — Диаграмма классов компьютерной модели ДССГУ

Класс компьютерной модели ДССГУ SystemModel хранит название модели, её версию и автора, список компонентных автоматов, спецификацию и служебную информацию. Он предоставляет методы для добавления компонентных автоматов, составления спецификаций с проверкой корректности, а также для симуляции работы системы. В качестве компонентных автоматов допустимы объекты класса SystemModel, что позволяет отразить иерархическую структуру системы.

Хранение компьютерной модели реализовано в виде текстового файла, соответствующего синтаксису языка описания графов DOT. Преобразование объекта класса SystemModel в DOT-представление и обратно выполняет класс-транслятор. Результат трансляции в DOT-представление может быть записан, например, в базу данных, что позволит создать базу моделей. Кроме того, такой формат хранения позволяет при необходимости просматривать и редактировать данные модели при помощи сторонних средств.

Разработанная библиотека предоставляет разработчику возможности для создания моделей ДССГУ в виде программного кода на C++, а также может использоваться в графических инструментах автоматизации проектирования.

Применение компьютерной модели дискретно-событийной системы группового управления

Проиллюстрируем применение компьютерной модели на примере разработки ДССГУ для группового действия выхода на рубеж. Для упрощения предположим, что рассматриваемое групповое действие является единственной функциональной возможностью подгруппы МРТК, автономное движение к заданной позиции – единственной функциональной возможностью робота, а их выполнение всегда завершается успешно. Указанные допущения позволяют продемонстрировать на методическом примере возможности применения компьютерной модели.

Групповое действие имеет следующее содержательное описание. По событию e_s подгруппа из N МРТК должна занять рубеж, заданный точками P_1, P_2 с координатами x_1, y_1 и x_2, y_2 соответственно. Роботы подгруппы пронумерованы от 1 до N и должны последовательно, согласно своим номерам, стартовать с текущей позиции и занять свою позицию на рубеже, после чего групповое действие завершается событием e_s. Позиция P^i -го робота на рубеже определяется в соответствии с его порядковым номером таким образом, чтобы МРТК подгруппы оказались равномерно распределены вдоль линии рубежа в порядке возрастания своих номеров. Планирование траектории и движение по ней от стартовой до целевой позиции с учётом ориентации в рамках индивидуального действия выполняет подсистема автономного движения робота [13, 14]. При возникновении события e_s^i робот с номером $i=1,2,\ldots,N$ начинает автономное движение к позиции P^i, а событие e_f^i подтверждает её достижение. Такое индивидуальное действие описывает компонентный автомат с состояниями ожидания и движения, начальным является состояние ожидания.

Компьютерная модель ДССГУ для выполнения описанного группового действия двумя МРТК представлена в виде сети Петри на рис. 4. Компонентные автоматы G^1, G^2 выделены шриховыми линиями. Синтез управляющего компонента (позиции сети Петри p_1, p_2, p_3, p_4) выполнен по мето-

ду домино [9, 12]. Отметим, что события e_s^1, e_s^2 запуска индивидуального действия в модели включают информацию о кортеже передаваемых при взаимодействии ИРЗ типов $double,double$, где $double$ – тип числа с плавающей точкой для передачи координат целевой точки автономного движения. Аналогичным образом событие e_s содержит информацию о координатах рубежа в виде кортежа типов $double,double,double,double$.

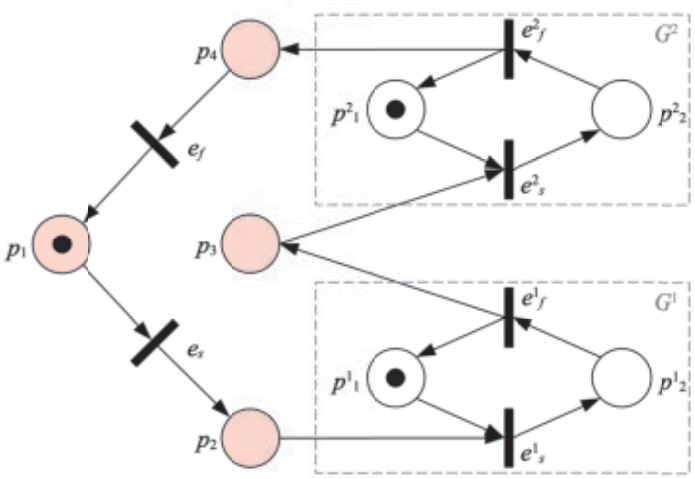


Рисунок 4 — Визуальное представление компьютерной модели ДССГУ для группового действия выхода на рубеж двух роботов

Таким образом, компьютерная модель ДССГУ обеспечивает не только наглядное визуальное представление проектируемой системы, но повышение адекватности модели, упрощение и сокращение сроков разработки, в том числе за счёт генерации кода. Кроме того, такая модель позволяет определить требования к данным и каналам связи, которые обеспечат функционирование системы с заданными параметрами качества.

Особенности ДССГУ как объекта проектирования требуют применения специализированных инструментов для обеспечения качества, упрощения и сокращения сроков разработки. Существующие инструменты не обеспечивают полного соответствия проектируемой системы исходной математической модели, а также не способны обеспечить адекватность модели на протяжении жизненного цикла. Направленный на решение указанных проблем подход модельно-ориентированного проектирования предполагает использование компьютерной модели для разработки, испытаний и модификаций проектируемой системы. Сформулированные требования к компьютерной модели ДССГУ позволили определить математическую модель системы и выбрать способ организации программного кода и структуры данных для реализации компьютерной модели. Реализация компьютерной модели в виде DSL описания автоматов на языке C++ обеспечивает наглядное визуальное представление проектируемой системы, а также позволяет определить требования к данным и каналам связи. Кроме того, представленная компьютерная модель может служить основой для создания методологии и специализированной системы автоматизированного проектирования ДССГУ МРК**Т**.

Литература

1. Власов К.С., Тачков А.А., Данилов М.М. Тактика группового применения наземных робототехнических комплексов при тушении пожаров в резервуарных парках // Пожарная безопасность. 2020. № 2(99). С. 28-35. DOI 10.37657/vniipo.2020.99.2.002.

2. Козов А.В. Динамическая реконфигурация системы управления мобильными роботами при выполнении группового действия // Экстремальная робототехника. СПб., 2020. С. 78-83.

3. Волосатова Т.М., Козов А.В., Тачков А.А. Система группового управления мобильными роботами с позиций автоматизированного проектирования // Информационные технологии. Т. 26, № 5. С. 274-282. DOI 10.17587/it.26.274-282.

4. Козов А.В. Модели и методы проектирования динамически реконфигурируемой системы группового управления мобильными роботами // Автоматизация процессов управления. 2021. № 1(63). С. 130-139. DOI 10.35752/1991-2927-2021-1-63-130-139.

5. Wonham W.M., Cai K. Supervisory Control of Discrete-Event Systems. Cham: Springer, 2018. 502 p.

6. Талукдер Ю.З. Модельно-ориентированное проектирование систем автоматического управления в инженерном образовании // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 3. С. 89.

7. Krizan J. et al. Automatic Code Generation from Matlab/Simulink for Critical Applications // 2014 IEEE 27th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE). Toronto, 2014. P. 1-6.

8. ГОСТ Р 57412–2017. Компьютерные модели в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий. Общие положения: утверждён и введён в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 10 марта 2017 г. № 110-ст: дата введения 2017-07-01.

9. Амбарцумян А.А. Сетецентрическое управление на сетях Петри в структурированной дискретно-событийной системе // Управление большими системами. 2010. Т. 30.1. С. 506-535.

10. Гамма Э. и др. Паттерны объектно-ориентированного проектирования. СПб.: Питер, 2020. 448 с. (Серия «Библиотека программиста»). ISBN 978-5-4461-1595-2.

11. Фаулер М. Предметно-ориентированные языки программирования. М.: Вильямс, 2011. 572 с.

12. Амбарцумян А.А. Моделирование и синтез супервизорного управления на сетях Петри для рассредоточенных объектов. I. Механизм взаимодействия и базовый метод // Автоматика и телемеханика. 2011. Т. 72, № 8. С. 151-169.

13. Тачков А.А. и др. Принципы построения систем автономного управления движением наземных робототехнических комплексов специального назначения // Робототехника и техническая кибернетика. 2022. Т. 10. № 2. С. 121-132. DOI 10.31776/RTCJ.10205.

14. Тачков А.А. и др. Реализация траекторного регулятора наземного робототехнического комплекса на основе модельного прогнозирующего управления // Робототехника и техническая кибернетика. Т. 10. № 1. СПб.: ЦНИИ РТК. 2022. С. 43-54. DOI 10.31776/RTCJ.10105.

Е.К. Игнатиади, И.К. Петушок

СИСТЕМА ПОДГОТОВКИ ОПЕРАТОРОВ И ОБСЛУЖИВАЮЩЕГО ПЕРСОНАЛА НА ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РТК

ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург, e.ignatiadi@rtc.ru, petushok@rtc.ru

Аннотация

В статье описаны основные параметры системы подготовки операторов на перспективные робототехнические комплексы (РТК). Рассматривается необходимость участия операторов в оценке алгоритмов управления РТК и его интерфейсе с помощью гибридной реальности и моделей роботов. Предлагается метод самообучения РТК с использованием экспертной оценки квалифицированных операторов и интеллектуальной системой управления с применением генетического алгоритма. Рассматривается задача оператору натренировать нейросеть в точности следовать примеру человека, с передачей знаний последующим или аналогичным образцам РТК.

Ключевые слова

Система подготовки операторов, отладочно-моделирующий комплекс, робототехнический комплекс, генетические алгоритмы.

E.K. Ignatiadi, I.K. Petushok

THE SYSTEM OF TRAINING OPERATORS AND MAINTENANCE PERSONNEL FOR PROMISING RTCs

Russian State Scientific Centre for Robotics and Technical Cybernetics, St. Petersburg, Russia, e.ignatiadi@rtc.ru, petushok@rtc.ru

Abstract

The article describes the main parameters of the operator training system for advanced robotic complexes (RTK). The necessity of operators' participation in the evaluation of RTK control algorithms and its interface using hybrid reality and behavioral models of robots is considered. A method of self-training of RTK using expert evaluation of qualified operators and an intelligent control system using a genetic algorithm is proposed. The task is considered for the operator to train the neural network to follow exactly the example of a person, with the transfer of knowledge to subsequent or similar RTK samples.

Key words

Training system, virtual training ground, robotic complex, genetic algorithms.

Развитие робототехники в нашей стране в условиях давления стран Запада невозможно без взаимодействия между разработчиками и персоналом по обслуживанию и управлению роботами. Планируемое увеличение вновь разрабатываемых робототехнических комплексов (РТК) создают определенные сложности при подготовке операторов и обслуживающего персонала. Наиболее существенно это может отразиться на качестве подготовки операторов, от профессионализма и опыта которых зависит результат применения техники во всех сферах деятельности, связанных с риском для жизни человека. Непредсказуемое количество вводных, природных факторов и аварийных ситуаций не дает возможности заранее создать программы обучения операторов, а традиционные макеты и тренажеры, как правило, не соответствуют реальным условиям применения РТК.

Одной из целей создания отладочно-моделирующего комплекса является качественная подготовке персонала РТК и самообучение их с помощью интеллектуальной системы управления с применением генетического алгоритма.

Основным требованием, обеспечивающим достижение целей подготовки специалистов, является формирование у них высокопрофессиональных навыков выполнения функциональных обязанностей по исполняемой должности. На современном этапе главным компонентом в системе подготовки операторов является тренажерная техника.

Преимуществами использования тренажерной техники являются [1]:

– более низкий уровень затрат на подготовку, прежде всего за счет существенно более низкой стоимости эксплуатации учебно-тренировочных средств (УТС) по сравнению со стоимостью эксплуатации реальной техники, привлекаемых сил и средств обеспечения подготовки;

– обеспечение более планомерной подготовки, поскольку мероприятия подготовки на УТС могут проводиться независимо от погодных условий и возможностей сил по обеспечению выполнения задач на полигонах;

– обеспечение отработки действий в нештатных и аварийных ситуациях, которые в реальных условиях не могут быть воссозданы из-за опасности возникновения фактических аварий и человеческих жертв;

– обеспечение адекватности моделируемой обстановки современным задачам, что практически невозможно воспроизвести при натурном моделировании с использованием реальных сил на полигоне.

Но при подготовке операторов и обслуживающего персонала РТК необходимо изменить подход в освоение новой техники, так как РТК с элементами искусственного интеллекта эволюционируют от поколения к поколению. Поэтому операторы должны не только изучать РТК, но и обучать его на ранних стадиях разработки. Использование современных технических средств обучения возможно посредством интеграции с интеллектуальными средствами разработки, такими как отладочно-моделирующий комплекс. Это должно способствовать повышению эффективности работы предприятий промышленности и проведению перспективных научных исследований в области управления сложными робототехническими системами [2]. Интеллектуальные технологии по моделирования процессов создания РТК предполагают решения задач в штатных и аварийных ситуациях. В этих случаях необходим опыт людей, знакомых с эксплуатацией аналогичных РТК, при котором оценивается не только уровень подготовки оператора, но и его мнение о возможностях робота, алгоритмах управления и интерфейсе с помощью гибридной реальности и интеллектуальной системой управления с применением генетического алгоритма. Интегрированные элементы гибридной реальности предполагают объединение в едином информационном пространстве виртуальной среды, функциональных, поведенческих и кибернетических моделей РТК, систем оценки правильности действия и заложенных алгоритмов на основе нейросетей. При этом заложен элемент обратной связи, при котором оценка РТК производится оператором и учитывается при разработке и корректировке программного обеспечения. Задача операторов, прежде всего, состоит в помощи разработчикам в создание генома РТК одного вида.

В работе на отладочно-моделирующем комплексе взаимодействуют как эксплуатирующая организация, так и предприятие разработчик:

Организация, эксплуатирующая РТК, производит:

– экспертную оценку;
– эргономическую экспертизу;
– подготовку персонала на новые РТК;
– выдачу рекомендаций по разработке РТК.

Организация-разработчик производит:

– интеграцию моделей РТК в отладочно-моделирующий комплекс;
– разработку и настройку модели внешней среды;
– разработку 3D-моделей объектов;
– разработку макетов для эргономических исследований.

Подготовка операторов РТК начинается с ранних стадий разработки роботов, на этом же этапе функциональная модель РТК внедряется в виртуальную среду.

В качестве основы для самообучения РТК с помощью операторов на отладочно-моделирующем ком-

плексе используется интеллектуальная система управления с применением генетического алгоритма:

– виртуальные сцены внешней среды и объектов (ситуаций) с управляемыми динамическими элементами;

– модели (функциональные, поведенческие, кибернетические и др.) перспективных РТК, способные взаимодействовать с виртуальными сценами и динамическими элементами;

– имитаторы пультов управления, с помощью которых производится интерактивное управление роботом в режиме реального времени;

– сетевое обеспечение взаимодействия нескольких РТК в единой, общей для всех участников, виртуальной сцене.

Этапы подготовки операторов и самообучения РТК представлены на рисунке 1.

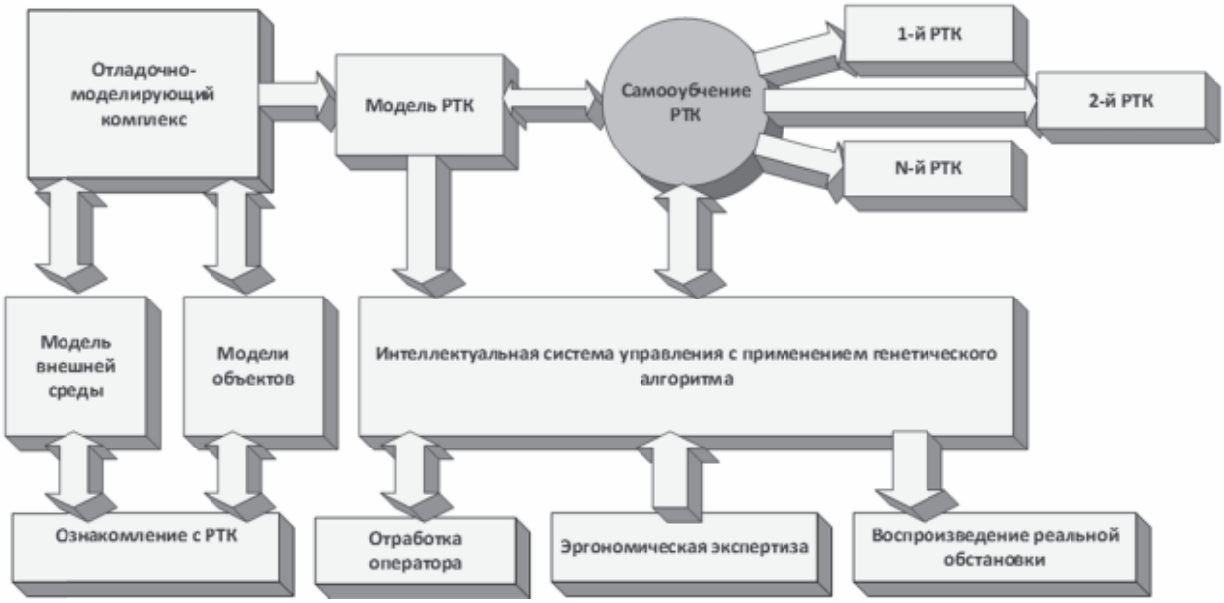


Рисунок 1 — Этапы подготовки операторов на перспективные РТК

Фактически это новая научно-техническая комплексная задача подготовки операторов для последующего самообучения РТК и групп РТК, её придется решать для разных сред и с моделированием различных технических средств и объектов.

Таким образом, отладочно-моделирующий комплекс для подготовки операторов и самообучения РТК включает несколько компонентов:

– автоматизированная система обучения с интерактивными руководствам оператора, компьютерными обучающими программами;

– интеллектуальную систему управления с применением генетического алгоритма для оценки действий оператора РТК, функционального и поведенческого анализа моделей РТК, эргономики интерфейса и пультов управления;

– ряда специализированных стендов, моделирующих опытные образцы РТК;

– вычислительно моделирующий комплекс, имитирующий внешнюю среду, статистические и динамические модели;

– система коллективного отображения информации.

Подготовка операторов и обслуживающего персонала отличается от традиционной, тем что оператор, выступает в роли тестировщиков функционала и поведения перспективных РТК, обучается сам и обучает робота. На отладочно-моделирующем комплексе, с помощью интеллектуальной системы управления оператором отрабатывается алгоритмы управления роботом, запоминаются оптимальные действия и с помощью генетического алгоритма передаются на аналогичные РТК. Дополнительно оператор производит эргономическая оценка систем управления РТК и групп РТК, и выдает свои рекомендации.

Для подготовки операторов и самообучения РТК на отладочно-моделирующем комплексе выполняются следующие функции:

1. Подготовка задания:
- выбор РТК и его оборудования;
- задание объектов взаимодействия;
- моделирование угроз;
- выбор модели внешней среды, задание тактической обстановки.

2. Проведение мероприятия:
- задание вводных по отказу оборудования;
- изменение траекторий движения, ввод новых объектов;
- оперативные скачки времени, изменение метеорологических условий.

3. Результаты выполнения миссии по отработке РТК:
- ситуационный анализ;
- выбор оборудования РТК;
- выбор оптимальной модели РТК;
- выбор модели поведения;
- самообучение РТК, как передача генома последующим однородным типам роботов.

4. Оценка выполнения миссии:
- выработка критериев выполнения задач;
- автоматизированная оценка действий оператора;
- экспертная оценка оператора об алгоритмах действия РТК.

Робот трудится в реальном мире, поэтому ему доступно куда более широкое пространство решений, а в случае ошибки результат может быть катастрофичен. Поэтому задачей оператора натренировать нейросеть в точности следовать примеру человека, а если происходит непредвиденное отклонение от такой программы – понимать, что произошла ошибка, и пытаться её устранить.

Структурная схема системы подготовки операторов представлена на рисунке 2.

Рисунок 2 — Структурная схема системы подготовки операторов перспективных РТК

Для качественного моделирования динамических систем необходимо обеспечить следующие условия:
- наглядность моделируемого процесса;
- его управляемость в реальном времени;

– способность сохранять своё состояние сколь угодно долго;
– инерционность механизмов;
– возможность осуществлять активирующее и тормозящее влияния;
– необходимо свести все сложные функции к простым и линейным. [3]

Таким образом, интеллектуализация процедуры самообучения робототехнических комплексов при взаимодействии с квалифицированными операторами представляет собой:

– описание формирования обстановки на уровне мета-данных;
– использование экспертных методов классификации и описания объектов типа «проектирование антологий»;
– использование семантических описаний обстановки в виде логических отношений между сущностями;
– использование словарно-грамматической структуры заданий;
– использование генетического алгоритма передачи данных.

Генетический алгоритм состоит из синтеза системы глубокого обучения из этапа синтеза структуры внешней среды, библиотеки фильтров для каждого поступающего объекта и этапа синтеза сети распознавания соответствующего образа. Эти два этапа рекурсивно повторяются, генерируя слой за слоем, пока не будет синтезирована нейронная сеть, обеспечивающая за счет своей структуры полное и помехоустойчивое распознавание всего множества заданных образов и выполнения заданных действий. При этом, образы могут быть как статическими, так и динамическими для систем автономного адаптивного управления [4].

Отдельно стоит обратить внимание на эргономический стенд, предназначенный для разработки удобных и информативных пультов и органов управления, эргономику которых оценивает оператор РТК:

– конструктор пульта управления, позволяющий создавать виртуальный пульт;
– конструктор системы управления моделью РТК, позволяющий из набора типовых блоков собрать любую структуру системы управления и на ее основе, в режиме реального времени, отрабатывать управляющие действия на исполнительных элементах модели.

В дальнейшем, полученные на отладочно-модернизующем комплексе, мета-данные, выработанные операторам РТК, предаются генетически близким роботам. При этом на отладочно-моделирующем комплексе, возможна воспроизведение реальной обстановки с целью подготовки оператором миссий и передачи данных для работы РТК в отдаленных или труднодоступных районах. Разработанные, с участием операторов, с функциональные, поведенческие, кибернетические модели РТК позволяют на генетическом уровне добавить машинное обучение в свой прогностический инвентарь, что, в свою очередь, позволяет достичь уровня предсказаний, недостижимого при использовании одних только традиционных методов обучения.

Литература

1. Петушок И.К., Бегун В.И. Информационная модель подготовки специалистов ВМФ / Тр. XVIII Всероссийской науч.-практич. конф. «Актуальные проблемы защиты и безопасности», т. 2, инв. № 401 – СПб.: РАРАН, НПО «Специальных материалов», 2015 – 84 с.

2. Игнатиади Е.К. Петушок И.К. Виртуальный полигон для морских робототехнических средств/ XVI Всероссийская научно-практическая конференция «Перспективные системы и задачи управления» п. Домбай, Карачаево-Черкесская республика, 2021 – 18 с.

3. Канарейкин А.В. Самообучение автономного робота с использованием метода компьютерного моделирования высокой детализации КМВД / СПб.: «Страта», 2019. — 300 с.

4. И.В. Степанян, М.А. Зидун, М.О. Савкин, Лю Дун Синтетическая парадигма глубокого обучения для систем адаптивного управления /33-я Международная научно-техническая конференция «Экстремальная робототехника», Санкт-Петербург: ООО «Типография Фурсова», 2022 – 358 с.

Д.О. Дохов, И.И. Саитов, Д.Н. Новиков, Н.В. Заруцкий

АНТРОПОМОРФНАЯ КИСТЬ

ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург, d.dohov@rtc.ru

Аннотация

В статье рассмотрен вопрос разработки антропоморфной кисти в качестве захватного устройства, устанавливаемого на манипуляторе и работающего в режиме телеуправления. Подобные устройства используются для выполнения операций с объектами, имеющими различные форму и размеры. При высоком разнообразии объектов целесообразным является применение антропоморфных захватов (кистей), имеющих три и более пальцев и более одного сочленения на каждом пальце. В таких устройствах существенно усложняется компоновка с точки зрения расположения приводных механизмов. С учетом режима работы кисти, конструкция устройства подразумевает наличие пяти пальцев, приближенных к человеческой кисти по функциональным возможностям и габаритам. В настоящей работе произведен поиск существующих реализаций антропоморфных кистей и выполнен аналитический обзор существующих решений. По результатам анализа наиболее перспективных вариантов устройств проведены работы по разработке и описанию кинематической схемы и конструкции разрабатываемого устройства.

Ключевые слова

Антропоморфная кисть, манипулятор, захватное устройство, телеуправление.

D.O. Dokhov, I.I. Saitov, D.N. Novikov, N.V. Zarutskii

ANTHROPOMORPHIC HAND

Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, St. Petersburg, Russia, d.dohov@rtc.ru

Abstract

The article considers the issue of developing an anthropomorphic hand as a gripping device mounted on a manipulator and operating in remote control mode. Such devices are used to perform operations with objects having different shapes and sizes. With a high variety of objects, it is advisable to use anthropomorphic grips (hands) having three or more fingers and more than one joint on each finger. In such devices, the layout is significantly complicated in terms of the location of the drive mechanisms. Taking into account the mode of operation of the hand, the design of the device implies the presence of five fingers, close to the human hand in functionality and dimensions. In this paper, a search is made for existing implementations of anthropomorphic hands and an analytical review of existing solutions is performed. Based on the results of the analysis of the most promising variants of devices, work was carried out on the development and description of the kinematic scheme and design of the device being developed.

Key words

Anthropomorphic hand, manipulator, gripping device, remote control.

Человеческая кисть имеет сложную кинематическую схему из порядка 22 степеней свободы, причём движения пальцев имеют ограничение по углу и сложную рабочую область в ряде суставов. Приводится кисть в движение плотно укомплектованными мышцами, как спрятанными внутри ладони, так и вынесенными в предплечье. Приведенные особенности позволяют, как ловко манипулировать мелкими объектами, так и использовать более крупные и тяжёлые объекты различных форм.

Схемы и конструкции кисти

Захваты кисти по своей специфике можно представить в виде некоторого дерева. Как мы видим, из рисунка 1 [1, с.289], есть две большие группы захватов: силовые и точные. Это раскрывает также и возможность распределить соответствующие роли для пальцев. Так указательный и средний пальцы можно отнести к точным, а безымянный и мизинец к захватным. Часто в реализованных схемах можно заметить, что первой группе отдают больше независимых фаланг для повышения качества позиционирования, в то время как для второй допустимо пренебрежение.

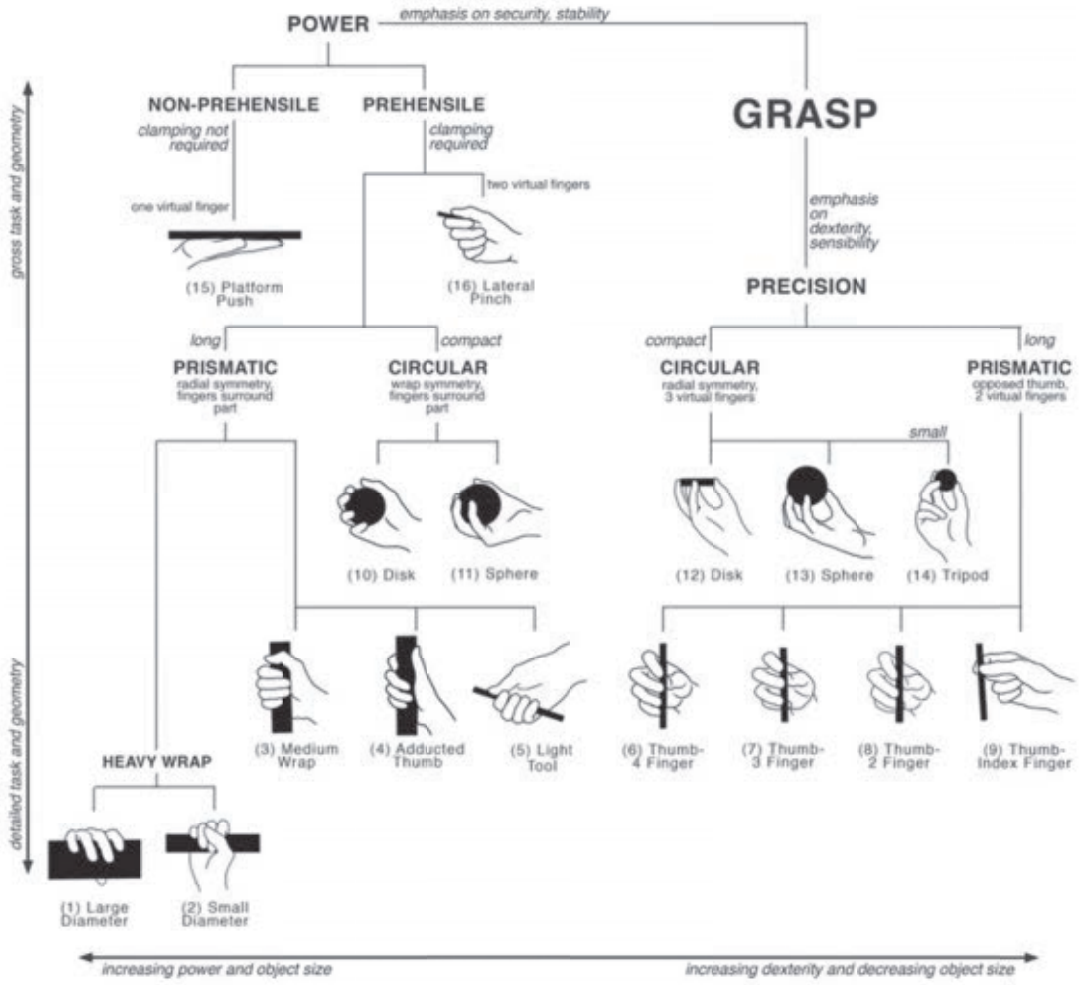


Рисунок 1 — Древо типовых захватов

На основе приведенной схемы можно конкретизировать какие функции требуются от захватного устройства. Также в рамках задачи и максимального комфорта управления оператором принято решение развивать именно пятипалую конфигурацию кисти.

Что касаемо приводной части если рассматривать существующие реализации антропоморфной кисти можно заметить не только тяговые привода подобные реальному строению кисти из мышц, но и пневматические, гидравлические, а также жесткие механические электропривода. Однако применение первых в нашем случае не является рациональным из-за дополнительной пред подготовки в виде компрессора и других выносных устройств, кроме того это заметно утяжеляет конструкцию. В рамках задачи было решено использовать электропривода и расположить их внутри корпуса кисти, без реализации предплечья.

Схемы и конструкции пальцев

Важной частью антропоморфной кисти является конструкция пальца. По причине того, что на один палец приходится по 3 подвижные части может возникнуть вопрос их актуации. Подсоединять

каждую фалангу к своему приводу оказывается весьма затратно, в том числе и по габариту, но в то же время сокращать количество фаланг как это сделано в ряде других захватных устройств и протезах решение слишком радикальное. Было принято решение рассмотреть схемы, использующие один привод на все 3 фаланги одного пальца. Как оказалось, такие конструкции разделяются на две большие группы адаптивные и неадаптивные. Разница заключается в том, что в неадаптивных пальцах фаланги движутся все одновременно в зависимости от схемы, отставая или опережая другие фаланги по углу. А адаптивные схемы пальцев позволяют двигать фаланги последовательно тому, как они встречают препятствие в виде, например, захватываемого объекта. Их различие хорошо проиллюстрировано на рисунке 2 [2, с.3].

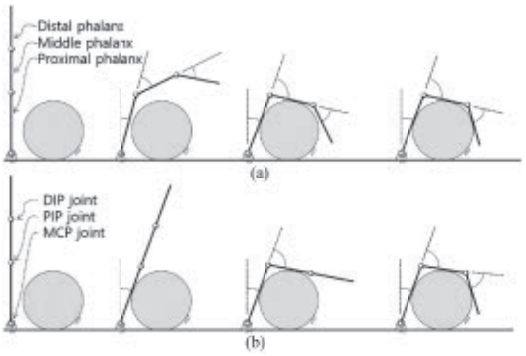


Рисунок 2 — Иллюстрация алгоритма работы адаптивного и неадаптивного пальцев

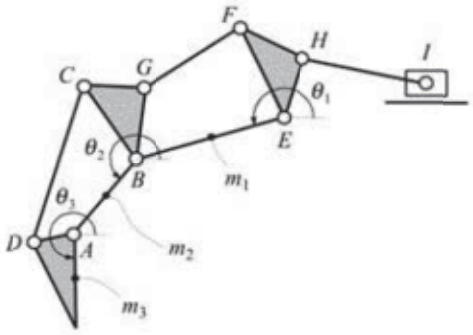


Рисунок 3 — Схема пальца Ca.U.M.Ha

Адаптивная схема пальца будет наиболее компромиссной и увеличит диапазон возможных для захвата объектов. В основном удалось выделить три вида подобных схем. Схема, построенная на простых линейных связях, где суставная часть выполнена в виде жесткого треугольника. В такой схеме последовательность работы фаланг регулируется пружинами кручения, установленными непосредственно у шарниров близ подушечек. Подобная схема хорошо представлена на примере пальца Ca.U.M.Ha на рисунке 3 [3, с.329].

Также присутствует схема, основанная на нажимных плитах и рычагах. При встрече с препятствием плита делает ход, который передается по рычагам или кулисам и сгибает следующую фалангу. Её можно рассмотреть на примере пальца, изображенного на рисунках 4 и 5 [4, с.2394].

Рисунок 4 — Внешний вид пальца с плитами

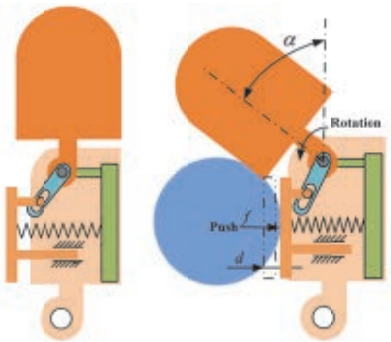


Рисунок 5 — Схема пальца с плитами

Наиболее интересным вариантом оказалась схема, основанная на четырёхзвенной передаче. Для каждой фаланги отведен свой отдельный слой передач, но их движение зависит от общего штока. Последовательность движения также регулируется пружинами, но уже сжатия и расположены они непосредственно после общего штока. Работают они таким образом, что при встрече препятствия фаланга не останавливает всю конструкцию, а позволяет продолжить ход штока взамен на сжатие пружины,

лишь элемент дистальной фаланги задан жестко. Пример такого пальца можно увидеть на рисунках 6 [2, с.11] и 7 [2, с.10].

Рисунок 6 — Внешний вид пальца на четырёхзвенной передаче

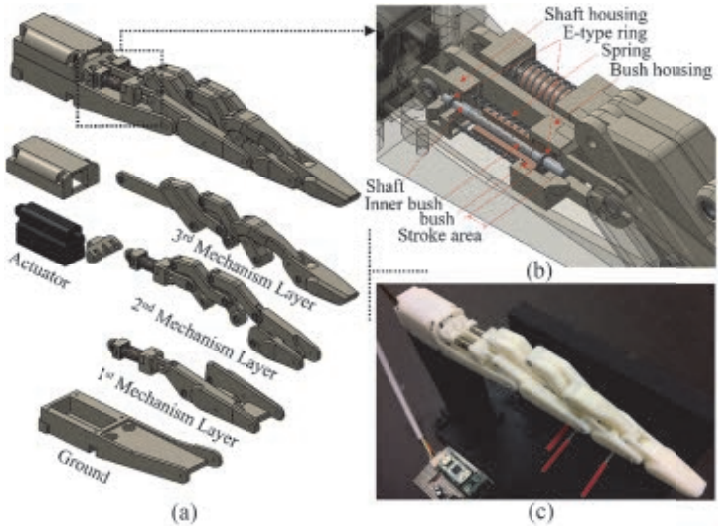


Рисунок 7 — Конструкция пальца на четырёхзвенной передаче

Реализация

По результатам анализа наиболее перспективных вариантов устройств проведены работы по разработке и описанию кинематической схемы и конструкции разрабатываемого устройства.

Разработанная кисть состоит из одинаковых модулей пальцев, основанных на кинематике четырёхзвенной передачи с адаптивным движением. Приводится в работу каждый модуль своей парой приводов с шарико-винтовой передачей. Один привод для адаптивного сжатия пальца, второй для его вращения, аналогично тому, как раздвигает пальцы человек. Общий вид пальца представлен на рисунке 8. Упрощённый разрез привода сжатия и привода раздвижения на рисунках 9 и 10 соответственно. Также на рисунке 10 окружностью выделена ось вращения, которой модуль будет крепится к корпусу кисти.

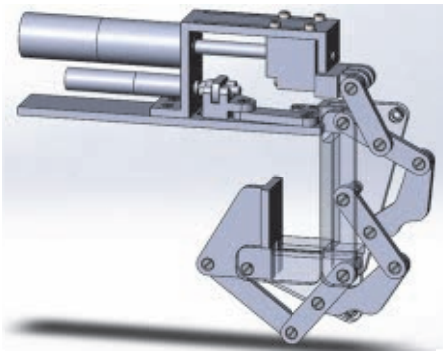


Рисунок 8 — Общий вид модуля пальца

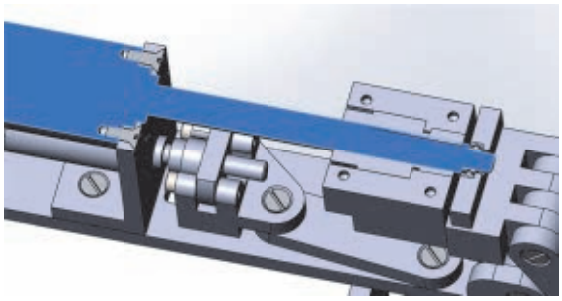


Рисунок 9 — Упрощённый разрез вдоль сжимающего привода

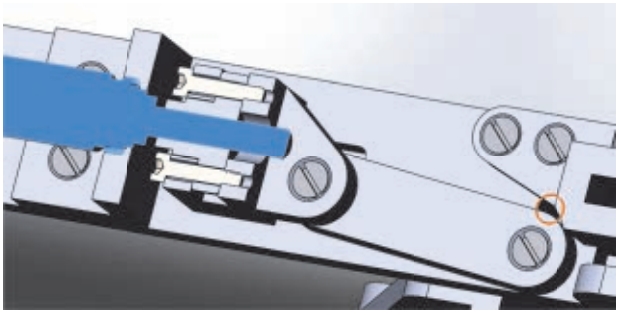


Рисунок 10 — Упрощённый разрез вдоль раздвигающего привода

На рисунке 11 продемонстрирован пример последовательного обхвата неподвижного объекта пальцем.

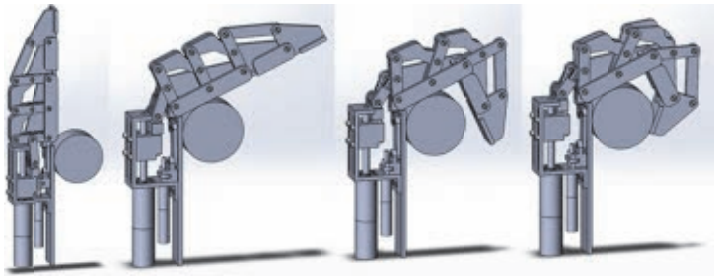


Рисунок 11 — Пример обхвата объекта

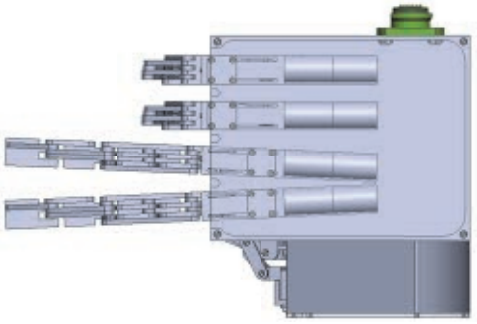


Рисунок 12 — Модель кисти вид сверху

На рисунке 12 представлена модель макета кисти в сборе с быстросъёмным соединением и модулями пальцев. Как видно из рисунка вращение пальцев ограничено лишь длиной привода расстоянием между модулями.

По итогу выполнения работы была разработана антропоморфная кисть для быстросъёмной установки на мобильных роботов, работающих в опасной для человека среде. В ходе разработки была изучена анатомия человеческой кисти и рассмотрены уже созданные вариации захватных устройств, а также подробнее изучены схемы модулей пальцев. Исходя из наблюдений, был сделан выбор по использованию конкретной схемы и дальнейшей её модернизации. Таким образом, получился модуль двухпроводного вращающегося пальца с адаптивным захватом. Каждый такой модуль может собираться отдельно и после устанавливаться в корпус АК для дальнейшей работы.

Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России FNRG-2022-0012 1021051302301-9-2.2.2 № 075-01623-22-01 «Разработка коллаборативного робота с ассистирующей двурукой антропоморфной манипуляционной системой для работы в пространствах малого объема».

Литература

1. Gama Melo E. N., Aviles Sanchez O. F., Amaya Hurtado D. Anthropomorphic robotic hands: a review // Ingeniería y desarrollo. – 2014. – Т. 32. – №. 2. – С. 279-313.

2. Yoon D., Choi Y. Underactuated finger mechanism using contractible slider-cranks and stackable four-bar linkages // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. – 2017. – Т. 22. – №. 5. – С. 2046-2057.

3. Figliolini G., Rea P. Overall design of Ca. UM Ha. robotic hand for harvesting horticulture products // Robotica. – 2006. – Т. 24. – №. 3. – С. 329-331.

4. Jin J. et al. LISA Hand: Indirect self-adaptive robotic hand for robust grasping and simplicity //2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). – IEEE, 2012. – С. 2393-2398.

Д.Н. Новиков, Д.О. Дохов, И.И. Саитов, Н.В. Заруцкий

МЕХАНИЗМ ОБЕЗВЕШИВАНИЯ ЗАДАЮЩЕЙ МАНИПУЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ С ПАКЕТОМ ЛИСТОВЫХ ПРУЖИН

ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург, novikov.dn@edu.spbstu.ru

Аннотация

В статье рассмотрен механизм обезвешивания задающей манипуляционной системы с пакетом листовых пружин, разработана конструкция механизма обезвешивания, подобран пакет листовых пружин для создания достаточной компенсационной силы и выбран материал для них, рассчитано компенсационное усилие механизма обезвешивания с пакетом листовых пружин и сопоставлены величины момента сил тяжести механизма с моментом, создаваемым механизмом обезвешивания, а также произведено сравнение величины компенсационного момента с механизмом обезвешивания, основанном на комбинированном действии листовых пружин и пружин сжатия. На основе полученных в ходе работы данных был сделан вывод о рациональности применения того или иного типа пружин в механизмах обезвешивания в различных сценариях использования.

Ключевые слова

Обезвешивание, манипуляционная система, листовые пружины, момент сил, робототехника.

D.N. Novikov, D.O. Dohov, I.I. Saitov, N.V. Zarutskii,

COMPENSATION MECHANISM FOR CONTROL-POINT SETTING DEVICE WITH A PACKAGE OF LEAF SPRINGS

Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, St. Petersburg, Russia, novikov.dn@edu.spbstu.ru

Abstract

The article considers the compensation mechanism of the control manipulation system with a package of leaf springs, the design of the compensation mechanism is developed, a package of leaf springs is selected, to create sufficient compensating force and the material for them is selected, and the compensating force of the compensation mechanism with a package of leaf springs is calculated and the values of the moment of gravity of the mechanism with the moment created by the compensating mechanism are compared. In addition, the value of the compensation moment of the mechanism developed in this article is compared with the compensation mechanism based on the combined action of leaf springs and compression springs. Based on the data obtained in the course of the article, a conclusion is made about the rationality of using one or another type of springs in compensation mechanisms in various use cases.

Key words

Compensation, manipulation system, leaf springs, moment of force, robotics.

Стремительное развитие технологий способствует распространению робототехнических систем на различные сферы человеческой деятельности. На сегодняшний дней существует множество классификаций сфер применения робототехники, основными из которых являются:

- строительная робототехника;
- экстремальная робототехника;
- бытовая робототехника;
- медицинская робототехника;
- авиационная робототехника;

– промышленная робототехника.

Управляющие устройства для современных манипуляционных систем условно делятся на две группы:

– панели управления с различными управляющими элементами (джойстики, рукоятки, кнопки и т.д.);

– задающие манипуляционные системы (ЗМС).

В сравнении с панелями управления, ЗМС имеют пониженный уровень негативного воздействия на работоспособность оператора [1]. Помимо основной классификации, сами ЗМС различают по принципу копирования движения:

– системы, копирующие кинематику исполнительного манипулятора;

– системы, копирующие кинематику оператора (носимые устройства).

ЗМС, относящиеся к первому типу, помимо этого делятся на ЗМС последовательной и параллельной структуры [1]. Такие системы обладают неподвижным основанием и подвижной платформой, за счет которой оператором осуществляется задание движения исполнительного манипулятора.

В силу совмещенной работы человека с задающим устройством в течение продолжительного времени, задающее устройство должно соответствовать некоторым требованиям. Во-первых, устройство должно иметь кинематику, схожую с человеческой, а конструкция не должна мешать движениям оператора во избежание лишних паразитных движений. Во-вторых, устройство должно быть легким, чтобы оператор во время длительного взаимодействия с устройством не испытывал дискомфорта из-за его большой массы. Если первое требование можно обеспечить конструктивно, то легкость задающего устройства удается обеспечить далеко не всегда в силу требований к надежности конструкции. Это вынуждает решать проблему дискомфорта при длительной работе путем разработки и дальнейшего использования компенсационных механизмов (либо активных, либо пассивных) в структуре ЗМС.

Активная система обезвешивания предполагает использование электрических приводов различного формфактора для формирования компенсационного момента, противодействующего моменту сил тяжести. Основным недостатком активных систем можно считать потребность в дополнительном питании, создание помех для датчиков и усложнение конструкции в целом.

Основой пассивных компенсационных механизмов зачастую являются упругие элементы и кулачковый механизм. Принцип работы, компоновка и расчёты компенсирующего момента механизма с кулачком, жестко соединенным с вращающимся валом, и комбинированным действием пружин сжатия и пакета листовых пружин представлены в работе [2].

В рамках данной статьи была произведена оценка возможности отказа от пружин сжатия и перехода только на использование пакета листовых пружин, рассмотрен механизм компенсации, разработана конструкция механизма обезвешивания с подбором пакета листовых пружин, а также рассчитан компенсационный момент и проведено сравнение его величины с механизмом, основанном на комбинированном действии пружин сжатия и листовых пружин.

Описание задающего и исполнительного устройств

В рамках работы рассмотрена разработка пассивной системы обезвешивания для ЗМС. В качестве исполнительного манипулятора выбран кобот UR5e ф. Universal Robots [3]. Он работает по методу копирующего движения, повторяя перемещения, задаваемые оператором через ЗМС. Исполнительный манипулятор может быть установлен как на неподвижном основании для выполнения стационарных задач, так и на передвижных платформах. CAD-модели исполнительного и устройств представлены на рисунке 1.

Рисунок 1 — CAD-модели исполнительного манипулятора UR5e

Задающее устройство также может быть установлено как статично, так и располагаться в кузове передвижного управляющего пункта, позволяя выполнять выездные работы различного характера. Кинематика ЗМС повторяет кинематику кобота UR5e. Кинематическая схема ЗМС представлена на рисунке 2.

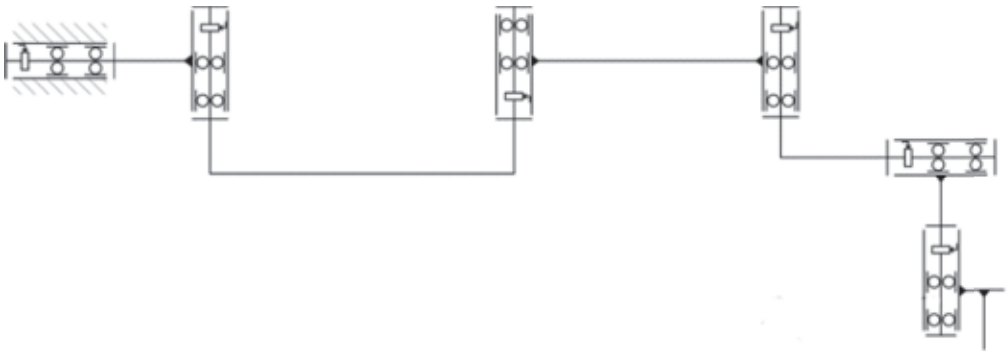


Рисунок 2 — Кинематическая схема ЗМС

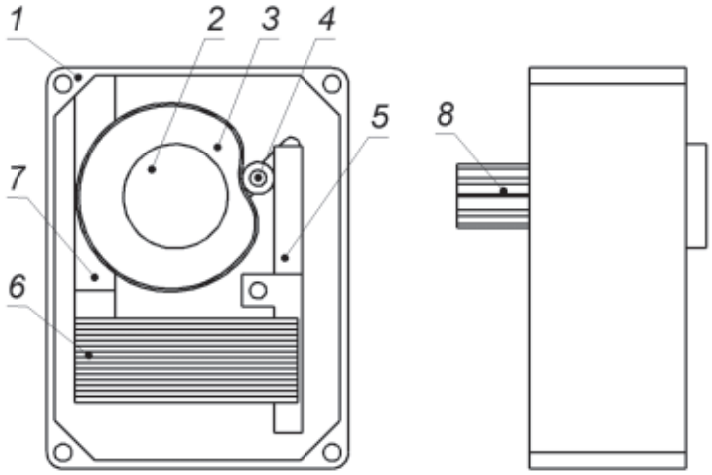
ЗМС включает в себя основание, поворотные шарниры с установленными в них датчиками поворота, а также штангами, соединяющими поворотные шарниры между собой. На выходном шарнире ЗМС располагается посадочное место под задающее устройство кисти либо управляющую рукоятку, в случае выполнения задач, не требующих исполнения движения отдельных частей кисти. Место для руки оператора расположено несоосно с последним вращательным шарниром, что обосновано необходимостью реализации дополнительной степени подвижности – вращения кисти вдоль оси лучевой кости. Вращение на вращательный шарнир передается путем ременной зубчатой передачи с двумя шкивами, один из которых установлен на выходном шарнире, а второй на посадочном месте под кистевое устройство. Предполагается длительное использование ЗМС оператором, поэтому необходимо сделать ЗМС максимально удобным для пользователя. Именно поэтому возникает потребность в установке механизмов обезвешивания.

Концепция механизма обезвешивания

Работа рассмотренного в рамках поиска прототипа модуля обезвешивания основывается на создании компенсационных сил за счет действия гибридной системы, состоящей из блока с пружинами сжатия и пакета листовых пружин [2]. Результаты исследования [2] механизма в ANSYS Workbench

показали, что при требуемых габаритах компенсационный момент, создаваемый гибридной системой, существенно меньше требуемого для компенсации сил тяжести звеньев задающего устройства, а увеличение жесткости пружинного блока для обеспечения требуемого усилия приводит к увеличению габаритов модуля обезвешивания.

В рамках концепции исследована возможность применения в модуле обезвешивания листовых пружин, объединяемых в пакет (рисунок 3). Разработанная конструкция представляет собой кулачок, жестко соединенный со звеном задающего устройства путем шлицевого соединения, толкатель рычага с направляющей, сам рычаг с закрепленным в нем пакетом листовых пружин, а также упор, который служит для создания компенсационного усилия модуля обезвешивания.



1 – корпус механизма; 2 – кулачок; 3 – вал кулачков; 4 – толкатель; 5 – рычаг; 6 – пакет листовых пружин; 7 – упор; 8 – шлицевой хвостовик вала

Рисунок 3 — Внутреннее устройство механизма обезвешивания

Корпус неподвижно фиксируется на корпусе винтами через предусмотренные отверстия. Он остается неподвижным относительно вращающегося вала шарнира, который соединен с хвостовиком вала механизма обезвешивания посредством шлицевого соединения. На этом валу жестко закреплена пара кулачков, за счет которых вращение вала передается на толкатель. Своим перемещением толкатель заставлять вращаться рычаг, закрепленный с одной степенью свободы, поднимая при этом внешний конец пакета листовых пружин, отчего он начинает гнуться под действием взаимодействия с упором и создавать противодействующее усилие.

Неочевидным плюсом использования в подобных системах листовых пружин является отсутствие необходимости в покупке стандартизированных упругих элементов, что позволяет реализовать масштабирование механизма под различные величины необходимого компенсационного момента за счет производства пакетов листовых пружин с точно соответствующим требованиям характеристиками.

Важным моментом является подбор размеров и параметров компонентов механизма обезвешивания таким образом, чтобы использование ЗМС было комфортным. При недостаточном значении компенсирующего момента вес ЗМС все так же будет ощущаться и при длительном использовании создавать дискомфорт для оператора. В то же время, если величина компенсационного момента, создаваемого механизмом обезвешивания, будет избыточной, то оператору придется при движении ЗМС преодолевать силу сопротивления, что также будет делать длительное использование ЗМС менее комфортным.

Расчёт величины необходимого компенсационного момента

Для расчёта необходимой величины компенсационного момента решено было сделать упрощение рабочей схемы с целью получения механизма с простейшими начальными условиями и последующей адаптацией полученного технического решения для уточненных условий.

Было решено для расчёта рассмотреть первый поворотный шарнир с основанием, закрепленный неподвижно. Он не нуждается в обезвешивании, поэтому всю систему можно заменить одним поворотным шарниром. На расстоянии R от его центра находится точка, являющаяся центром масс исходной системы ЗМС. Расчётная схема представлена на рисунке 4.

Рисунок 4 — Расчётная схема механизма обезвешивания первого шарнира

Для поиска момента, который создается силами тяжести на первом поворотном шарнире, воспользуемся формулой (1).

$$M = \left(m \cdot g\right) \cdot R \cdot \sin\left(\theta\right), \qquad (1)$$

где M – момент сил тяжести, Н ·м; m – масса обезвешиваемых звеньев ЗМС, кг; g – ускорение свободного падения,

$$\frac{м}{c^2};$$

R – расстояние до центра масс ЗМС; θ – угол поворота звена ЗМС относительно начального положения, грд.

Согласно данным, полученным в рамках моделирования ЗМС, построен график изменения момента в зависимости от угла поворота звена ЗМС. Как и предполагалось в рамках рассмотрения концепции механизма обезвешивания, минимальной величины момента система достигает при нулевом градусе поворота, максимальная величина момента достигается при повороте на 90 градусов. График изменения момента сил тяжести, создаваемого ЗМС, представлен на рисунке 5.

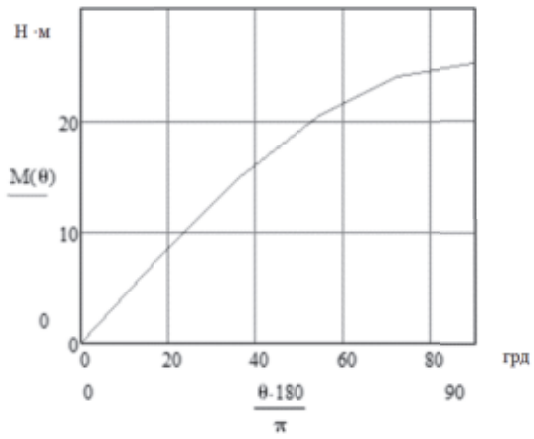


Рисунок 5 — Зависимость момента сил тяжести от угла поворота шарнира ЗМС

Как можно заметить из графика, максимальный момент, создаваемый силами тяжести ЗМС, равен порядка 25 Н·м, значит этой величиной и необходимо задаваться при подборе параметров элементов механизма обезвешивания.

Подбор пакета листовых пружин и расчёт величины компенсационного момента

Для создания компенсационного момента необходимо обеспечить механизм обезвешивания пакетом листовых пружин, создающим силу, достаточную для обеспечения обезвешивания ЗМС. Согласно [4,5], для расчета пакета листовых пружин воспользуемся формулами (2)-(4).

$$M_{к.в.} = F_N \cdot м \cdot tg(\alpha) \quad (2)$$

$$P_3 = \frac{b \cdot s^2 \cdot [\sigma_{из}]}{6 \cdot L_0} \quad (3)$$

$$F_3 = 4\frac{L_0^3 \cdot P_3}{b \cdot s^3 \cdot E} \quad (4)$$

где $M_{к.в.}$ – момент на кулачковом валу, Н ·м; F_N – нормальная сила, Н; r – радиус кулачка, м; α – угол давления, град; P_3 – максимально допустимая нагрузка на пружине, Н; b – ширина пластины, s – толщина пластины, м; $\sigma_{из}$ – допустимое напряжение при изгибе, МПа; L_0 – расчётная длина листа пружины, м; F_3 – деформация пружины, м; E – модуль упругости, МПа.

Важным является также критерий работоспособности пакета листовых пружин в виде адекватного их количества в связке. Оно должно быть достаточным для создания необходимой силы, при этом не быть избыточным во избежание чрезмерной силы трения между пластинами пакета. Поэтому, при недостаточности максимального усилия на пружине, вероятно, стоит увеличить сечение одной пластины, а не варьировать только их количество.

При крутящем моменте 25 Н ·м на валу кулачков за счет переноса сил при использовании рычага, согласно формулам, максимальная нагрузка на пакет листовых пружин относительно упора составит порядка 2 кН ·м. Чтобы не столкнуться с избыточными силами трения между листами, но при этом достичь необходимой силы, разделим систему на 6 отдельных листовых пружин. Каждая из листовых пружин изготовлена из стали 60С2ХА, которая относится к классу пружинно-рессорных сталей.

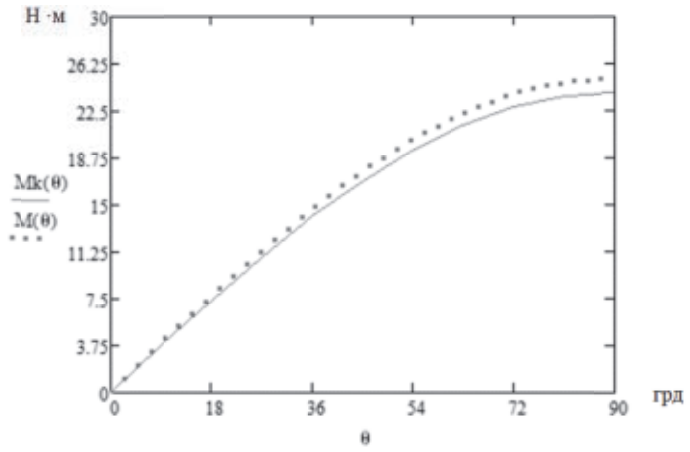


Рисунок 6 — Сравнительный график момента сил тяжести и компенсационного момента от угла поворота звена ЗМС

После выбора компонентов механизма обезвешивания, был произведен его расчёт в программе ANSYS Workbench. Кулачку было задано движение с определенным шагом и момент, согласно графику на рисунке 5, а также все необходимые контакты между составляющими механизма обезвешивания. Помимо этого, в расчётной системе была задана гравитационная сила для достоверности результатов расчёта.

Расчёты показали, что спроектированный механизм обезвешивания для ЗМС полностью соответствует требованиям к величине максимального момента. Помимо этого, график создаваемого механизмом компенсационного момента схож с графиком изменения момента сил тяжести механизма.

Разницу между графиками можно не компенсировать в силу ориентированности на реальное использование: пользователь при постоянном использовании не будет ощущать небольшие величины массы ЗМС. Сравнение графиков изменения момента сил тяжести и компенсационного момента в зависимости от угла поворота представлено на рисунке 6.

Сравнение разработанного механизма обезвешивания с аналогом [2] позволяет сделать вывод об улучшении рабочих характеристик без потери прочности и удобства. Сравнение механизмов по некоторым характеристикам представлено в таблице 1.

Таблица 1 — Сравнение разработанного механизма обезвешивания с аналогом

	Разработанный механизм	**CVGC-II**
Максимальная величина компенсационного момента, Н ·м	24,2	5,1
Тип пружин	Листовые	Пружины сжатия + листовые
Вес модуля, кг	1,22	1,18
Рабочий диапазон, грд	360	360

В рамках данной статьи рассмотрен механизм обезвешивания для ЗМС, используемого для управления коботом UR5e, позволяющий сделать длительное использование устройства оператора более комфортным за счет уменьшения силы тяжести ЗМС, ощущаемой человеком. Выбрана концепция механизма обезвешивания, основой которого является упругий элемент – пакет листовых пружин. Была получена необходимая величина компенсационного момента, необходимая для компенсации момента сил тяжести, а также график изменения момента сил тяжести в зависимости от угла поворота звена ЗМС, выбраны и рассчитаны пружины для установки в механизм обезвешивания, а также построен сравнительный график момента сил тяжести и компенсационного момента в зависимости от угла поворота звена ЗМС. Наконец, было проведено сравнение разработанного механизма с аналогом [2], работа которого основана на гибридном действии пружин сжатия и листовых пружин, в рамках которого было выявлено, что механизм обезвешивания с пакетом листовых пружин является более подходящим при необходимости создания больших величин компенсационного момента.

Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России FNRG-2022-0012 1021051302301-9-2.2.2 № 075-01623-22-01 «Разработка коллаборативного робота с ассистирующей двурукой антропоморфной манипуляционной системой для работы в пространствах малого объема».

Литература

1. Харузин С. В., Шмаков О. А. Основные тенденции и перспективные решения в области разработки задающих манипуляционных систем // Информатика, телекоммуникации и управление. – 2017. – Т. 10. – №. 2. – С. 7-21.

2. Kim J. et al. CVGC-II: A New Version of a Compact Variable Gravity Compensator With a Wider Range of Variable Torque and Energy-Free Variable Mechanism // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. – 2021. – Т. 27. – №. 2. – С. 678-689.

3. Официальный сайт компании Universal Robots [Электронный ресурс] // URL: https://www.universal-robots.com/products/ur5-robot/ (дата обращения 20.07.2022).

4. Лариков Е. А. Расчет и проектирование кулачковых механизмов приборов. М.: Машиностроение, 1968.

5. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3 т. Т. 3. – 8-е изд., перераб. и доп. Под ред. И. Н. Жестковой. – М.: Машиностроение, 2001 – 864 с.

Д.С. Попов

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ НАЗЕМНЫМИ МОБИЛЬНЫМИ РОБОТАМИ В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ ВРЕМЕННЫХ ЗАДЕРЖЕК В КАНАЛАХ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург, d.popov@rtc.ru

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы телеуправления наземными мобильными роботами в экстремальных условиях эксплуатации. Существенное влияние на эффективность управления оказывает наличие временных задержек в информационных каналах. Значения задержек могут составлять от сотен миллисекунд до единиц секунд; достаточно большие величины являются причинами потери устойчивости системами управления.

Учитывая специфику условий применения мобильных роботов в неструктурированной среде, для оценки эффективности систем дистанционного управления предлагается использовать эмпирический подход, в основе которого лежит телеуправление человеком-оператором роботом по видеоизображению с видеокамеры. Задача управления заключается в движении по заранее заданной траектории от начальной точки до конечной. Результаты оцениваются по совокупности зафиксированного времени выполнения задачи и схожести полученной траектории с эталонной.

В работе приведены результаты моделирования управления мобильным роботом в различных условиях с различными значениями временных задержек. Предложен метод частичной компенсации негативного влияния задержек на эффективность управления.

Ключевые слова

Экстремальная робототехника, мобильный робот, система дистанционного управления, телеуправление, временные задержки.

D.S. Popov

EFFICIENCY OF REMOTE CONTROL SYSTEMS FOR GROUND-BASED MOBILE ROBOTS UNDER CONDITIONS OF TIME DELAYS IN DATA TRANSMISSION CHANNELS

Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetic, St. Petersburg, Russia, d.popov@rtc.ru

Abstract

The paper considers issues of remote control of ground-based mobile robots in extreme operating conditions. The presence of time delays in information channels has a significant impact on the effectiveness of management. Delay values can range from hundreds of milliseconds to seconds. Large values are the reasons for the loss of stability of control systems.

Taking into account the specifics of the conditions for the use of mobile robots in an unstructured environment, it is proposed to use a method based on direct remote control of a robot by video image from a video camera to assess the effectiveness of remote control systems. The control task is to move along a predetermined trajectory from the starting point to the end point. The results are evaluated by the combination of the recorded task completion time and the similarity of the obtained trajectory with the reference one.

The paper presents the results of modeling the control of a mobile robot under various conditions with different values of time delays. A method of partial compensation of the negative impact of delays on control efficiency is proposed.

Key words

Extreme robotics, mobile robot, remote control system, teleoperation, time delay.

Наземные мобильные робототехнические комплексы для экстремальных условий применения по мере развития техники получают всё более широкое применение. Для них характерно преимущественно использование режима дистанционного управления, прямого или с поддержкой оператора [1].

В настоящее время отсутствуют чётко сформулированные критерии, позволяющие оценивать эффективность систем дистанционного управления и проводить сравнение различных технических решений на этапе проектирования и разработки. При этом на основе многочисленных экспериментальных данных и экспертных оценок можно сделать вывод о ключевой роли временных задержек передачи информации в обеспечении требуемого качества управления движением мобильных роботов [2, 3].

В работе исследуются вопросы, связанные с дистанционным управлением движением мобильного робота в экстремальных условиях при значительных временных задержках.

Системы дистанционного управления

В общем случае в составе комплекса можно выделить (рис. 1) мобильный робот, навесное оборудование и пульт дистанционного управления, объединённые каналом связи [4].

Рисунок 1 — Состав мобильного робототехнического комплекса

В рассматриваемых комплексах основные высокоуровневые решения, связанные с постановкой задач и планированием движения, принимает человек-оператор. При этом, в общем случае, могут использоваться различные архитектуры систем управления, основными из которых являются прямое телеуправление, телеуправление с поддержкой и супервизорное управление [5]. В ситуациях, когда работы мобильным роботом ведутся в экстремальных и динамически изменяющихся условиях, наиболее эффективными являются системы управления, не обладающие высоким уровнем автономности. Это объясняет широкое распространение комплексов, использующих прямое дистанционное управление и управление с поддержкой оператора [1].

В процессе управления оператор выполняет определённую задачу, которая может включать в себя:

- перемещение робота из одной точки в другую без требований к траектории движения;
- следование заранее известной или определяемой в процессе движения траектории;
- позиционирование робота относительно окружающих объектов пространства.

Учитывая предложенное описание задачи управления, основные критерии эффективности можно определить следующим образом:

- точность управления, включающая точность достижения требуемой позиции, следования траектории и позиционирования робота;
- скорость, определяемая временем, затрачиваемым на выполнение задачи.

Приоритет одного критерия над другим зависит от особенностей задачи и окружающей обстановки.

Среди основных факторов, влияющих на эффективность выполнения задачи, можно выделить следующие:

- опыт, навыки и состояние оператора;
- внешние условия выполнения задачи;
- эргономика пульта управления;
- конструктивные особенности и ограничения мобильного робота;
- обеспеченность оператора актуальной информацией;
- скорость и точность выполнения команд оператора.

Последние два пункта непосредственно относятся к системе дистанционного управления и определяются количеством и качественными характеристиками датчиков и видеокамер, результирующим

разрешением получаемого на мониторе пульта видеоизображения, временными задержками передачи видео и выполнения команд оператора.

Максимально доступное разрешение видеоизображения, в свою очередь, определяется не только типом используемой камеры, но и вычислительными способностями бортовой системы управления и пульта, а также пропускной способностью канала связи, которые так же влияют на задержку получения и отображения видео на мониторе пульта управления.

Влияние задержек на управление движением мобильного робота

Принимая во внимание вышеизложенное, можно заключить, что задержки, возникающие в каналах передачи информации, являются ключевым фактором, влияющим на эффективность системы дистанционного управления. Когда задержки постоянны во времени и достаточно малы (различные экспериментальные данные определяют порог в пределах 200-400 миллисекунд [2, 3]), оператор может к ним адаптироваться, предсказывая результат выполнения своих команд. При увеличении задержек, а также их непостоянстве, оператор, чрезмерно корректируя скорость и направление движения робота, начинает выдавать ошибочные команды. Это снижает эффективность управления, а в некоторых случаях может стать причиной потери устойчивости всей системы.

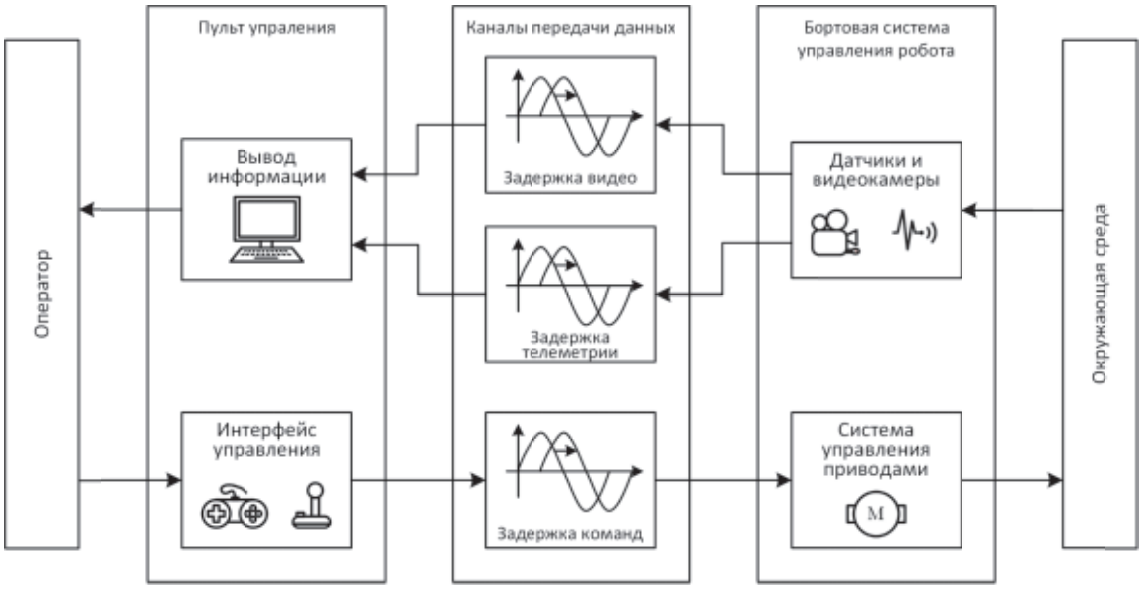


Рисунок 2 — Схема системы управления с учётом действующих задержек

Задержки, возникающие в системе управления, имеют различную природу и могут быть разделены на несколько групп (рис. 2):

– задержки передачи и выполнения команд управления. Типичные значения составляют от 50 до 100 миллисекунд;

– задержки передачи телеметрической информации от робота к пульту управления, которые имеют такой же порядок значений;

– задержки передачи видео, определяемые временем, необходимым для получения видеоизображения телевизионной камерой мобильного робота, его обработки, наложения технической информации, цифрового сжатия, передачи по каналу связи, предварительной обработки на пульте и отображения на мониторе. Типичные значения составляют от 200 до 500 миллисекунд в зависимости от типа камер и формата видео;

– задержки, обусловленные применением ретрансляторов сигналов, сетей с ячеистой топологией и пр.;

– задержки, обусловленные использованием в составе системы специализированных модулей, например, блоков криптографической защиты информации;

– задержки, вызванные потерей пакетов между мобильным роботом и пультом управления, требующей повторной передачи данных.

Последние три группы способны оказать существенное влияние на суммарное время задержки в системе управления, не только увеличив его вплоть до единиц секунд, но и сделав непостоянным во времени.

Оценка эффективности системы дистанционного управления

Для оценки эффективности системы дистанционного управления необходимо определить общую точность и скорость выполнения задачи. В работе предлагается использовать для этой цели экспериментальный подход, заключающийся в управлении движением мобильного робота по эталонной траектории и оценке сходства реальной траектории с эталонной, а также суммарного времени движения. Такой подход обеспечивает возможность сравнения различных вариантов выполнения системы управления и выбора наиболее подходящего для решения поставленной задачи.

Важной составляющей подхода является способ оценки сходства двух траекторий. Для определения точности управления и последующей оценки эффективности выбрано расстояние Фреше [6]. Эта метрика позволяет определить меру сходства между двумя кривыми: упрощённо, расстояние определяет минимальную длину отрезка, соединяющего точки на каждой кривой, позволяющую пройти обе кривые в одном направлении от начала до конца. Расстояние Фреше обладает двумя ключевыми характеристиками, позволяющими использовать его для сравнения траекторий при оценке эффективности:

– обладает свойствами функции расстояния, то есть для него соблюдаются аксиомы тождества, симметрии и неравенства треугольника;

– непрерывно, то есть не зависит от шага задания точек траекторий.

Снижение негативного влияния задержек

Добиться повышения эффективности систем дистанционного управления можно двумя путями: обеспечив минимизацию задержек при обработке и передаче данных и применяя различные технические решения, способные снизить их негативное влияние.

С учётом описанного в [7] состава передаваемой в системе управления информации можно определить основные подходы к снижению задержек:

– оптимизация протоколов передачи информации, как между мобильным роботом и пультом управления, так и между узлами в их составе;

– подбор приёмопередатчиков, имеющих минимальное время задержки;

– оптимизация структуры и состава бортовой системы дистанционного управления.

Снижение задержек выполнения команд оператора, вызванных потерями и последующими повторными передачами пакетов данных, можно обеспечить, подобрав на этапе проектирования комплекса соотношение между размером посылки, эффективной скоростью передачи полезных данных в канале связи и частотой обмена. Наиболее эффективным способом решения этой задачи является имитационное моделирование. При этом часто применяемым начальным условием является максимальное снижение длины сообщения, содержащего команды оператора, квитанции и данные телеметрии. При передаче данных внутри мобильного робота и пульта управления основной вклад в возникающую задержку вносит буферизация данных в промежуточных узлах. Полностью избавиться от этого фактора невозможно, и наилучшим подходом является уменьшение числа узлов на этапе проектирования комплекса, а также подбор подходящих протоколов передачи данных между внутренними узлами.

Снижение задержек передачи и отображения видео завязано на выбор подходящих телекамер и вычислителя в составе бортового комплекса видеосредств [8].

Тривиальным методом уменьшения негативного влияния задержек на точность управления является снижение максимальных значений линейной и угловой скоростей мобильного робота пропорционально действующей в текущий момент задержке. Другим вариантом является такое же пропорциональное

изменение чувствительности органов управления. В этом случае у оператора остаётся возможность на участках прямолинейного движения по открытой местности задавать максимальную скорость. Такие технические решения позволяют добиться большей точности управления за счёт снижения скорости движения робота. Их применение не повышает эффективность системы управления, однако подход может быть использован в отдельных случаях, когда время выполнения задачи не так важно.

Способ компенсации влияния задержек

Для компенсации влияния задержек на управление мобильным роботом может быть использован способ, основанный на внедрении в программное обеспечение бортовой системы мобильного робота блока, который, получая команды от пульта управления, корректирует их с учётом данных о ранее поступивших командах оператора и текущем состоянии робота [9]. Подобной корректировке подлежит только угловая скорость, определяющая направление движения. Линейная скорость влияет на качество управления не столь сильно: оператор в большинстве случаев быстро адаптируется и оказывается в состоянии оценить положение робота в окружающем пространстве с учётом задержки даже при её изменении во времени. Корректировка линейной скорости системой может помешать этой адаптации и сделать управление менее предсказуемым для оператора. С другой стороны, отсутствие необходимости в корректировке линейной скорости мобильного робота позволяет упростить способ и систему управления за счёт исключения дополнительных расчётов.

Несмотря на то, что с точки зрения физики модель движения робота всегда включает динамическую составляющую, ей можно пренебречь при условии, что приводы робота способны обеспечить значительно большие ускорения, чем требуются для осуществления движений [10]. Для рассматриваемых мобильных роботов, перемещающихся с небольшой скоростью по относительно ровной поверхности, такое условие соблюдается. Это позволяет при разработке способа компенсации влияния задержек учитывать только кинематическую модель робота.

Схема системы управления с блоком компенсации приведена на рисунке 3.

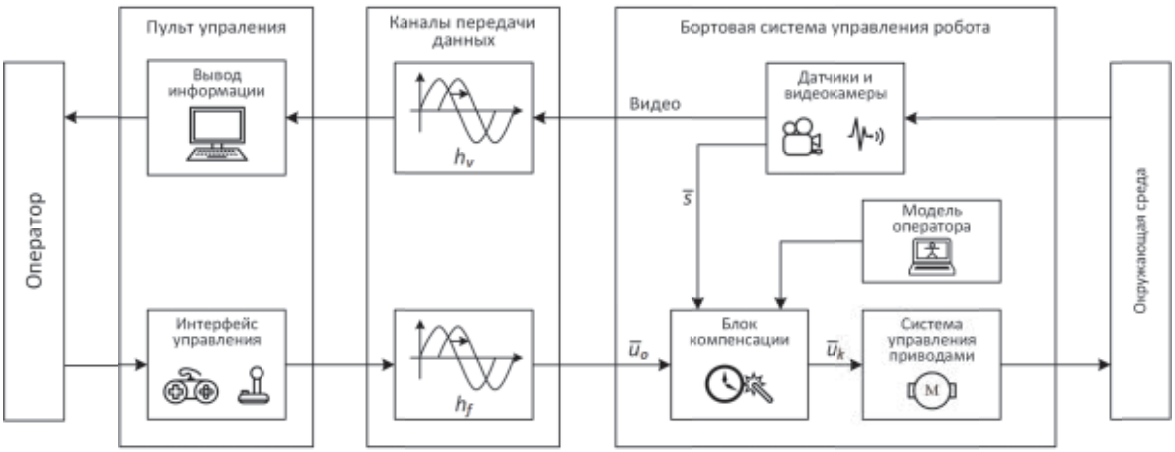


Рисунок 3 — Схема системы управления с блоком компенсации задержки

На схеме отмечены: $\overline{u}_o$ – вектор управления, представленный командами оператора: $\overline{u}_o = (v_o, \omega_o)^T$, где v_o – задание линейной скорости, ω_o – угловой; $\overline{s}$ – вектор состояния, представленный значениями скоростей мобильного робота: $\overline{s} = (v_r, \omega_r)^T$, где v_r – линейная скорость, ω_r – угловая; $\overline{u}_k$ – откорректированный вектор управления: $\overline{u}_k = (v_k, \omega_k)^T$, где v_k – задание линейной скорости, ω_k – угловой; h_v – задержка передачи видеоизображения; h_f – задержка передачи команд управления.

Способ компенсации заключается в следующем. В процессе управления видеокамера непрерывно фиксирует информацию о состоянии окружающей среды и положении в ней мобильного робота. Система управления передаёт эту информацию на пульт. В блоке компенсации определяется мгновенное значение суммарной действующей временной задержки между моментом фиксации информации и получе-

нием бортовой системой команд оператора, сформированных на основе этой информации. В каждый момент времени на борту вычисляются с помощью датчиков приводов и сохраняются в оперативной памяти бортовой системы значения линейной и угловой скоростей мобильного робота. Используя локальную систему координат, связанную с текущим положением робота, время задержки и данные о действующих на её протяжении скоростях, определяется положение робота в момент фиксации видеоизображения. На основе полученных от пульта команд оператора и вычисленного положения определяются координаты локальной цели, в которую оператор хотел привести робота. С помощью модели оператора вычисляется задание угловой скорости, обеспечивающей движение робота из задержанного во времени положения в точку локальной цели и поправка, позволяющая компенсировать индивидуальные особенности оператора. С использованием той же модели рассчитывается задание угловой скорости, обеспечивающей движение робота из текущего положения в точку локальной цели. Рассчитанное значение корректируется с помощью вычисленной поправки.

На рисунке 4 показаны задержки в системе управления и отмечены моменты времени: t_1 – текущий момент времени, в который происходит вычисление заданий для приводов робота; $t_2 = t_1 - h_f$ – момент времени, в который оператор на основе полученного видеоизображения сформировал команды управления; $t_3 = t_1 - (h_f + h_v)$ – момент времени, который оператор видел на мониторе, когда формировал команды.

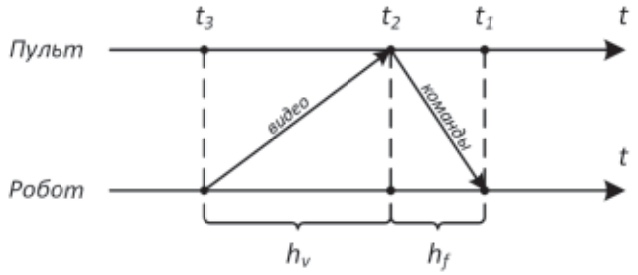


Рисунок 4 — Временные задержки в системе управления

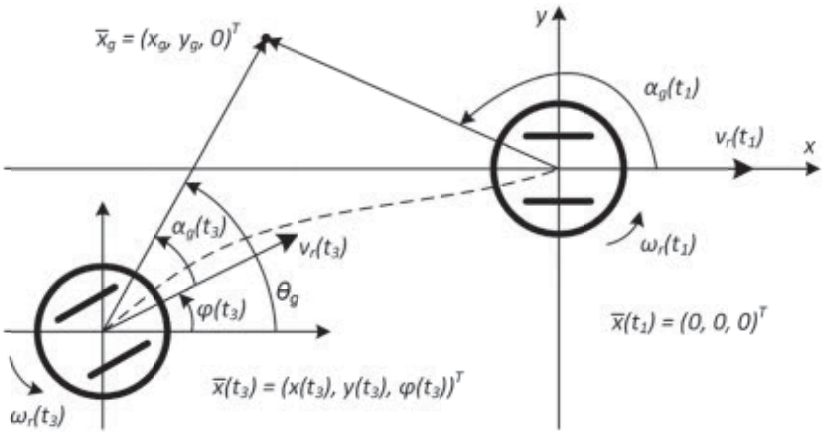


Рисунок 5 — Положения робота в локальной системе координат

Для расчётов используется система координат, привязанная к состоянию мобильного робота в момент времени t_1. На рисунке 5 приведены:

– текущее состояние робота, принятое за начальное и определяемое вектором $\bar{x}(t_1)$, содержащим координаты робота и угол его поворота;

– состояние робота, актуальное для момента времени t_3 и определяемое вектором $\bar{x}(t_3)$, также содержащим координаты и угол поворота;

– локальная цель, определяемая вектором $\bar{x}_g$;

– линейные и угловые скорости робота v_r и ω_r в моменты времени t_1 и t_3;

– угол поворота робота φ в момент времени t_3;

– курсовой угол на локальную цель θ_g в момент времени t_3;
– угловая ошибка α_g в моменты времени t_1 и t_3, $\alpha_g = \theta_g - \varphi$.

В процессе движения мобильного робота в оперативной памяти на борту постоянно сохраняются значения линейной и угловой скоростей $v_r(t)$ и $\omega_r(t)$, определяемые на основе данных, получаемых с датчиков в составе приводов. С использованием этих данных и информации о суммарном времени задержки с помощью численного интегрирования восстанавливается состояние робота в момент t_3:

$$\begin{cases} \varphi(t_3) = \varphi(t_1) - \int \omega_r(t)\, dt \\ x(t_3) = x(t_1) - \int v_r(t)\cos\varphi(t)\, dt \\ y(t_3) = y(t_1) - \int v_r(t)\sin\varphi(t)\, dt \end{cases}$$

Может быть применён любой метод численного интегрирования. Для решаемой задачи достаточно прямого метода Эйлера. Несмотря на то, что полученная оценка является приближённой и не учитывает проскальзывание колёс или гусениц, сравнительно короткий интервал интегрирования позволяет считать точность достаточной для дальнейшего применения.

Используя команды, отправляемые оператором, и вычисленное состояние робота в момент t_3, определяются координаты локальной цели – точки, в которую оператор хотел направить мобильного робота:

$$\begin{cases} \theta_g = \varphi(t_3) + k_{p\omega}(h_f + h_v)\omega_o \\ x_g = x(t_3) + k_{pv}(h_f + h_v)v_o\cos\theta_g \\ y_g = y(t_3) + k_{pv}(h_f + h_v)v_o\sin\theta_g \end{cases} \qquad k_{p\omega},\ k_{pv} > 0,$$

где x_g и y_g – координаты искомой точки, $k_{p\omega}$. и k_{pv} – коэффициенты, определяющие интервал предсказания угла и расстояния соответственно, зависящие от индивидуальных особенностей оператора. Коэффициенты в общем случае могут быть определены эмпирически для каждого оператора мобильного робота.

Далее вычисляется угловая ошибка в момент времени t_3, определяющая разницу между курсовым углом на вычисленную локальную цель и углом поворота робота:

$$\alpha_g(t_3) = \theta_g - \varphi(t_3).$$

Так как в используемой локальной системе угол поворота робота в момент времени t_1 нулевой, угловая ошибка в этот момент равна курсовому углу и может быть вычислена на основе координат цели:

$$\alpha_g(t_1) = atan2(y_g,\ x_g).$$

Для вычисления задания угловой скорости, обеспечивающей движение робота к локальной цели, используется модель оператора, представленная следующим законом управления [11]:

$$\omega = k_\omega\alpha + k_v\cos\alpha\sin\alpha;\ k_\omega, k_v > 0,$$

где α – угловая ошибка, k_ω и k_v – эмпирически подбираемые коэффициенты, учитывающие индивидуальные особенности оператора.

С помощью модели оператора для текущего положения робота (в момент t_1) и восстановленного (в момент t_3) определяются задания угловых скоростей:

$$\omega_m(t_1) = k_\omega\alpha_g(t_1) + k_v\cos\alpha_g(t_1)\sin\alpha_g(t_1),$$

$$\omega_m(t_3) = k_\omega\alpha_g(t_3) + k_v\cos\alpha_g(t_3)\sin\alpha_g(t_3).$$

Далее вычисляется поправка, определяющая разницу между командами, сформированными оператором и моделью для момента времени t_3:

$$\Delta\omega = \omega_h - \omega_m(t_3).$$

С помощью рассчитанной поправки компенсируется значение $\omega_m(t_1)$, обеспечивающее движение робота из текущего положения в точку, в которую его хотел направить оператор:

$$\omega_k = \omega_m(t_1) + \Delta\omega.$$

Использование поправки, определённой для момента t_3, при расчёте движения в момент t_1 позволяет:

– значительно снизить влияние коэффициентов $k_{p\omega}$, k_{pv}, k_ω и k_v на качество управления и избавиться от необходимости их определения для каждого оператора, используя усреднённые значения;

– увеличить предсказуемость управления, уменьшая отклонение итоговой траектории движения робота, управляемого системой, реализующей предлагаемый способ, от ожидаемой оператором. Это позволяет дополнительно снизить чрезмерные корректировки оператором курса и тем самым повысить качество управления.

Откорректированный вектор управления формируется из линейной скорости, заданной оператором, и вычисленной угловой скорости:

$$\overline{u}_k = (v_k,\ \omega_k)^T = (v_o,\ \omega_k)^T$$

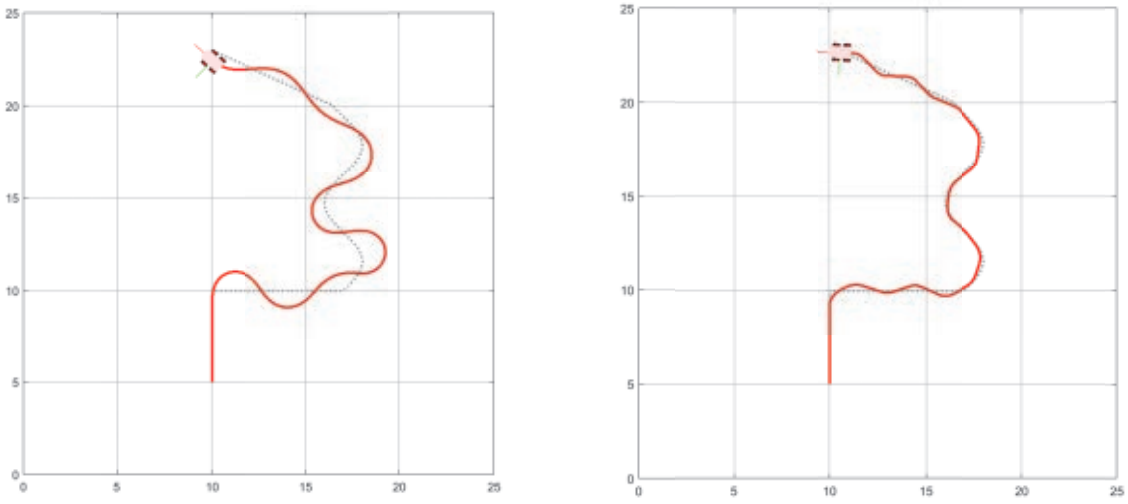
Эти значения передают дальше в систему управления для вычисления заданий для приводов робота.

Описанный способ не использует никаких дополнительных систем и датчиков, кроме встроенных в приводы датчиков скорости вращения. Корректировка с помощью поправки, а также применение неоткорректированного значения линейной скорости, делают управление более предсказуемым для человека-оператора.

Моделирование управления движением в условиях задержек

С целью исследования влияния задержек на эффективность системы дистанционного управления, а также для предварительной проверки и отладки предложенного способа компенсации задержки было проведено моделирование управления движением мобильного робота по заданной траектории с помощью пакета MATLAB.

На первом этапе был использован Pure Pursuit – поставляемый вместе с пакетом MATLAB контроллер следования по заданному пути [12]. Алгоритм контроллера вычисляет задание угловой скорости, позволяющее достичь определённой прогнозируемой точки на траектории перед моделью робота. В процессе управления целевая точка автоматически перемещается по траектории, обеспечивая, тем самым, движение робота. Применение контроллера позволяет имитировать управление оператором, обеспечивая необходимую для проведения исследований повторяемость результатов. С целью имитации задержек передачи видео при управлении текущая позиция робота передавалась на вход контроллера не напрямую, а через буфер, размер которого определялся требуемым временем задержки. Задержка передачи команд управления, сформированных контроллером, также имитировалась с помощью буфера.



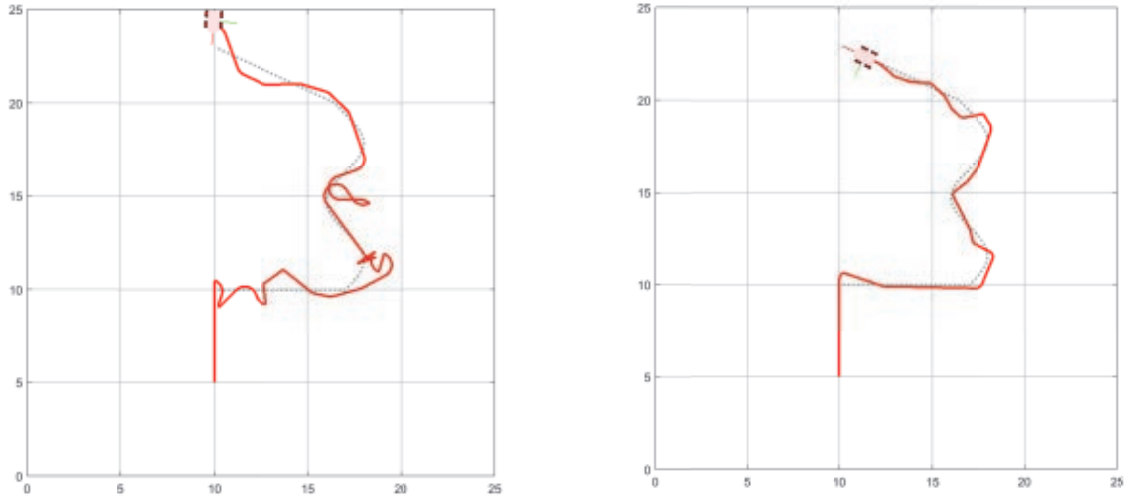
а) б)

Рисунок 6 — Траектория при управлении контроллером: а) при суммарной задержке $(h_f + h_v) = 1,2$ с; б) при той же задержке и применении блока компенсации

Параметры блока компенсации задержки, реализующего предложенный алгоритм, были подобраны эмпирически и не менялись на протяжении проведения всех последующих экспериментов: $k_{p\omega} = 0,8$, $k_{pv} = 1,1$, $k_{\omega} = 1c^{-1}$, $k_v = 1\,рад/с$.

На рисунке 6 приведены траектории движения модели робота, полученные при использовании автоматического контроллера.

Как видно из иллюстрации, наличие задержек существенно увеличивает траекторную ошибку и снижает эффективность управления. Применение блока позволяет компенсировать их негативное влияние.



а) б)

Рисунок 7 — Траектория при управлении оператором: а) при суммарной задержке 1,2 с; б) при той же задержке и применении блока компенсации

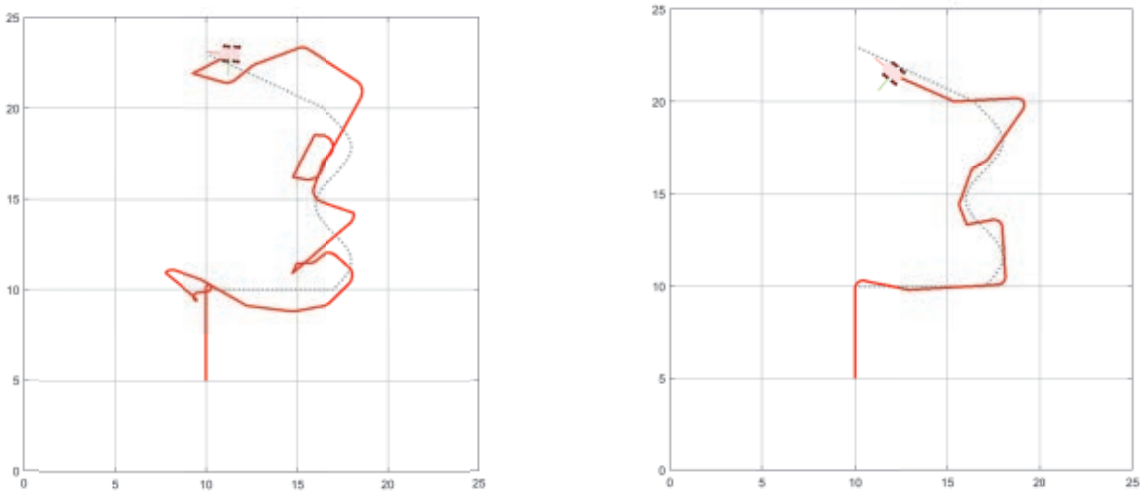
На втором этапе моделирования движением робота управлял оператор. Для этого к персональному компьютеру был подключен джойстик, а модель была откорректирована таким образом, чтобы отображать на мониторе движение робота с заданной задержкой. Как и в предыдущем случае, задержки

отображения положения робота и передачи команд управления имитировались с помощью программных буферов.

На рисунках 7-9 приведены траектории движения модели робота, полученные при управлении оператором.

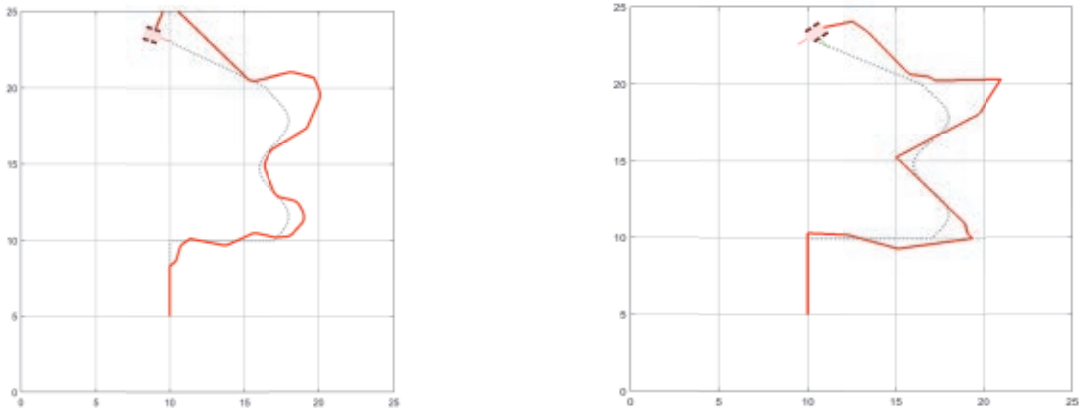
При наличии задержек в системе управления оператор значительно чаще формирует ошибочные команды, что демонстрируется большим количеством характерных петель в траекториях. Основная причина их появления – чрезмерная корректировка угловой скорости и попытки её исправить. Как и в случае управления с применением контроллера, блок компенсации позволяет значительно повысить качество управления.

Задержки более 5 секунд привели автоматический контроллер к потере устойчивости. Оператор в этих условиях смог добиться лучшего результата, снизив скорость движения модели и прибегнув к стратегии «старт-стоп»: он отправлял команду и ждал отображения на мониторе результатов её выполнения перед отправкой следующей.



а) б)

Рисунок 8 — Траектория при управлении оператором: а) при суммарной задержке 2,4 с; б) при той же задержке и применении блока компенсации



а) б)

Рисунок 9 — Траектория при управлении оператором: а) при суммарной задержке 6,0 с; б) при той же задержке и применении блока компенсации

Таким образом, по результатам моделирования в пакете MATLAB предложенный способ компенсации временных задержек показал свою эффективность.

Для проведения экспериментальных исследований в более приближённых к реальным условиям была использована компьютерная модель, выполненная на основе платформы Unity – среды разработки компьютерных игр. На основе учебного тренажёра, описанного в [13], было разработано программное обеспечение, позволяющее моделировать и отображать на экране монитора процесс управления мобильным роботом в различных условиях с целью исследования, проверки и отладки алгоритмов дистанционного управления. Для управления моделью может применяться как ноутбук с подключённым к нему джойстиком, так и специализированный пульт управления, полностью копирующий интерфейсы пульта из состава реального робототехнического комплекса. Внешний вид программного интерфейса оператора приведён на рисунке 10.

В процессе экспериментов оператор управлял с помощью джойстика моделью мобильного робота, осуществляя движение по заранее заданной эталонной траектории, отображаемой на экране. Видео с виртуальной камеры транслировалось напрямую или с заданной задержкой. Команды так же передавались на модель робота с заданной задержкой. Траектории движения робота в виртуальной среде записывались для последующего анализа.

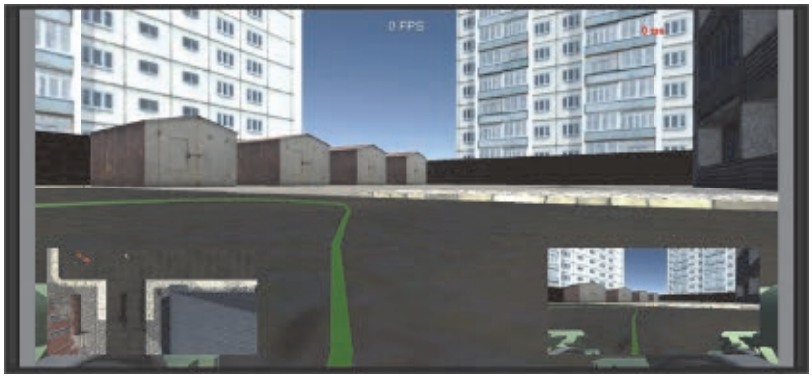


Рисунок 10 — Экран управления моделью робота

Для оценки результатов записанные траектории сравнивались с эталонной, так же учитывалось время движения до достижения конечной точки (обозначено t). В качестве меры сходства использовалось расстояние Фреше (обозначено D). Примеры записанных траекторий представлены на рисунке 11.

Результаты моделирования близки к описанным ранее в работе [9]. По сравнению со способом, предложенным ранее, в настоящей работе изменён расчёт координат локальной цели: вместо одного коэффициента, определяющего интервал времени предсказания, используются отдельные коэффициенты для угла и расстояния. Это позволило повысить эффективность компенсации влияния задержек. Также для оценки сходства траекторий использовано непрерывное расстояние Фреше вместо дискретного. Несмотря на то, что его применение требует больших вычислительных ресурсов, оно позволяет заметно повысить точность оценки.

Компьютерное моделирование, проведённое как в упрощённом виде в пакете MATLAB, так и в условиях, приближённых к реальным, на основе разработанного программного обеспечения, продемонстрировало, что предложенный способ обеспечивает повышение эффективности дистанционного управления движением мобильного робота при задержках от нуля до единиц секунд. При больших задержках в пять и более секунд управление практически не зависит от использования режима компенсации. Как было отмечено ранее, в таких условиях оператор интуитивно переходит к стратегии «старт-стоп», повышая точность за счёт существенного увеличения времени выполнения задачи.

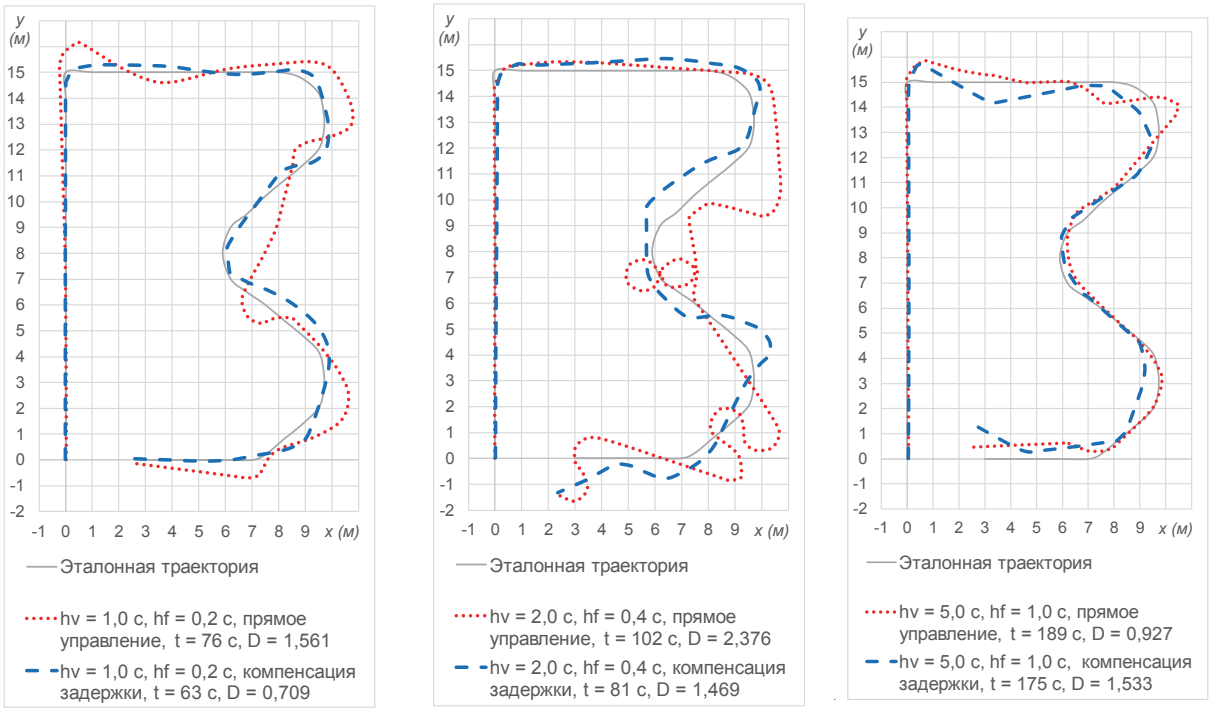


Рисунок 11 — Примеры записанных траекторий

В работе определены критерии эффективности систем дистанционного управления движением наземных мобильных роботов и предложен экспериментальный способ оценки, позволяющий на этапе проектирования и разработки проводить сравнение различных технических решений. Показано, что задержки передачи команд мобильному роботу и отображения видео на мониторе пульта играют ключевую роль в общей эффективности системы управления.

Разработан и предложен способ компенсации негативного влияния задержек, позволяющий значительно уменьшить время выполнения задания и траекторную ошибку и тем самым повысить эффективность системы. Способ может быть реализован в виде программного блока в составе бортовой системы управления мобильного робота и не требует значительных вычислительных ресурсов.

Для проверки предложенного способа были созданы компьютерные модели в пакете MATLAB и на основе разработанного программного обеспечения на базе платформы Unity, проведён ряд экспериментов. Компьютерное моделирование показало, что предложенный способ компенсации позволяет существенно уменьшить время выполнения задания и траекторную ошибку.

Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России FNRG-2022-0026 1022031700007-3-2.2.2 №075-01623-22-03 «Исследование путей реализации адаптивной устойчивости наземного модульного реконфигурируемого робототехнического шасси легкого класса при движении в недетерминированной среде с различными полезными нагрузками».

Литература

1. Спасский, Б. А. Телеуправление в экстремальной робототехнике / Б. А. Спасский // Робототехника и техническая кибернетика. – 2020. – Т. 8. – № 2. – С. 101-111. – DOI: 10.31776/RTCJ.8202.

2. Ando N., Lee J. H., Hashimoto H. A study on influence of time delay in teleoperation // 1999 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (Cat. No. 99TH8399). – IEEE, 1999. – Pp. 317-322. – DOI 10.1109/AIM.1999.803185.

3. Sanders D. A. et al. Tele-operator performance and their perception of system time lags when completing mobile robot tasks // 2016 9th International Conference on Human System Interactions (HSI). – IEEE, 2016. – Pp. 236-242. – DOI: 10.1109/HSI.2016.7529637.

4. Popov, D. S. Requirements for remote control systems for ground-based mobile robots / D. S. Popov, O. A. Shmakov // Extreme Robotics. – 2019. – Vol. 1. – No. 1. – Pp. 175-186.

5. Niemeyer G., Preusche C., Stramigioli S., Lee D. Telerobotics // Springer Handbook of Robotics. – Springer, Cham. – 2016. – DOI: 10.1007/978-3-319-32552-1_43.

6. Tao Y. et al. A comparative analysis of trajectory similarity measures // GIScience & Remote Sensing. – 2021. – Vol. 58. – No. 5. – Pp. 643-669. – DOI: 10.1080/15481603.2021.1908927.

7. Попов, Д. С. Особенности применения каналов управления и передачи данных в составе мобильных робототехнических комплексов наземного базирования / Д. С. Попов, О. А. Шмаков // Экстремальная робототехника. – 2020. – Т. 1. – № 1. – С. 302-309.

8. Бортовой комплекс аудио-видео средств в составе систем дистанционного управления наземными мобильными роботами / П. Ю. Васильева, Д. С. Попов, И. Р. Черемный, О. А. Шмаков // Экстремальная робототехника. – 2021. – Т. 1. – № 1. – С. 169-176.

9. Попов, Д. С. Дистанционное управление наземными робототехническими комплексами в условиях действия временных задержек в каналах передачи информации / Д. С. Попов // Робототехника и техническая кибернетика. – 2022. – Т. 10. – № 3. – С. 213-218. – DOI: 10.31776/RTCJ.10306.

10. Indiveri G., Nuchter A., Lingemann K. High speed differential drive mobile robot path following control with bounded wheel speed commands // Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation. – IEEE, 2007. – Pp. 2202-2207. – DOI 10.1109/ROBOT.2007.363647.

11. Closed loop steering of unicycle like vehicles via Lyapunov techniques / Aicardi M. [et al.] // IEEE robotics & automation magazine. – 1995. – Vol. 2. – No. 1. – Pp. 27-35. – DOI: 10.1109/100.388294.

12. Pure Pursuit Controller [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.mathworks.com/help/robotics/ug/pure-pursuit-controller.html (Дата обращения: 09.10.2022).

13. Пульты дистанционного управления мобильными робототехническими комплексами наземного базирования / Д.Р. Аюпова [и др.] // Экстремальная робототехника. – 2021. – Т. 1. – № 1. – С. 177-196.

И.Б.Прямицын[1], М.Т. Коротких[2], Д.С. Попов[1]

РАСПРЕДЕЛЕННАЯ СИСТЕМА ПОУЗЛОВОГО ИСПЫТАНИЯ ПРИ СБОРКЕ ЛЕГКИХ РОБОТОВ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

[1]ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург, pib@rtc.ru, d.popov@rtc.ru; [2]СПбГПУ, Санкт-Петербург, kmt46@mail.ru

Аннотация

В работе рассмотрены особенности проведения испытаний узлов легких наземных мобильных робототехнических комплексов специального назначения, осуществляемых в условиях единичного и мелкосерийного производства. Показано, что повышение надежности роботов возможно обеспечить при параллельной системе их ускоренных стендовых испытаний.

На основе структурного состава робототехнических комплексов и выполняемых функций отдельных узлов и агрегатов определены основные характеристики, требующие измерений в процессе проведения испытаний.

Предложены конструкция и система управления универсального стенда для испытаний ходовой части и навесного оборудования, имитирующего условия будущей эксплуатации и позволяющего измерять большинство характеристик мобильных роботов.

Ключевые слова

Мобильный робот, испытания, испытательный стенд, единичное производство, мелкосерийное производство.

I.B. Pryamitsyn[1], M.T. Korotkih[2], D.S. Popov[1]

DISTRIBUTED SYSTEM OF NODE TESTS IN THE ASSEMBLY OF LIGHT ROBOTS FOR SPECIAL PURPOSES

[1]Russian State Sctntific Centre for Robotics and Technikal Cybernetics, St. Peterburg, Russia, pib@rtc.ru, d.popov@rtc.ru; [2]SPBSTU, St. Peterburg, Russia, kmt46@mail.ru

Abstract

The paper considers the features of testing nodes of light ground-based mobile robotic complexes for special purposes, carried out in conditions of single and small-scale production. It is shown that it is possible to increase the reliability of robots with a parallel system of their accelerated bench tests.

Based on the structural composition of robotic complexes and the functions performed by individual nodes and assemblies, the main characteristics that require measurements during testing are determined.

The design and control system of a universal bench for testing the chassis and attachments, which simulates the conditions of future operation and allows measuring most of the characteristics of mobile robots, is proposed.

Key words

Mobile robot, tests, test bench, single production, small-scale production.

При производстве роботов специального назначения, осуществляемом в условиях единичного и мелкосерийного производства, значительную долю затрат труда, особенно малопроизводительного ручного, занимают процессы сборки и испытания готовой продукции.

Особенностью этих процессов является возможность испытания отдельных агрегатов только после сборки готового изделия, так как функциональность отдельных узлов зависит от функционирования связанных с ними узлов и агрегатов. Это затрудняет поиск причин отказов и неудовлетворительного функционирования изделия на этапе окончательных испытаний. Устранение же отказов связано с чрез-

вычайно трудоемкими этапами разборки изделия, что после устранения отказов не гарантирует выявления отказов в других узлах устройства. В то же время изготовление узлов в условиях мелкосерийного производства предполагает их разновременную готовность, что определяло бы возможность их более раннего испытания, параллельно с изготовлением и испытанием других узлов и агрегатов. Также определенная часть агрегатов может поступать на сборку после их приобретения, но в настоящее время они не могут быть испытаны в реальных условиях применения до появления собранного готового изделия.

Типы и режимы испытаний

При полевых испытаниях роботов специального назначения обычно невозможно накапливать статистические данные ввиду малого или единичного количества испытываемых изделий.

Испытание отдельных же узлов и агрегатов может быть проведено при применении специального испытательного оборудования, как в нормальном, так и ускоренном режимах. Нормальный режим испытаний может быть реализован для некоторых устройств, срок планируемой эксплуатации которых весьма невелик и может быть смоделирован в производственных условиях. При ускоренных же испытаниях с помощью специального оборудования может быть реализована программа нагружений, обеспечивающая достоверные данные о надежности. Такие определительные испытания особенно важны в условиях единичного, опытно-экспериментального и мелкосерийного производства, так как не только позволяют определить показатели надежности с заданной доверительной вероятностью, но и выявлять рациональные конструктивные решения, принимать меры по модернизации менее надежных узлов и агрегатов. Стендовые испытания позволяют проводить их в ускоренном варианте, используя принципы уплотнения рабочих циклов, экстраполяции нагрузок, возможности программируемого чередования нормальных и форсированных нагрузок [1,4].

Поэлементная схема испытаний обеспечивает преемственность полученных характеристик надежности в случае применения в новой конструкции уже отработанных элементов и комплектующих.

При применении новых опытных образцов отдельных узлов и их испытании появляется база сравнения их по надежности с ранее применявшимися образцами.

Стендовые испытания возможно проводить на испытательном оборудовании, позволяющем в широких пределах изменять программы, режимы и условия испытаний, поэтому особенно важное значение приобретает определение возможностей и требований к такому специальному стендовому оборудованию.

Объект испытаний

Выбор объекта испытаний при анализе легких роботов специального назначения определяется их структурой и выполняемыми функциями отдельных узлов и агрегатов.

Разрабатываемое стендовое испытательное оборудование должно позволять контролировать все функциональные параметры узла, агрегата в условиях, максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации, автоматизировать обработку экспериментальных данных. В то же время оно должно обладать широкими функциональными возможностями, позволяющими испытывать всю гамму разрабатываемых и производимых изделий с учетом их будущего развития.

Если рассмотреть структуру легких роботов специального назначения, произведенных за прошлый период, то можно видеть, что они состоят из ограниченного набора элементов: ходовой части (шасси), манипулятора, оптико-электронных устройств, системы дистанционного управления, системы аудиовидеонаблюдения.

Для каждого из элементов существует свой набор критериев их работоспособности и надежности. В условиях производственных стендовых испытаний по ускоренной методике [2,3] можно определить уровень безотказности, а остальные критерии надежности определяются только в условиях относительно длительной эксплуатации.

Так, для ходовой части основными функциональными характеристиками являются:

– скорость;

- грузоподъемность;
- допустимые углы подъема и спуска;
- возможность преодоления препятствий разного рода.

Причем событием отказа можно считать отклонение любого этого параметра от заданных в техническом задании характеристик.

Возникает вопрос о возможности построения универсального стенда для испытания ходовой части (ХЧ), позволяющего измерять все эти характеристики.

Испытательный стенд

На рисунке 1 приведена схема испытательного стенда. Такой стенд с движущейся подвижной дорожкой 1, устанавливаемой под различными углами, с возможностью измерения тягового усилия динамометрами 2 позволяет снять все основные динамические характеристики ХЧ в условиях различной грузоподъемности при нагружении различными грузами 3.

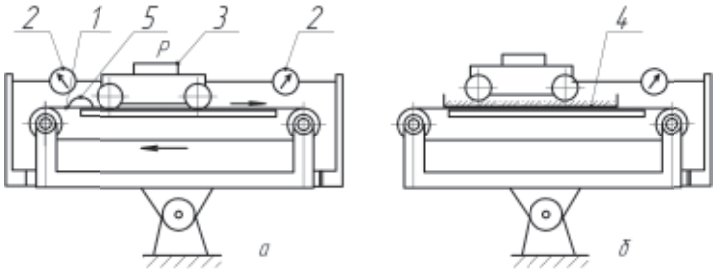


Рисунок 1 — Схема испытательного стенда

В статическом состоянии, при неподвижной ленте транспортера, можно определить тяговые характеристики ХЧ, фиксируемые динамометрами при различных углах наклона поверхности и ее структуры (песок, гравий, асфальт, трава и др.), которая может регулироваться установкой на ленту соответствующего плоского поддона 4 с заданным грунтом (рисунок 1б).

При движении ленты опорной поверхности ее скорость связана с тяговым усилием по специальной программе, что позволяет определить динамические характеристики ХЧ при различных скоростях движения.

На поверхность подвижной ленты могут быть установлены различные препятствия 5 (рисунок 1а), а поверхность ленты может модифицироваться различным способом (смачиваться, покрываться сыпучим веществом и т.д.). Регулируя скорость движения ленты, угол ее наклона, установленные на ХЧ грузы и скорость ХЧ, можно определить все тяговые характеристики ХЧ. Это позволяет объективно сравнивать характеристики вновь разрабатываемых и макетируемых устройств, выявлять недостатки существующих и определять направление их модернизации.

Работоспособность ХЧ может быть проверена и при измененных температурных условиях при переносе ХЧ из климатической камеры на стенд, так как при программировании установки весь цикл испытания может осуществляться за несколько минут до выравнивания температуры ХЧ с окружающей средой.

Система управления испытательного стенда

На рисунке 2 приведена схема системы управления предлагаемым стендом.

Центральным элементом системы является вычислитель, управляющий проведением испытаний и обеспечивающий сбор и предварительную обработку экспериментальных данных. Вычислитель может быть выполнен на основе высокопроизводительного микроконтроллера или встраиваемого компьютера.

Система управления приводами по командам, получаемым от вычислителя, обеспечивает движение ленты с заданной скоростью и наклоны испытательного стенда на требуемые углы. Для контроля выполнения заданий в контуре обратной связи системы управления приводами предусмотрены соответствующие датчики скорости и угла наклона.

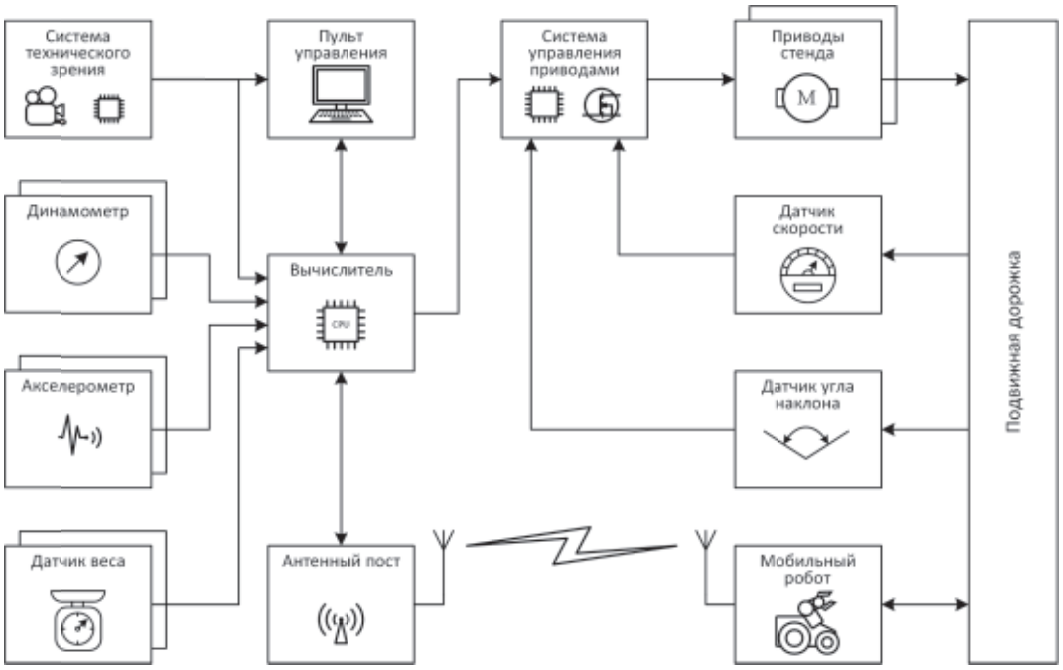


Рисунок 2 — Схема системы управления испытательным стендом

Тензометрические датчики веса, расположенные на движущейся дорожке, позволяют контролировать вес установленных грузов, сравнивать его с заданным в выполняемой программе испытаний и сигнализировать при обнаружении несоответствий.

Акселерометры, выполненные по MEMS-технологии, также размещаются на движущей дорожке и позволяют контролировать вибрационные ускорения в процессе испытаний.

Динамометры, обеспечивающие измерение тягового усилия, как и остальные системы датчиков, подключены к вычислителю.

Система технического зрения, состоящая из набора видеокамер, коммутаторов и видеорегистраторов, позволяет записывать процесс проведения испытаний. При оснащении вычислителя и пульта управления соответствующим программным обеспечением, выполняющим распознавание нештатных ситуаций, на систему технического зрения может быть дополнительно возложена задача обеспечения безопасности испытаний.

Для автоматизации проведения испытаний управление мобильным роботом, установленным на стенд, может осуществляться не оператором, а специальным программным обеспечением, обеспечивающим синхронизацию скоростей и моментов движителей робота и подвижной ленты. Для этого антенный пост, входящий в состав робототехнического комплекса, вместо пульта дистанционного управления подключается к вычислителю испытательного стенда. В этом случае вычислитель имитирует управление оператором по заданной программе, а также получает и анализирует данные телеметрии, передаваемые роботом.

Пульт управления стендом обеспечивает:

- задание программы испытаний;
- настройку параметров стенда и режимов проведения испытаний;
- журналирование;
- автоматизированную подготовку отчётов.

Пульт может быть выполнен как на основе персонального компьютера общего назначения, так и специализированного промышленного компьютера, конструктивно встроенного в стенд.

Испытания отдельных узлов в составе робототехнического комплекса

При испытании манипулятора, имеющего собственную систему управления, необходимо определить:

- зону обслуживания;

- скорость перемещения по отдельным координатам;
- грузоподъемность;
- точность позиционирования.

Все эти характеристики могут быть зафиксированы при испытании манипулятора в стационарном положении, но нарушения работы могут определяться его перемещением на ходовой части и воздействием вибрационных и ударных нагрузок.

Элементы электронного управления, электронные устройства каналов передачи информации тестируются при их изготовлении. Основная причина их отказов при эксплуатации в реальной конструкции связана с механическими и климатическими воздействиями, нарушающими электрические контакты и меняющими параметры элементов электронной аппаратуры.

Предложенный стенд для испытания ходовой части позволяет испытывать и ряд узлов (манипулятор, оптико-электронные системы, аппаратуру управления), установленных непосредственно на ХЧ, на различные нагрузки:

- на ударные и вибрационные нагрузки в соответствии с ГОСТ [5];
- на широкополосные случайные вибрации;
- на вибрации, воспроизводящие заданную акселерограмму процесса, имитирующую эксплуатационную.

Для этого на поверхности подвижной ленты стенда в случайном порядке закрепляются различные препятствия, аналогичные возможным неровностям на реальной поверхности, при этом частота вибраций изменяется за счет скорости движения ленты. Естественно, что при испытании отдельных агрегатов и узлов масса ходовой части может увеличиваться до реальной за счет дополнительных грузов.

Таким образом, предлагаемый стенд позволяет испытывать все устанавливаемое на ХЧ оборудование, как в стационарном положении, так и при имитации движения. При этом массогабаритные характеристики такого стенда позволяют испытывать узлы и агрегаты непосредственно в климатических камерах.

В работе показано, что повышение надежности легких роботов специального назначения возможно обеспечить при параллельной системе их ускоренных стендовых испытаний.

Предложена схема испытательного стенда и структурная схема его системы управления. Показано, что для проведения таких испытаний достаточно применения одного стенда, в значительной степени имитирующего условия будущей эксплуатации и позволяющего определить большинство характеристик мобильных роботов в соответствии с ГОСТ [6].

Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России FNRG-2022-0026 1022031700007-3-2.2.2 № 075-01623-22-03 «Исследование путей реализации адаптивной устойчивости наземного модульного реконфигурируемого робототехнического шасси легкого класса при движении в недетерминированной среде с различными полезными нагрузками».

Литература

1. Беляков В. А., Серегин Н. Г., Серегин Д. Н., Семенов К. В. Стендовые ускоренные испытания приборов на надежность. М.: Издательство МГУЛ, 2015.

2. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. М.: Издательский центр «Академия», 2003.

3. Шашурин В. Д., Ветрова Н. А., Назаров В. В., Серегин Н. Г. Ускоренные испытания на надежность технических систем: Учебное пособие. М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016.

4. РД 50-424-83 Методические указания. Надежность в технике. Ускоренные испытания. Основные положения.

5. ГОСТ Р ИСО 10813-1-2011. Вибрация. Руководство по выбору вибростендов. Часть 1. Оборудование для испытаний на воздействие вибрации.

6. ГОСТ Р 60.6.3.14— 2019/ ИСО 18646-1:2016 Роботы и робототехнические устройства. Рабочие характеристики и соответствующие методы испытаний сервисных мобильных роботов.

И.И. Саитов, Д.Н. Новиков, Д.О. Дохов, А.Н. Тимофеев

РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОГО ПОВОРОТНОГО МОДУЛЯ С СИЛОВОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург, i.saitov@rtc.ru

Аннотация

В данной работе рассмотрены особенности разработки модульного задающего манипулятора робототехнической системы для работы с объектами сложной формы. Предложена кинематическая схема и конструкция типового поворотного модуля, основанного на кривошипно-ползунном механизме. Выполнено сравнение с поворотными модулями, построенными на других типах механических передач. Описаны основные зависимости, позволяющие определить характеристики модуля. Приведен пример расчета параметров модуля с заданными характеристиками. Выполнено сравнение характеристик модуля в зависимости величины хода. Предложенная конструкция модуля может быть применена как в задающем, так и в исполнительном манипуляторе. В ее состав входят широко распространенные и доступные компоненты. Благодаря применению шарико-винтовой передачи модуль имеет минимальные люфты и высокий КПД.

Ключевые слова

Копирующий манипулятор, кривошипно-ползунный механизм, червячная передача, волновая передача.

I.I. Saitov, D.N. Novikov, D.O. Dokhov, A.N. Timofeev

DEVELOPMENT OF A UNIVERSAL ROTARY MODULE WITH FORCE FEEDBACK

Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, St. Petersburg, Russia, i.saitov@rtc.ru

Abstract

In this paper, the features of the modular control manipulator of a robotic system for working with complex form objects are considered. The kinematic scheme and design of a typical rotary module based on a crank-slider mechanism are proposed. Comparison with rotary modules built on other types of mechanical transmissions is carried out. The main dependencies that allow determining the characteristics of the module are described. An example of calculating the parameters of a module with specified characteristics is given. The module characteristics are compared depending on the stroke value. The proposed module design can be applied both in the master and in the executive manipulator. It includes widespread and affordable components. Thanks to the use of a ball-screw transmission, the module has minimal backlash and high efficiency.

Key words

Copying manipulator, crank-slide mechanism, worm transmission, wave transmission

Задающий манипулятор для работы с объектами сложной формы

При выполнении задач, связанных с объектами сложной формы наибольшее распространение получили системы копирующего управления. Такие системы состоят из двух основных частей: задающего и исполнительного манипуляторов. Задающий манипулятор располагается на операторе и предназначен для измерения его управляющих воздействий. С ним через систему дистанционного управления связан исполнительный манипулятор, который непосредственно взаимодействует с объектами. Интуитивность и удобство управления оператором имеет первостепенное значение. Наиболее интуитивными являются системы копирующего управления, в которых задающий и исполнительный манипулятор подобны.

При этом для максимально эффективного и информативного манипулирования необходимо обеспечить возможность измерения и передачи усилий от исполнительного манипулятора к задающему, что в свою очередь приводит к необходимости установки активных приводов на задающий манипулятор. В этом случае, задающий и исполнительный манипулятор отличаются друг от друга только развиваемыми усилиями. Следовательно, решения, применяемые в задающем возможно применить и в исполнительном. Внешний вид такого модульного 7-ми степенного задающего манипулятора представлен на рисунке 1.

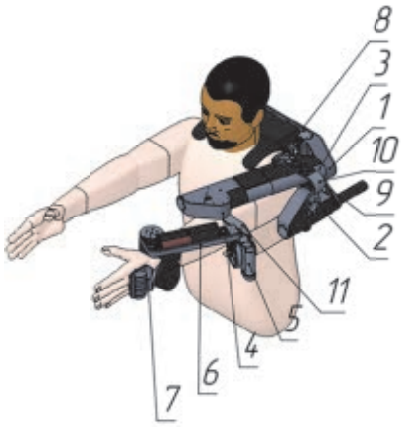


Рисунок 1 — Задающий манипулятор, расположенный на операторе: 1-4 – модули поворота с винтовым приводом; 5 – модуль с червячным приводом; 6-7 – модули с ременным приводом; 8 – основание; 9-10 – соединительные кронштейны

В данном манипуляторе используется 3 типа модулей. Первый — универсальные поворотные модули 1…4. Они имеют ход 90 градусов и значительный момент на выходном звене. Второй тип — это модуль ротации предплечья. Он должен обеспечить угол поворота близкий к 180 градусам. Поэтому в этой степени используется полноповоротный модуль 5. Третий тип — это кистевой модуль, который должен иметь компактные размеры и небольшой вес. Для этого привода модуля вынесены в звено предплечья 6, а вращение на шарнир 7 передается с помощью зубчатого ремня. Далее подробно рассмотрим модули первого типа 1…4.

Требования к модулю

Основные требования, предъявляемые к модулю: определение угла поворота в суставе оператора и передача усилия обратной связи от исполнительного манипулятора к задающему с возможностью блокировки. При этом модуль должен иметь компактные размеры, поскольку это напрямую влияет на величину рабочей области задающего манипулятора, а также минимальный вес так как манипулятор располагается на человеке. Ход выходного звена данного модуля должен быть не менее 90°, а момент не менее 15 Нм. Далее рассмотрим различные механические передачи, с применением которых возможно реализовать такой модуль.

Выбор механической передачи

Червячная передача позволяет получить достаточный момент на выходном звене, модуль на ее основе имеет простую конструкцию. Она не имеет отграничения на угол поворота, но имеет трудности с выбором зазоров, обладает высоким внутренним трением, что значительно снижает точность манипулирования. Пример модуля, с применением червячной передачи представлен на рисунке 2 и описан в [1].

Альтернативным вариантом является применение модуля с приводом квази-прямого действия, описанным в [2]. Такие модули состоят из высокомоментного электродвигателя и редуктора с передаточным отношением менее, чем 1:10. Они обладают достаточным моментом, большой точностью, но имеют значительные габариты и массу.

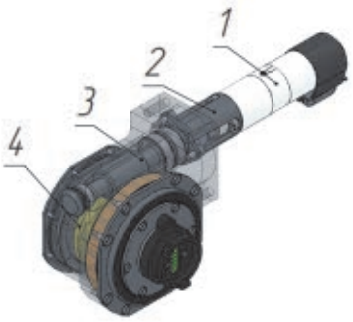


Рисунок 2 — Поворотный модуль с червячной передачей: 1 – мотор-редуктор; 2 – упругая муфта; 3 – червяк; 4 – червячное колесо

Также возможно построение модуля с применением волновой передачи. Такая передача позволяет получить значительное передаточное отношение на одной ступени, имеет лучшее соотношение крутящего момента к массе, но высокие требования к точности изготовления деталей.

В данной работе предлагается модуль, построенный с применением кривошипно-ползунного механизма. Такой механизм не позволят выполнить модуль полноповоротным, но в данном случае в этом нет необходимости. С другой стороны, он позволяет получить двукратное увеличение момента на выходном звене по сравнению с червячной передачей при сопоставимых габаритах.

Кинематическая схема

Кинематическая схема такого модуля представлена на рисунке 3.

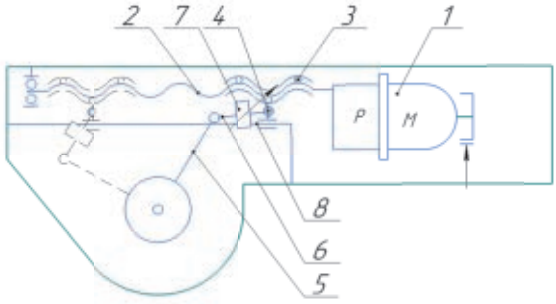


Рисунок 3 — Кинематическая схема модуля: 1 – мотор редуктор с тормозом; 2 – винт шарико-винтовой передачи; 3 – гайка шарико-винтовой передачи; 4 – каретка; 5 – кривошип; 6 – шатун; 7 – датчик усилия; 8 – направляющая

Вращение мотор-редуктора 1 передаётся на вал шарико-винтовой передачи 2, гайка которой установлена в каретку 4. Каретка перемещается по винту 2 и направляющей 8. Движение каретки через шатун 6 передается кривошипу 5. К кривошипу прикреплен фланец, через который вращение передается на следующий модуль.

Применение шарико-винтовой передачи позволяет получить достаточную величину момента на выходном звене при минимальных зазорах и высоком КПД. Для возможности блокировки манипулятора на продолжительное время на электродвигатель установлен фрикционный электромагнитный тормоз.

Для решения задачи силового очувствления необходимо измерять величину усилия, развиваемого модулем. Наиболее эффективно для этих целей используется тензометрические силомоментные датчики. При их применении существуют некоторые особенности. Установка однокомпонентного датчика непосредственно на выходном звене приводит к тому, что он кроме измеряемой компоненты воспринимает и дополнительные компоненты усилия, которые вносят изменения в его показания. Поэтому необходимо предусматривать кинематическую развязку датчика от дополнительных компонентов усилия. В данном модуле это возможно выполнить, интегрировав силомоментный датчик в

шатун, поскольку шатун испытывает только растяжение-сжатие, а величину момента на выходном звене возможно определить с помощью пересчета.

Определение параметров механизма

Схема с основными геометрическими соотношениями длин звеньев модуля представлена на рисунке 4.

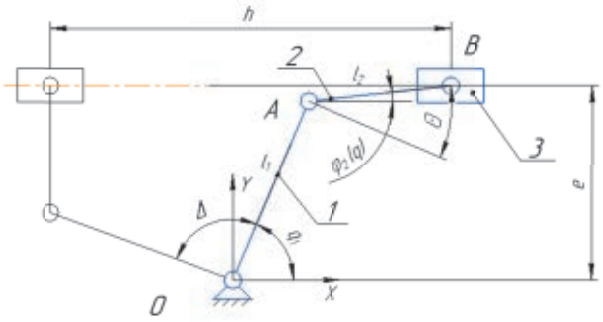


Рисунок 4 — Схема кривошипно-ползунного механизма в крайних положениях: 1 – кривошип; 2 – шатун; 3 – ползун

Основные геометрические размеры данного механизма длина кривошипа l_1, длина шатуна l_2, величина эксцентриситета e. Расчетными характеристиками являются величина хода кривошипа Δ, величина хода ползуна h, максимальный угол давления Θ_{max}.

Сформулируем требования, предъявляемые к расчетным характеристикам модуля:

- ход выходного звена Δ не менее 90°;
- угол давления Θ менее 30°;
- минимальные габариты модуля.

В качестве параметра определяющего габариты модуля примем ход ползуна h.

Вследствие того, что количественные ограничения сформулированы для угловых величин, возможно зафиксировать длину кривошипа и остальные геометрические размеры измерять относительно длинны кривошипа l_1. Это позволяет исключить длину кривошипа l_1 из рассмотрения.

Минимальный угол давления достигается при условии равенства эксцентриситета e и длины кривошипа l_1. Поскольку при этом угол давления дважды меняет знак. Это позволяет исключить из рассмотрения и эксцентриситет e.

Таким образом остается рассмотреть только различные длины шатуна l_2..

Выберем диапазон длин кривошипа равный $l_2 = (0{,}5 \ldots 1{,}5) \cdot l_1$ и определим значение, при котором величина хода ползуна h имеет минимальное значение и выполняются условия на величину хода кривошипа Δ и угла давления Θ.

Запишем некоторые геометрические соотношения для данного механизма. Определим начальный и конечный угол, при котором возможно существование механизма. Начальный угол определятся для случая, когда оси кривошипа 1 и шатуна 2 совпадают. Значение этого угла равно:

$$q_{start} = arcsin\left(\frac{e}{l_1 + l_2}\right). \quad (1)$$

Конечный угол определяется для случая, когда шатун 2 занимает вертикальное положение, значение этого угла равно:

$$q_{finish} = \pi - arcsin\left(\frac{h - l_2}{l_1}\right). \quad (2)$$

Зависимость угла поворота $\varphi_2(q)$:

$$\varphi_2(q) = arcsin\left(\frac{e - l_1\sin(q_1)}{l_2}\right). \quad (3)$$

Положение ползуна B_x:

$$B_x(q) = l_1 \cdot \cos(q_1) + l_2 \cdot \cos(\varphi_2(q)). \quad (4)$$

Угол давления Θ (q):

$$\Theta(q) = \frac{\pi}{2} - q - \varphi_2(q). \quad (5)$$

Порядок определения длины кривошипа выглядит следующим образом:

- задаем $l_2 = (0,5\ldots1,5)\cdot l_1$;
- определяем начальный и конечный угол q_{start} и q_{finish};
- определяем угол давления на всем промежутке от q_{start} до q_{finish};
- определяем величину хода кривошипа, при котором угол давления по модулю меньше θ_{max};
- проверяем, что величина хода кривошипа не меньше заданной Δ_{min};
- определяем величину хода ползуна h;
- обновляем значение l_2 и выполняем следующую итерацию.

После выполнения данного алгоритма были получены следующие результаты:

- длина шатуна- $l_2 = 0,66\ l_1$;
- ход ползуна – $h = 1.9 \cdot l_1$;
- ход кривошипа $\Delta = 92°$;
- угол давления менее $\theta_{\lim} = 30°$;
- начальный $q_{start} = 68°$ и конечный угол $q_{finish} = 160°$.

Из конструктивных соображений выберем длину кривошипа равную 58 мм и получим следующие значения:

- длина шатуна- $l_2 = 38$ мм;
- ход ползуна - $h = 114$ мм.

Определение передаточного отношения.

Схема для пересчета усилия прилагаемого к шатуну F в момент на кривошипе M представлена на рисунке 5.

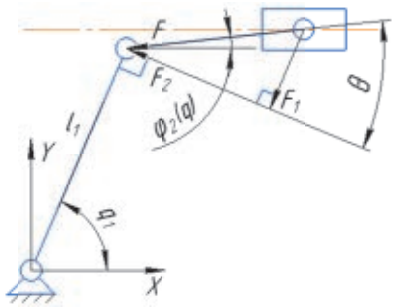


Рисунок 5 — Схема для пересчета усилия

Запишем выражение для момента на выходном звене:

$$M = F \cdot l_1 \cdot \cos(\theta) \quad (6)$$

$$\cos(\theta) = \frac{M}{l_1 \cdot F} = i_{кп} \quad (7)$$

Данное соотношение можно рассматривать как величину, характеризующую угол давления и как передаточное отношение $i_{кп}$ кривошипно-ползунного механизма для кривошипа единичной длинны. По неравномерности и отклонению от единицы этой зависимости можно судить о качестве работы механизма.

Для определения максимальной величины хода такого механизма рассмотрим модули с ходом выходного звена от 90 до 120 градусов. Совмещенный график передаточного отношения $i_{кп}$ для этих модулей представлен на рисунке 6.

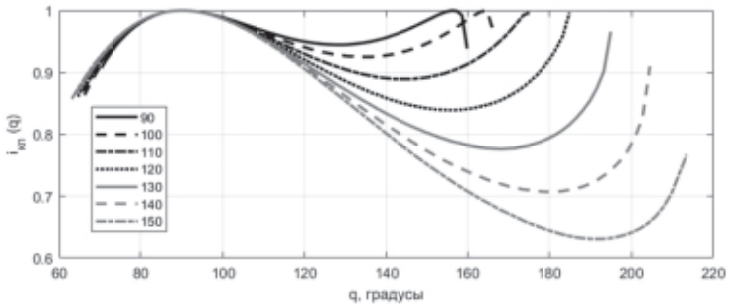


Рисунок 6 — Графики передаточных отношений для модулей с различным ходом

Также вычислим минимальное $iкп_{min}$ и среднее $\overline{iкп}$ значение на всем промежутке:

Таблица 1 — Значения передаточного отношения

Ход, Δ	$iкп_{min}$	$\overline{iкп}$
90	0.9	0.97
100	0.86	0.96
110	0.87	0.94
110	0.84	0.92
130	0.78	0.88
140	0.7	0.85
150	0.63	0.82

Из данного графика и таблицы видно, что применять модули с ходом более 110 градусов не целесообразно, поскольку в этом случае передаточное отношение $i_{кп}$ кривошипно-ползунного механизма значительно отклоняется от 1.

Передаточное отношение всего модуля $i_м$ с учетом шарико-винтовой передачи можно вычислить, определив усилие на гайке:

$$\mathrm{F} = \frac{M_{мр} \cdot 2\pi \cdot \eta}{p} \tag{8}$$

где $\mathrm{M_{мр}}$ момент мотор редуктора, p -шаг винта, η -КПД шарико-винтовой передачи $\eta \approx 0.85$.

Тогда передаточное отношение всего модуля при шаге винта $\mathrm{p} = 2$ мм можно вычислить по формуле:

$$i_м = \frac{M}{M_{мр}} = \frac{l_1 \cdot 2\pi \cdot \overline{i_{кп}} \cdot \eta}{p} = \frac{58\,мм \cdot 2 \cdot 3.14 \cdot 0{,}97 \cdot 0.85}{2\,мм} = 150 \tag{9}$$

Описание конструкции

Внешний вид конструкции такого модуля представлен на рисунке 7.

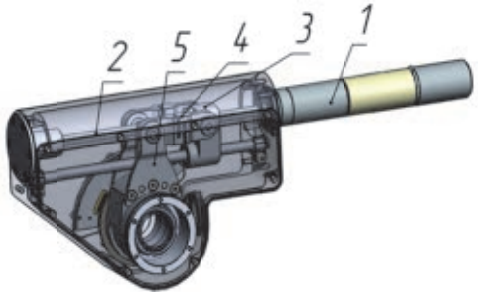


Рисунок 7 — Поворотный модуль: 1 – мотор-редуктор; 2 – шарико-винтовая передача; 3 –каретка; 4 – шатун с датчиком усилия; 5 – кривошип

Предложенный модуль имеет следующие характеристики:

- Ход выходного звена - 90° ;
- Номинальный момент 15 Нм;
- Ход каретки 115 мм;
- Передаточное отношение $i_м = 150$;
- Неравномерность передаточного отношения менее 3%;
- Масса с приводом 960 г.

Предложенная конструкция универсального поворотного модуля позволяет получить значительное передаточное отношение при сохранении компактных габаритов и небольшом весе. В отличии от модулей построенных с применением волновых передач использует широко-распространенные и доступные компоненты. Модуль не имеет трудностей с выбором люфтов и обладает большим КПД по сравнению с червячной передачей, а также позволяет определять момент на выходном звене с помощью однокомпонентного датчика усилия.

Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России FNRG-2022-0012 1021051302301-9-2.2.2 № 075-01623-22-01 «Разработка коллаборативного робота с ассистирующей двурукой антропоморфной манипуляционной системой для работы в пространствах малого объема».

Литература

1. Kim, Gun-Hee & Lee, Jeong-Won & Seo, Tae-Il. (2013). Durability Characteristics Analysis of Plastic Worm Wheel with Glass Fiber Reinforced Polyamide. Materials. 6. 1873-1890. 10.3390/ma6051873.

2. Gealy, David & McKinley, Stephen & Yi, Brent & Wu, Philipp & Downey, Phillip & Balke, Greg & Zhao, Allan & Guo, Menglong & Thomasson, Rachel & Sinclair, Anthony & Cuellar, Peter & McCarthy, Zoe & Abbeel, Pieter. (2019). Quasi-Direct Drive for Low-Cost Compliant Robotic Manipulation.

3. Lopez Garcia, Pablo & Crispel, Stein & Saerens, Elias & Verstraten, Tom & Lefeber, Dirk. (2020). Compact Gearboxes for Modern Robotics: A Review. Frontiers in Robotics and AI. 7. 10.3389/frobt.2020.00103.

В.О. Гончаров[1], Н.С. Слободзян[1], Р.А. Пряничников[2]

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ БЕЗ ПРИМЕНЕНИЯ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА

[1]Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова;
[2]Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва», vog97@yandex.ru

Аннотация

В данной работе рассматривается алгоритм управления синхронным двигателем с постоянными магнитами без применения микроконтроллера. Управление двигателем осуществляется при помощи датчиков положения ротора. Описан процесс синтеза логических связей системы управления, разработана и исследована компьютерная имитационная модель, представлены результаты разработки системы управления без применения микроконтроллера.

Ключевые слова

Электродвигатель, синхронный двигатель с постоянными магнитами, системы управления, алгоритмы управления.

V.O. Goncharov[1], N.S. Slobodzyan[1], R.A. Pryanichnikov[2]

DEVELOPMENT OF A CONTROL SYSTEM FOR AN ELECTRIC DRIVE FOR SPACE PURPOSE WITHOUT THE USE OF A MICROCONTROLLER

[1]Baltic State Technical University «VOENMEH», St. Petersburg, Russia; [2]JSC Academician M.F. Reshetnev ISS, vog97@yandex.ru

Abstract

In this paper, we consider the control algorithm for a synchronous motor with permanent magnets without the use of a microcontroller. The engine is controlled by means of rotor position sensors. The process of synthesis of logical connections of the control system is described, a computer simulation model is developed and investigated, the results of the development of a control system without the use of a microcontroller are presented.

Key words

Electric motor, permanent magnet synchronous motor, control systems, control algorithms.

Основные тенденции развития и совершенствования исполнительных систем современных космических аппаратов заключаются в применении прецизионных, энергоэффективных и надежных приводов. В подавляющем большинстве таких приводов используются синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ), что связано с отсутствием малонадежного щеточно-коллекторного узла, высокими удельными характеристиками мощности, высоким быстродействием и точностью.

Важными критериями, предъявляемыми к устройствам космического назначения, являются высокая степень надежности и увеличенный период безотказной работы системы, обусловленный современными высокими требованиями к сроку активного существования космических аппаратов.

В зависимости от задач привода, могут применяться системы и алгоритмы управления электродвигателем различной сложности. Система управления СДПМ может быть построена как на основе дискретных логических элементов, так и с использованием микроконтроллера, реализующего сложные алгоритмы управления.

Для приводов, реализующих простые алгоритмы управления (в первую очередь, цикловое управление, движение с постоянной скоростью и т.п.), первый вариант построения системы управления

оказывается предпочтительным, поскольку система управления СДПМ без применения микроконтроллера имеет меньшую стоимость. Кроме того, в связи с актуальными проблемами дефицита сложных полупроводниковых изделий, разработка, изготовление и отладка системы управления на микроконтроллере занимает длительное время. В связи с указанными особенностями, в настоящей статье представлен синтез системы управления СДПМ без применения микроконтроллера.

Структура системы управления

Существуют различные методы управления СДПМ, однако наиболее энергоэффективным является способ управления, при котором поддерживается ортогональность векторов магнитного потока статора и ротора [1]. Для обеспечения работы СДПМ в синхронном режиме по датчику углового положения ротора выполняется периодическое детектирование положения его вектора магнитного потока относительно вектора потока статора. Такая обратная связь может быть обеспечена как применением датчиков положения (датчики на основе эффекта Холла), так с помощью специальных бездатчиковых методов [2]: метод управления по сигналам противо-ЭДС, применение наблюдателя состояния и т.п.. В рамках данной работы рассматривается трёхфазный синхронный двигатель с постоянными магнитами и датчиками положения на основе эффекта Холла.

При вращении вала двигателя, в зависимости от текущей комбинации сигналов датчиков положения ротора формируются сигналы управления электродвигателем. Регулирование скорости такого замкнутого привода осуществляется на основе широтно–импульсной модуляции фазных напряжений.

Для обработки сигналов датчиков положения и генерации сигналов управления рассмотрим вариант построения системы управления на основе интегральных логических микросхем. Структурная схема системы управления представлена на рисунке 1.

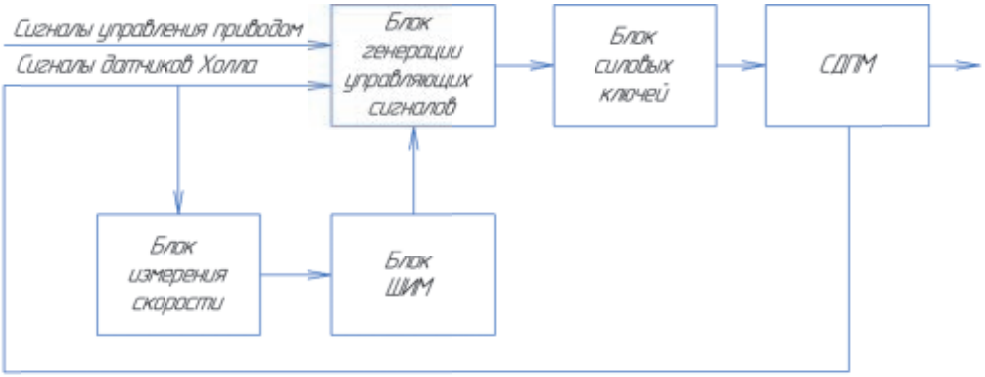


Рисунок 1 — Структурная схема системы управления СДПМ

Система работает следующим образом.

Блок генерации управляющих сигналов включает в себя логические микросхемы, обеспечивающие обработку сигналов с датчиков положения ротора и формирование фазных сигналов управления двигателем. Обработка и генерация сигналов управления двигателем реализована при помощи логических элементов и позволяет осуществлять включение и отключение двигателя, и выбирать направление вращение вала привода.

Блок широтно–импульсной модуляции (ШИМ) во время работы привода непрерывно генерирует сигнал с частотой 20 кГц. Скорость вращения электропривода регулируется коэффициентом заполнения сигнала ШИМ. Далее, в зависимости от сигналов датчиков Холла, т.е. положения вектора магнитного потока ротора, происходит управление транзисторами блока силовых ключей.

Блок измерения скорости обеспечивает отсчет времени между срабатываниями датчиков положения ротора и позволяет замкнуть управление СДПМ по скорости. Измеряя ошибку между заданной величиной скорости и текущей, данный блок изменяет коэффициент заполнения ШИМ-сигналов, что позволяет осуществлять разгон электродвигателя и стабильное поддержание установленной скорости.

В качестве силовых ключей трех транзисторных полумостов (блока силовых ключей) применяются *N*-канальные МОП-транзисторы. Предусилителями транзисторных каскадов служат микросхемы-драйверы, на вход которых подаются сигналы управления, сформирование логическими микросхемами.

Синтез логической структуры

Положение ротора СДПМ определяется при помощи трех датчиков Холла, расположенных под углом 120 электрических градусов друг относительно друга. При вращении двигателя в течение одной половины электрического оборота логический уровень сигнала каждого датчика принимает значение нуля, а в течение второй половины оборота – единицы. Сигналы датчиков положения ротора позволяют сформировать шесть различных комбинаций за один электрический оборот вала электродвигателя. При управлении СДПМ, таким образом, используется шесть различных комбинаций управления транзисторными полумостами. При вращении ротора временные последовательности комбинаций сигналов датчиков положения ротора и сигналов управления транзисторами должны быть однозначны. В момент детектирования новой комбинации сигналов датчиков положения необходимо генерировать соответствующие сигналы управления транзисторными полумостами. Транзисторный полумост может находиться в трёх состояниях: открыт верхний ключ, открыт нижний ключ, оба ключа закрыты [3].

В таблице 1 представлены комбинации сигналов датчиков Холла и сигналы управления СДПМ. При включении комбинации «A–C» происходит открытие сигналом ШИМ верхнего ключа полумоста фазы *A*, нижний ключ транзисторного полумоста фазы *C* подключен к земле, а средняя точка транзисторного полумоста фазы *B* находится в так называемом высокоимпедансном состоянии (оба транзистора закрыты). Комбинации датчиков холла представлены в двоичном виде, где каждый бит обозначает показания конкретного датчика.

Таблица 1 — Комбинации управления СДПМ

Комбинация датчиков Холла	Вращение вперед	Вращение в обратную сторону
101	A–C	C–A
100	A–B	B–A
110	C–B	B–C
010	C–A	A–C
011	B–A	A–B
001	B–C	C–B

Формирование сигналов коммутации обмоток осуществляют логические микросхемы, при помощи которых происходит обработка сигналов датчиков положения ротора, сигналов включения электропривода и выбора направления вращения. Для синтеза логических функций сформирована таблица истинности, где в качестве входных сигналов выступают сигнал направления вращения вала привода (1 – по часовой стрелке, 0 – против часовой стрелки), сигналы управления верхними ключами транзисторных полумостов Ta, Tb, Tc, сигналы управления нижними ключами транзисторных полумостов Ba, Bb, Bc. Комбинации сигналов датчиков Холла вида 000 и 111, являющиеся следствием выхода датчиков из строя или воздействием помех, не позволяют осуществлять управление СДПМ, поэтому при наступлении таких комбинаций транзисторные полумосты переключаются в высокоимпедансное состояние.

На основании значений таблицы истинности можно сделать следующие выводы:

- для каждого канала управления ключами отсутствуют одинаковые слагаемые;
- в каждом слагаемом нет повторяющихся переменных;
- каждое слагаемое содержит все переменные, от которых зависит булева функция.

Следовательно, согласно представленной таблице истинности можно синтезировать логические функции в совершенной дизъюнктивной нормальной форме (СДНФ). Так, СДНФ в базисе «И–НЕ» для канала *Ta* имеет вид:

$$T_a = \overline{A}B\overline{C}F \vee \overline{A}BC\overline{F} \vee A\overline{B}C\overline{F} \vee A\overline{B}CF$$

На основе логических функций, синтезированных для всех шести каналов управления транзисторными ключами, в среде *Matlab(R) Simulink(R)* разработана имитационная компьютерная модель блока управления. В состав модели входят блок управления электродвигателем, блок транзисторных полумостов и блок СДПМ. На рисунке 2 представлена структурная схема компьютерной имитационной модели, а на рисунке 3 – структурная схема блока управления.

Таблица 2 — Таблица истинности сигналов управления ключами

№	Датчики Холла	Направление вращения «По часовой стрелке»	Направление вращения «Против часовой стрелке»	Каналы управления					
				Ta	*Tb*	*Tc*	*Ba*	*Bb*	*Bc*
1	000	1	0	0	0	0	0	0	0
2	101	1	0	0	1	0	1	0	0
3	011	1	0	1	0	0	0	0	1
4	110	1	0	0	0	1	0	1	0
5	100	1	0	0	0	1	1	0	0
6	001	1	0	0	1	0	0	0	1
7	010	1	0	1	0	0	0	1	0
8	111	1	0	0	0	0	0	0	0
9	000	0	1	0	0	0	0	0	0
10	010	0	1	0	1	0	0	0	1
11	001	0	1	0	0	1	1	0	0
12	100	0	1	0	0	1	0	1	0
13	110	0	1	1	0	0	0	0	1
14	011	0	1	0	1	0	1	0	0
15	101	0	1	1	0	0	0	1	0
16	111	0	1	0	0	0	0	0	0
17	–	0	0	0	0	0	0	0	0
18	–	1	1	0	0	0	0	0	0

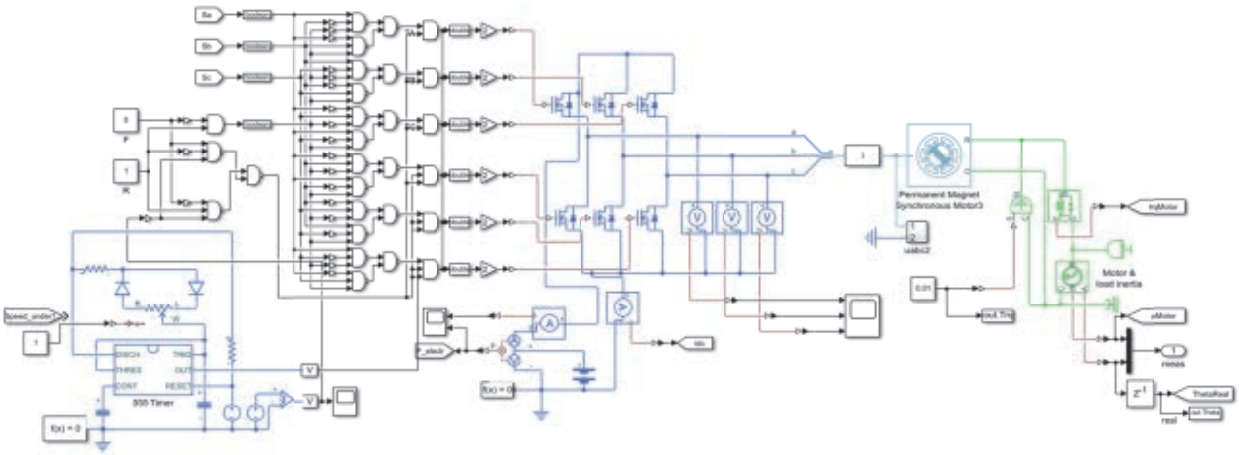


Рисунок 2 — Структурная схема компьютерной имитационной модели

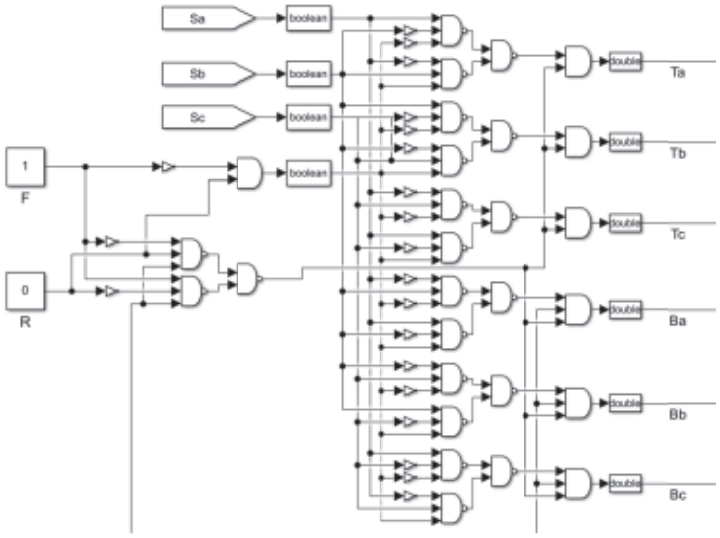


Рисунок 3 — Структурная схема блока системы управления

В компьютерной имитационно модели в качестве исполнительного устройства выбран СДПМ *Maxon EC-max 40, 120 Watt*, параметры представлены в таблице 3.

Таблица 3 — Параметры СДПМ

Параметр	**Значение**
Номинальная скорость вращения, об/мин	10000
Число пар полюсов	1
Моментная постоянная	44,8e-3
Сопротивление статора, Ом	1,03
Индуктивность статора, Гн	0,204e-3

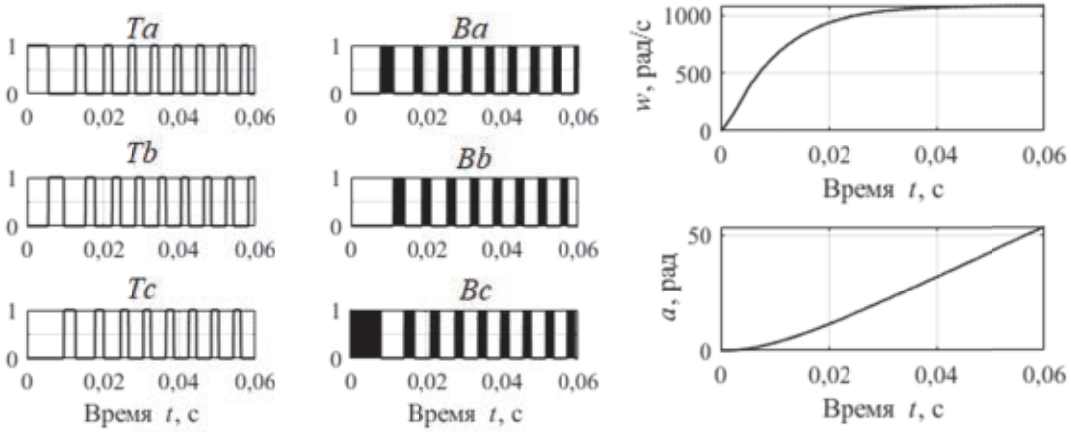


Рисунок 4 — Вращение вала «по часовой стрелке»

Результаты моделирования представлены на рисунках 4 и 5. Исходя из полученных данных видно, что двигатель выходит на заданное число оборотов 1050 рад/с как при вращении по часовой стрелке, так и в противоположную сторону, и стабильно поддерживает скорость. На рисунках изображены логические сигналы управления верхними ключами *Ta, Tb, Tc* и нижними ключами *Ba, Bb, Bc* транзисторных полумостов, а также сигналы скорости вращения w и угла a вала электропривода.

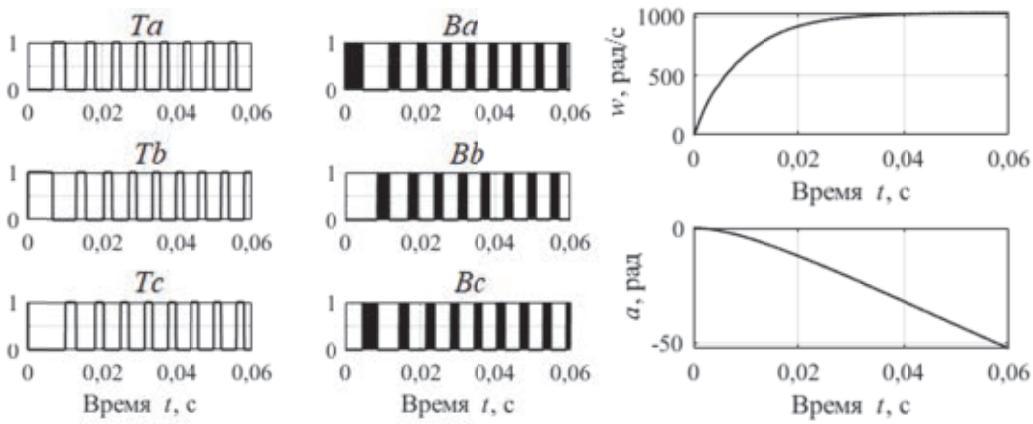


Рисунок 5 — Вращение вала «против часовой стрелки»

Экспериментальный образец модуля управления

На основе синтезированной логической структуры разработан экспериментальный образец системы управления СДПМ без применения микроконтроллера (рис. 6). Электронный модуль состоит из преобразователя напряжения, трех транзисторных полумостов и 20 логических микросхем транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ) серии 74. В качестве источника ШИМ-сигнала выступает интегральная микросхема – универсальный таймер 555, обеспечивающий генерацию повторяющихся импульсов со стабильными временными характеристиками. Управление скоростью вращения вала привода осуществляется изменением скважности ШИМ-сигналов.

В текущий момент происходит отладка модуля управления, полученные промежуточные результаты подтверждают возможность управления СДПМ без применения микроконтроллера.

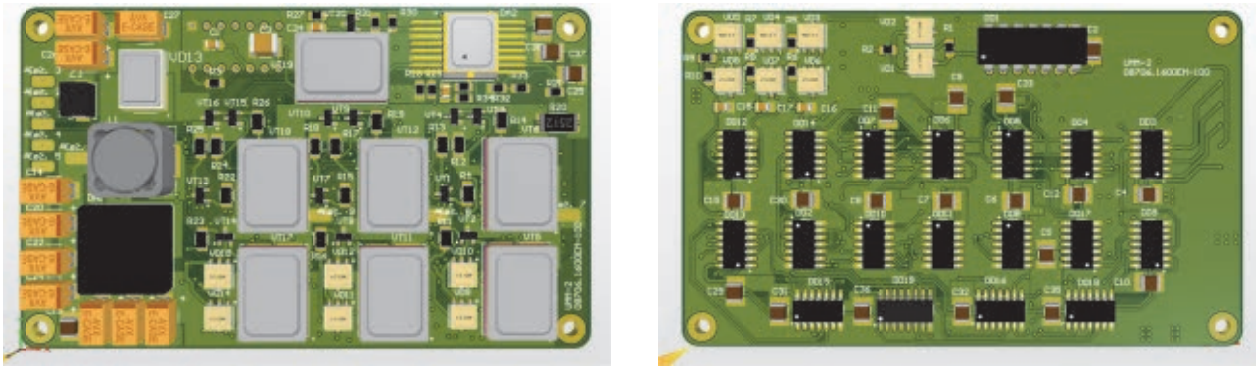


Рисунок 6 — Модель платы

В рамках статьи рассмотрен синтез системы управления СДПМ на основе логических микросхем без применения микроконтроллера. При этом использованный принцип управления СДПМ по датчикам Холла схож с бездатчиковым алгоритмом управления СДПМ по сигналам противо-ЭДС [4], что позволяет в дальнейшем применить разработать систему управления для бездатчикового привода.

Синтезированная логическая структура позволяет реализовать данный метод управления на основе базового матричного кристалла, что сократит количество примененных микросхем и уменьшит габариты платы.

Работа выполнена в рамках проекта «Создание высокотехнологичного импортозамещающего производства универсальных многофункциональных мехатронных модулей, предназначенных для обеспечения работы исполнительных систем трансформируемых конструкций объектов авиационно-космической техники, обеспечивающей освоение и использование Мирового океана, Арктики и Антарктики» в БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-11-2021-057 от 28.06.2021) в соответствии с постановлением Правительства РФ от 09.04.2010 № 218.

Литература

1. Garcia X.T. et al. Comparison between FOC and DTC Strategies for Permanent Magnet Synchronous Motors [Electronical Resource]. URL: http://advances.utc.sk/index.php/AEEE/article/view/179/203 (дата обращения: 05.03.2021).

2. Отказоустойчивая система управления электронасосным агрегатом космического назначения / С. А. Матвеев, Н. А. Тестоедов, Н. С. Слободзян [и др.] // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2021. – № 2. – С. 37-44.

3. Система управления и диагностики вентильного привода / Н.С. Слободзян, В.О. Гончаров, И.А. Романенко // Молодежь. Техника. Космос : труды XI Общероссийской молодежной научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 24–26 апреля 2019 года. – Санкт-Петербург: Балтийский государственный технический университет «Военмех», 2019. – С. 212-217.

4. Система бездатчикового управления вентильным приводом / В. О. Гончаров, Е. Б. Коротков, Н. С. Слободзян, А. В. Четвертухин // Молодежь. Техника. Космос : труды X Общероссийской молодежной научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 18–20 апреля 2018 года. – Санкт-Петербург: Балтийский государственный технический университет «Военмех», 2018. – С. 212-217.

М.В. Прошутинский, Н.Г. Яковенко

КОМПЕНСАЦИЯ ПОГРЕШНОСТИ ДАННЫХ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ АВТОНОМНОГО МАЛОГАБАРИТНОГО ПОДВИЖНОГО РОБОТА

БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, Санкт-Петербург, mikhail.proshootinsky@gmail.com, yakovenko_ng@mail.ru

Аннотация

При работе автономного робота, оснащённого бортовой инерциальной навигационной системой на базе микроэлектромеханических (МЭМС) датчиков, на местности необходимо точно знать его местоположение и пройдённый путь. Однако МЭМС-датчики имеют значительный уход показаний, которые изменяются во времени, а погрешность постепенно возрастает. Предлагается метод возможного уменьшения погрешности МЭМС-датчиков в условиях полного отсутствия возможности уточнения измеренных величин по данным спутниковой навигационной системы или по известным ориентирам на местности.

Ключевые слова

Автономный робот, ориентирование на местности, погрешность измерения местоположения, МЭМС-датчики, статистическая обработка результатов измерений.

M.V. Proshutinsky, N.G. Yakovenko

COMPENSATION OF THE ERROR OF THE NAVIGATION SYSTEM DATA OF AN AUTONOMOUS SMALL-SIZED MOBILE ROBOT

Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D.F. Ustinov», St. Petersburg, Russia, mikhail.proshootinsky@gmail.com, yakovenko_ng@mail.ru

Abstract

When operating an autonomous robot equipped with an onboard inertial navigation system based on MEMS sensors, it is necessary to know exactly its location and distance traveled on the ground. However, MEMS sensors have a significant drift, which changes over time, and the error increases over time. A method is proposed for a possible decrease in the error of MEMS sensors in the absence of the possibility of specifying the measured values according to the data of the satellite navigation system or according to known landmarks on the ground.

Key words

Autonomous robot, orienteering, position measurement error, MEMS sensors, statistical processing of measurement results.

В процессе проектирования малогабаритных автономных подвижных роботов наряду с решением вопросов перемещения, управления и бортового электропитания стоит проблема автономной навигации. Она в свою очередь подразделяется на три базовых принципиальных задачи:

1. Картографирование – формирование цифровой карты местности;
2. Локализация – определение местоположения и ориентации в пространстве;
3. Планирование пути – прокладка оптимального маршрута по сформированной карте.

Для решения всех поставленных задач автономной навигации разрабатываются специальные автономные малогабаритные навигационные системы. В состав данных систем могут входить различные технические устройства в разнообразных комбинациях в зависимости от целей применения конкретного робота. Среди них лидары, ToF-камеры, одометры, модули спутниковой навигации, магнитометры, гироскопы и акселерометры.

Все вышеперечисленные устройства и системы вместе показывают достаточно высокие результаты по определению местоположения робота и решению всех задач навигации. Комплексирование данных от различных датчиков первичной информации производится по алгоритмам, основанным, как правило, на фильтре Калмана или Маджвика.

Однако общая эффективность приборов упирается в условия их применения в навигационных системах.

Применение лидаров и ToF-камер для решения задачи картографирования ограничено визуальной и внешней средой. Погодные явления и условия плохой видимости, либо его полного отсутствия, существенно снижают возможность применения данных устройств.

Решение задачи локализации осложняется тем, что цифровая карта местности, загруженная в память робота, может не соответствовать реальному ландшафту и рельефу местности, изменённому, например, в результате стихийных бедствий, последствий артиллерийской подготовки или другой целенаправленной человеческой деятельности.

Следовательно, задача планирования пути также становится ограниченно выполнимой.

Одометрия вообще не считается методом определения местоположения, а является лишь средством его оценки. Из-за проскальзывания колёс в системе накапливаются существенные ошибки.

К тому же качество одометрии существенно зависит от используемых в наземном роботе принципов перемещения. У роботов с двух- и четырёхколёсными дифференциальными шасси, где достаточно пары колёсных энкодеров, одометрия снимается довольно просто. Но для роботов, построенных на дифференциальных гусеничных приводах, уже сложнее получить точную одометрию. С всенаправленными роликовыми колёсами (omni wheels) и колёсами Илона (mecanum wheels) снятие качественной одометрии превращается в сложный процесс. Задача получения одометрии с шагающих роботов решается только благодаря использованию десятков различных датчиков, а также разработкой сложнейшего программного обеспечения.

Наибольшую точность определения местоположения робота обеспечивают модули спутниковой навигации. Но и они не лишены недостатков. Среди них можно выделить низкую частоту выдачи навигационных данных (1–10 Гц) от спутниковых навигационных систем (СНС), отсутствие информации об ориентации робота в пространстве, а также восприимчивость к высокого уровня помехам сигналов и преднамеренным помехам типа спуфинга. Но самой большой проблемой спутниковой навигации является наличие мёртвых зон. Робот может оказаться в неизвестной местности, где попросту нет возможности определить своё местонахождение по СНС, так как сигнал от спутников не доступен по тем или иным объективным причинам:

- влияние погодных условий;
- движение в туннеле, в ущельях гор, в колодцах, подвалах или шахтах.

В конце концов, СНС может выйти из строя благодаря их ликвидации в особый период [1], либо сами спутники могут просто-напросто отключить вручную с Земли [2].

Магнитометры также подвержены влиянию помех и искажений, из-за чего они требуют регулярной калибровки. Но при этом всё равно уступают в точности модулям спутниковой навигации. Поэтому магнитометры применяются только в качестве резервных датчиков.

Инерциальные датчики – акселерометры и гироскопы – применяются только в течение короткого, строго определённого времени из-за неограниченного роста ошибок.

Тем не менее, благодаря своим инерционным свойствам и всепроникающему магнитному полю Земли, доступному в любой точке мира, акселерометры, гироскопы и магнитометры являются полностью автономными датчиками.

Применение БИНС на МЭМС для решения задач микронавигации роботов

Исходя из всех вышеперечисленных ограничений, единственной действительно автономной навигационной системой робота, подходящей для решения поставленных задач в указанных условиях,

является бесплатформенная инерциальная навигационная система (БИНС). Обобщённая функциональная схема БИНС приведена на рисунке 1.

Рисунок 1 — Обобщённая функциональная схема БИНС

В состав БИНС помимо инерциальных датчиков – акселерометров и гироскопов – могут дополнительно входить магнитометры, барометры, высотомеры, термометры и другие датчики, позволяющие повысить точность измерений и вычислений.

Среди других достоинств БИНС стоит отметить, что они обладают хорошей помехозащищённостью, высокой частотой выдачи навигационных данных (до 100 Гц) и возможностью определения ориентации робота в пространстве.

Применение БИНС на МЭМС для решения задач микронавигации роботов

Сложность задачи проектирования автономной навигационной системы робота под требуемые условия применения состоит в том, что разработчику постоянно приходится жертвовать точностью в пользу снижения потребляемой мощности источника питания и уменьшения массогабаритных характеристик. Поэтому для решения задачи автономной навигации в мобильной робототехнике активно применяются малогабаритные БИНС с инерциальными измерительными модулями (ИИМ), разработанным на базе микроэлектромеханических систем (МЭМС).

Во-первых, применение МЭМС-технологий в датчиках первичной информации ИИМ даёт возможность ощутимо расширить их функциональность. Технология изготовления таких устройств основана на производстве электронных компонентов микросхем. Особенностью конструкции подобной микросистемной техники является тесная интеграция электроники и миниатюрных механических структур. Благодаря внешнему воздействию окружающей среды на микромеханические элементы вырабатывается электрический сигнал и передаётся в электронную схему для последующей обработки.

Во-вторых, решающее значение имеет исключительно низкая стоимость микромеханических чувствительных элементов. Благодаря использованию хорошо отработанных современных технологий массового производства микроэлектроники цена одного чувствительного элемента лежит в пределах от нескольких единиц до сотен долларов.

В-третьих, по сравнению с прецессионными гироскопами или магнитометрами, требующими аккуратного обращения ввиду хрупкости внутренних элементов и имеющими ограничения по примене-

нию из-за внешних паразитных магнитных полей, высокоточные МЭМС-датчики лишены указанных недостатков и не требовательны к условиям транспортировки.

Однако общим недостатком всех БИНС, вытекающим из особенностей применяемых в них инерциальных датчиков, является сохранение ими требуемой точности навигации лишь в течение ограниченного времени вследствие накапливающихся ошибок измерения [3].

А работая с микросистемными технологиями, мы наталкиваемся на фундаментальное физическое противоречие: чем меньше по размерам и весу датчик первичной информации, тем больше погрешность измерения вследствие недопустимо большого собственного дрейфа и значительного влияния внешней среды (например, температура, а также линейные и угловые ускорения движения носителя).

МЭМС гироскопы и акселерометры, к сожалению, имеют многочисленные и разнообразные погрешности, непредсказуемо изменяющиеся во времени. Вследствие чего в настоящее время БИНС, разработанные на базе МЭМС-датчиков, используются для измерения только очень кратких по времени ускорений и перемещений. Поэтому с целью повышения их точности в микронавигации применяются различные методы и технические решения.

Коррекция показаний БИНС на МЭМС

Разработка системы снижения или компенсации погрешности БИНС автономного малогабаритного подвижного робота на основе МЭМС является актуальной, а также имеет важное научное и практическое значение.

В настоящее время в мире для начальной выставки БИНС и снижения погрешности инерциальных датчиков чаще всего используются данные других навигационных систем. Большая часть предлагаемых решений сводится к использованию интегрированных навигационных систем, состоящих из СНС и БИНС [4] [5].

В том числе для компенсации погрешностей интегрированной навигационной системы широко используется аппарат искусственных нейронных сетей [6] [7] [8].

Проблема в том, что у робота может не быть возможности начальной выставки, а также дальнейшей возможности коррекции своих показаний по СНС или другим системам и датчикам по причинам, указанным выше.

Краткое описание предлагаемого метода автоматической коррекции БИНС на МЭМС

Уменьшение и особенно предсказание погрешности позволит использовать БИНС на основе МЭМС-датчиков достаточно длительное время без интеграции с другими системами определения местоположения робота и без накопления существенных ошибок.

Задача сводится к разработке системы идентификации закона распределения вероятности ошибки. Согласно [9] задача идентификации формулируется следующим образом: по результатам наблюдений над входными и выходными переменными системы, полученными в условиях функционирования объекта, должна быть построена оптимальная в некотором смысле модель, т. е. формализованное представление этой системы. Задача идентификации в узком смысле состоит в оценивании параметров и состояния системы по результатам наблюдений над входными и выходными переменными.

Для решения задачи идентификации, которая базируется на актуальной теории управления, используются современная вычислительная техника для получения, передачи и обработки больших массивов наблюдений, необходимых для построения адекватных моделей реальных объектов.

Суть предлагаемого метода заключается в следующем.

В процессе работы робота складывается ситуация, когда фактически измеренные значения линейного и углового перемещения с помощью БИНС на базе МЭМС-датчиков представлены с неизвестной, но предполагаемой погрешностью. При этом скорректировать навигационные данные по другим системам навигации и ориентации невозможно. Со временем погрешность измерения нарастает и с

определённого момента времени становится настолько большой, что использовать эти показания просто недопустимо.

В указанных условиях предлагается следующий алгоритм снижения величины погрешности измерения данных бортовой навигационной системы.

Заранее на полигоне на конкретном роботе с конкретными МЭМС-датчиками и на конкретных шасси набираются статистические данные по линейным и угловым перемещениям. В память робота, реализованную в виде Flash-карты, eMMC или SSD-диска, записывается, например, 100 пар (200 значений) групп погрешностей. Пары значений состоят из линейных и угловых значений. Такое большое количество связано с тем, что, как неоднократно отмечали в литературе [10] [11], при включении МЭМС-датчиков в работу начальное значение погрешности меняется в довольно больших пределах. Более того, меняется и сам характер погрешности измерений от включения к включению [12].

Затем все измеренные на полигоне значения обрабатываются в бортовом компьютере робота, где вычисляется их математическое ожидание. В дальнейшем после полигонных испытаний полученные абсолютные значения математического ожидания используются как поправочные коэффициенты. То есть из измеренного с неизвестной погрешностью значения навигационных данных вычитается полученное заранее на полигоне значение математического ожидания погрешности измерения этих же данных.

$$n'_X = n_X - M_{nX}$$

$$n'_Y = n_Y - M_{nY}$$

$$n'_Z = n_Z - M_{nZ}$$

$$\omega'_X = \omega_X - M_{\omega X}$$

$$\omega'_Y = \omega_Y - M_{\omega Y}$$

$$\omega'_Z = \omega_Z - M_{\omega Z}$$

Единственное допущение, которое вводится в данном алгоритме, состоит в том, что значения, полученные на полигоне, являются верными только для конкретных условий и используются, когда нет никаких других возможностей откорректировать показания датчиков.

Таким образом вначале необходимо проанализировать спектр погрешности конкретных МЭМС-датчиков, затем вычислить характер их погрешностей и впоследствии использовать полученные сведения для корректировки показаний этих же МЭМС-датчиков.

Для реализации данного метода необходимо в навигационную систему робота дополнительно включить специальную самонастраивающейся систему управления в виде блока сравнения по линейному и угловому перемещению.

Обобщённая функциональная схема БИНС с блоками сравнения по линейному и угловому перемещению приведена на рисунке 2.

Принцип действия предлагаемой самонастраивающейся системы следующий.

При штатной работе необходимо максимально точно определить, какая конкретно группа заранее измеренных на полигоне погрешностей наиболее точно соответствует конкретному включению навигационной системы в работу. Для этого необходимо узнать ту величину погрешности, которая имеется у навигационной системы при конкретном включении.

Для проведения измерений погрешности после включения питания перед началом движения робот выстреливает вперёд мерную линейку в виде подпружиненной металлической ленты – аналога строительной рулетки. После чего робот совершает движение вперёд по линейке длиной 1 метр. При этом навигационная система робота показывает другое значение (например, 997 мм вместо 1000 мм).

Затем робот поворачивается на 90 градусов вправо или влево и двигается перпендикулярно линейке ещё 1 метр. При этом навигационная система снова показывает другое значение (например, поворот на 90,3 градуса и расстояние 1003 мм).

Рисунок 2 — Обобщённая функциональная схема БИНС с блоками сравнения по линейному и угловому перемещению

По первым показаниям вычислительный блок выбирает группу погрешностей, отобранных во время полигонных испытаний. Затем информация поступает в блок сравнения по линейному и угловому перемещению, где происходит вычитание математического ожидания погрешности из измеренного значения. В итоге погрешность измерений уменьшается на величину математического ожидания.

Первые полученные результаты экспериментов

В рамках полномасштабного эксперимента с целью подтверждения идей, высказанных в данной статье, было поставлено 120 однотипных опытов на экспериментальной установке в стационарном состоянии во всех шести положениях длительностью 8 часов каждый.

Характер распределения погрешностей измерений рассматривался с различными доверительными интервалами работы инерциальных датчиков как в рамках одной сессии, начиная с первой минуты работы ИИМ, так и от включения к включению.

В таблицах 1 и 2 приведены вычисленные значения математического ожидания и дисперсии данных, полученных с МЭМС гироскопа и акселерометра в статическом режиме в рамках одной сессии по выборке в течение первой минуты работы, двух минут работы и 8 часов работы ИИМ.

В таблице 3 приведены вычисленные значения математического ожидания данных, полученных с МЭМС гироскопа и акселерометра в статическом режиме в рамках двадцати восьмичасовых сессий работы ИИМ.

На рисунках 3 и 4 приведены графики данных, полученных с МЭМС гироскопа и акселерометра в статическом режиме в рамках одной восьмичасовой сессии работы ИИМ.

На рисунке 5 представлена гистограмма данных, полученных с МЭМС гироскопа в статическом режиме в рамках одной восьмичасовой сессии работы ИИМ.

В ходе первых полученных результатов эксперимента установлено, что математическое ожидание данных, полученных с МЭМС-датчиков в статическом режиме, и их дисперсия в рамках текущей сессии в течение первой и второй минуты, а также в течение восьмичасовой работы ИИМ меняются незначительно.

Таблица 1 — Математическое ожидание по выборке в рамках одной сессии в статическом режиме

Время	Гироскоп			Акселерометр		
	Ось X	Ось Y	Ось Z	Ось X	Ось Y	Ось Z
1 мин	2,81	0,41	1,17	-0,34	-0,53	9,53
2 мин	2,81	0,40	1,17	-0.34	-0.53	9.53
8 часов	2,79	0,40	1,12	-0.33	-0.51	9.54

Таблица 2 — Дисперсия по выборке в рамках одной сессии в статическом режиме

Время	Гироскоп			Акселерометр		
	Ось X	Ось Y	Ось Z	Ось X	Ось Y	Ось Z
1 мин	0,02	0,03	0,04	0,00	0,00	0,00
2 мин	0,02	0,03	0,03	0,00	0,00	0,00
8 часов	0,03	0,19	0,04	0,00	0,00	0,00

Таблица 3 — Математическое ожидание измерений, снятых с МЭМС-гироскопа и МЭМС-акселерометра в рамках 20 экспериментальных сессий в статическом режиме

	Гироскоп			Акселерометр		
	Ось X	Ось Y	Ось Z	Ось X	Ось Y	Ось Z
	2.50	0.25	0.55	-0.55	0.01	9.53
2	2.50	0.33	0.62	-0.11	-0.07	9.53
3	2.75	0.27	0.80	-0.81	-0.10	9.50
4	2.50	0.28	0.60	-0.88	-0.51	9.54
5	2.77	0.26	0.76	-0.81	-0.11	9.52
6	2.79	0.28	0.79	-0.79	-0.12	9.52
7	2.52	0.31	0.74	-0.65	-0.07	9.53
8	2.71	0.29	0.79	-0.53	-0.11	9.54
9	2.70	0.24	0.66	-0.73	-0.11	9.53
10	2.49	0.31	0.54	-0.84	-0.14	9.52
11	2.79	0.25	0.74	-0.54	-0.38	9.52
12	2.74	0.33	0.95	-0.65	-0.23	9.52
13	2.51	0.36	0.71	-0.74	-0.03	9.53
14	2.73	0.33	0.96	-0.17	-0.71	9.53
15	2.52	0.37	0.76	0.00	-0.84	9.52
16	2.73	0.29	0.77	-0.39	-0.57	9.55
17	2.52	0.36	0.92	-0.80	-0.39	9.53
18	2.50	0.28	0.66	0.23	-0.82	9.52
19	2.50	0.34	0.66	-0.87	-0.11	9.52
20	2.72	0.25	0.71	-0.79	-0.18	9.52

Следовательно, их можно использовать в качестве поправочных коэффициентов для коррекции показаний ИИМ, находящегося в стационарном состоянии.

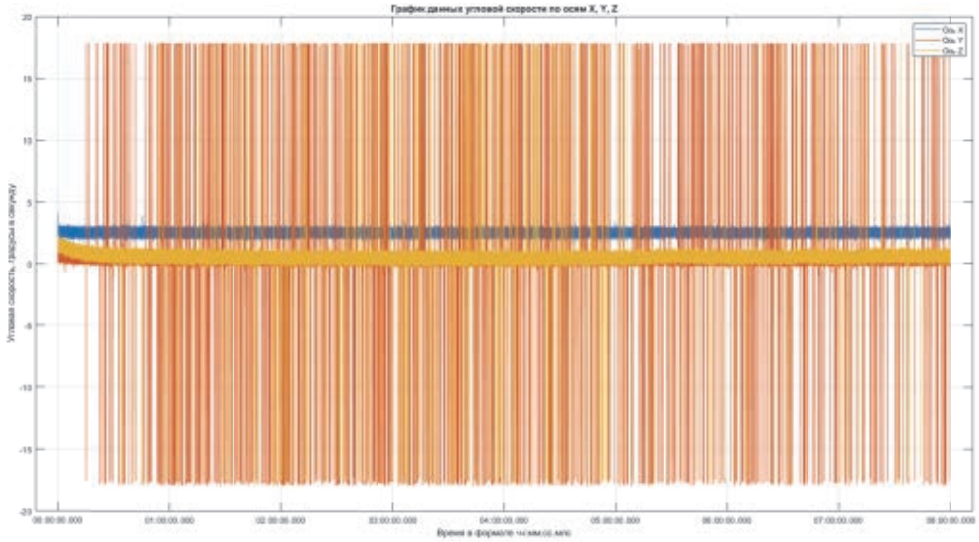


Рисунок 3 — Показания МЭМС-гироскопа в течение 8 часов работы датчика в статическом режиме

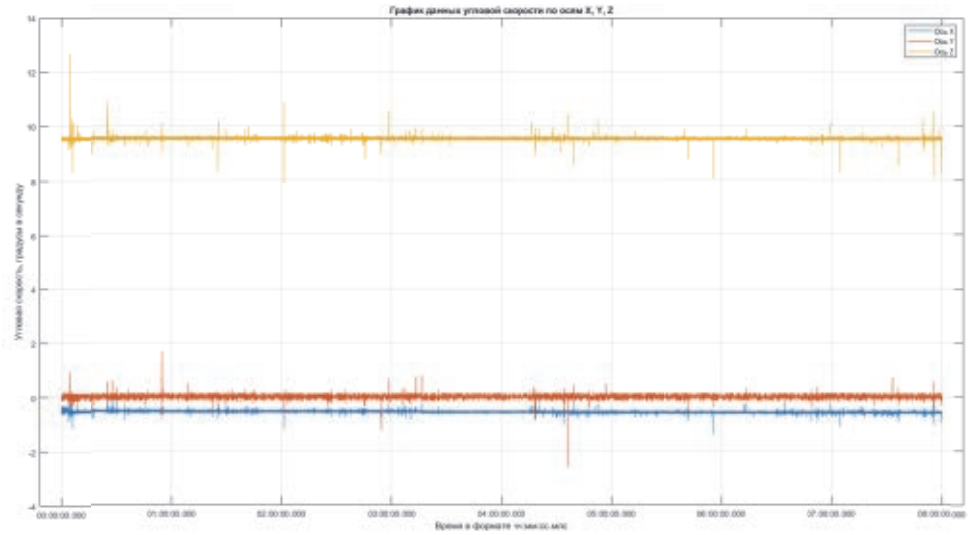


Рисунок 4 — Показания МЭМС-акселерометра в течение 8 часов работы датчика в статическом режиме

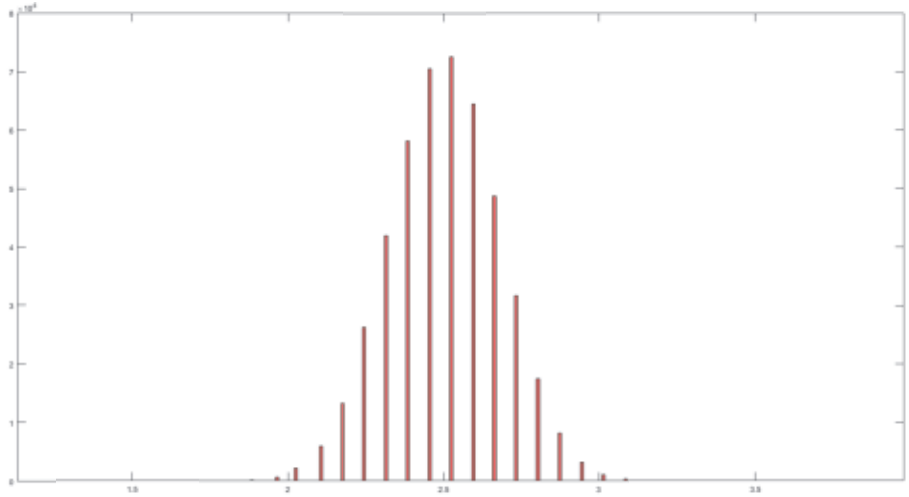


Рисунок 5 — Гистограмма характеристик, снятых с МЭМС-гироскопа по оси X в течение 8 часов работы датчика в статическом режиме

В ходе первых полученных результатов двадцати экспериментов, проведённых последовательно в одном и том же положении ИИМ, установлено, что:

– судя по графикам, в данных, снятых с МЭМС-датчиков, присутствует шум и внутренний дрейф относительно нулевого значения;

– математическое ожидание данных, полученных с МЭМС-датчиков в статическом режиме, изменяется от включения к включению;

– судя по гистограммам, характер показаний МЭМС-датчиков похож на нормальный закон распределения.

Следовательно, для использования абсолютных значений математического ожидания в качестве поправочных коэффициентов для коррекции показаний ИИМ требуется разработать методику определения группы поправочных коэффициентов для системы автоматической коррекции ИИМ, которая обеспечит достаточный горизонт прогнозирования.

Цель исследования – используя разнообразные адаптивные методы обработки случайных сигналов, предсказать погрешность ИИМ, разработанных на базе МЭМС-датчиков, с некоторой заданной точностью и сравнить результаты прогноза с экспериментальными данными.

Дальнейшей задачей является оценка динамических характеристик МЭМС-датчиков, детальная проработка вопроса обработки результатов эксперимента, предсказания поведения погрешности и применимости предлагаемой методики компенсации погрешности.

В качестве одного из адаптивных методов прогнозирования случайных сигналов рассматривается вопрос о возможности применения нейронных сетей в блоке сравнения по линейным и угловым перемещениям для обработки результатов эксперимента и предсказания поведения погрешности. Необходимо разработать и смоделировать нейросеть, обучить её и обработать с её помощью результаты натурных экспериментов.

Результаты были получены в рамках выполнения работ в соответствии с Дополнительным соглашением от 09.06.2020 № 075–03–2020–045/2 Между Минобрнауки и БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова на выполнение государственного задания по теме «Разработка фундаментальных основ создания и управления группировками высокоскоростных беспилотных аппаратов космического и воздушного базирования и группами робототехнических комплексов наземного базирования» (шифр «Роботы – 2024»).

Литература

1. «Минобороны отчиталось об испытаниях с уничтожением спутника на орбите». РБК. 16 ноября 2021 г.: https://www.rbc.ru/politics/16/11/2021/619393c39a79475f58e82c70. доступ 23.09.2022 г.

2. «Отключить страну по щелчку. Что будет с миром, если GPS и ГЛОНАСС перестанут работать?» Дэвид Хэмблинг. BBC Future. 11 октября 2020. https://www.bbc.com/russian/vert-fut-54452719. доступ 23.09.2022 г.

3. Максюшин Г. В. Учёт погрешностей МЭМС-акселерометра при его моделировании. Политехнический молодёжный журнал. 2019. № 02. С 1–7.

4. Аль Битар Н., Гаврилов А. И. Сравнительный анализ алгоритмов комплексирования в слабосвязанной инерциально-спутниковой системе на основе обработки реальных данных. «Гироскопия и навигация». Том 27, № 3 (106), 2019.

5. Корректируемая бесплатформенная инерциальная навигационная система на базе микромеханических датчиков первичной информации. Зиновьев П. Д., Кветкин Г. А. Известия ТулГУ. Технические науки. 2016. Вып. 6.

6. Лавойе Ф., Ди Ли, Ландри-мл. Р. Разработка инерциальной навигационной системы на МЭМС датчиках. Гироскопия и навигация. - 2009. - № 1. - С. 75–85. УДК 621.398.694.

7. Аль Битар Н., Гаврилов А. И. Компенсация погрешностей интегрированной навигационной системы с использованием искусственных нейронных сетей. Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение, 2020, № 2, с. 4–26.

8. Аль Битар Н., Гаврилов А. И. Технологии интеллектуальных вычислений в задачах повышения точности интегрированных навигационных систем. Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение, 2019, № 1, с. 62–89. DOI: 10.18698/0236-3933-2019-1-62-89

9. Эйкхофф Питер. Основы идентификации систем управления. М. Издательство «Мир». 1975, с. 7.

10.Крылов А. А., Кузнецов П. С. Устранение смещения нуля МЭМС-гироскопов при различной температурной динамике // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2019. № 2. С. 34–39. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2019-2-34-39. Доступ 23.09.2022

11.Технологические подходы к устранению смещения нуля МЭМС гироскопов в составе гироинерциального блока. Крылов А. А., Корниюк Д. В. Труды МАИ. 2018. № 103. https://trudymai.ru/upload/iblock/783/Krylov_Korniyuk_rus.pdf. Доступ 23.09.2022

12.Крылов А. А. Уменьшение смещения нуля МЭМС-датчиков при температурном гистерезисе. Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2021;(2):48-56. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-2-48-56. Доступ 23.09.2022

Д.А. Вольф

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ КОЛЛЕКТОРНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, Москва, runsolar@mail.ru

Аннотация

В статье рассматривается групповое управление коллекторными двигателями, подключенных к различным типам имеющихся на рынке драйверов. Предлагается вариант электрического включения двигателей при условии, что микроконтроллер осуществляет управление гетерогенной киберфизической средой, представляющей собой связку двигателей и драйверов с различными принципами управления. Формулируется задача группового управления двигателями при заданных условиях. Предлагается программная библиотека, упрощающая реализацию алгоритмов управления моторизированными и робототехническими устройствами с помощью высокоуровневого пользовательского интерфейса программирования для группового управления коллекторными двигателями.

Ключевые слова

Двигатель постоянного тока, драйвер двигателя, микроконтроллер, принцип управления драйвером, групповое управление, пользовательский интерфейс программирования.

D.A. Wolf

SOFTWARE IMPLEMENTATION FOR GROUP CONTROL OF MANIFOLD MOTORS

V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, runsolar@mail.ru

Annotation

The article deals with the group control of collector motors connected to various types of drivers available on the market. A variant of the electrical switching on of motors is proposed, provided that the microcontroller controls a heterogeneous cyber-physical environment, which is a combination of motors and drivers with different control principles. A software library is proposed that simplifies the implementation of control algorithms for motorized and robotic devices using a high-level programming user interface for group control of manifold motors.

Key words

DC motor, motor driver, microcontroller, driver control principle, group control, programming user interface.

В настоящее время рынок электронных модулей управления двигателями постоянного тока (драйверы двигателей) очень обширен. Для сборки колесных и гусеничных роботов могут применяться различные типы драйверов. Наиболее доступны такие драйверы как: L298N, TB6612 (SunFounder), MX1508. Каждый драйвер двигателей представляет собой силовой модуль управления моторами постоянного тока для микроконтроллеров семейств AVR, STM32 т.д.

Существуют различные программные библиотеки, упрощающие работу с драйверами двигателей. Например, библиотека — STM32F10x Standard Peripherals Library [1], созданная компанией STMicroelectronics. Данная библиотека содержит функции, структуры и макросы для облегчения работы с периферией микроконтроллеров семейства STM32F10x. Еще одна программная библиотека — Stepper [2]. Библиотека создана для работы с униполярными или биполярными шаговыми двигателя-

ми для проектов Arduino. Не менее известны две другие библиотеки для Arduino проектов — AFMotor и Freeduino Motor Shield (клон AFMotor) [3, 4], представляют собой модуль, создающий интерфейс программирования для работы с двигателями постоянного тока, сервомоторов и шаговых двигателей. Для микрокомпьютеров Raspberry хорошо известна библиотека — Adafruit Motorkit [5]. Вспомогательная библиотека для программирования моторов постоянного тока коллекторного типа, так и шаговых.

Тем не менее, ни одна из рассматриваемых библиотек не поддерживает групповое управление двигателями.

Рассмотрим следующую задачу: на рисунке 1 приведена схема электрического включения трех типов драйверов двигателей к микроконтроллеру (МК). Такое электрическое включение различных типов драйверов, условно обозначим как — гетерогенная киберфизическая среда управления двигателями постоянного тока. В процессе управления средой появляется необходимость объединения двигателей в группы и дальнейшее управление ими на уже на уровне групп. Каждая группа отвечает за конкретный вид работы. В процессе работы, если появляется необходимость, двигатели могут быть перемещены из одной группы в другую.

Когда в проекте используются драйверы одного типа, то проблема отсутствует. Однако драйверы от разных производителей отличаются принципом внешнего электрического управления (имеют различную логику управления) [6]. Так, например, управление драйвером L298N осуществляется с помощью трех электрических выводов (табл. 1), для драйвера TB6612 (бренда SunFounder) необходимо использовать всего два (табл. 2), а драйвер MX1508 мультиплексирует 4 отдельных управляющих сигнала на два физических вывода (табл. 3).

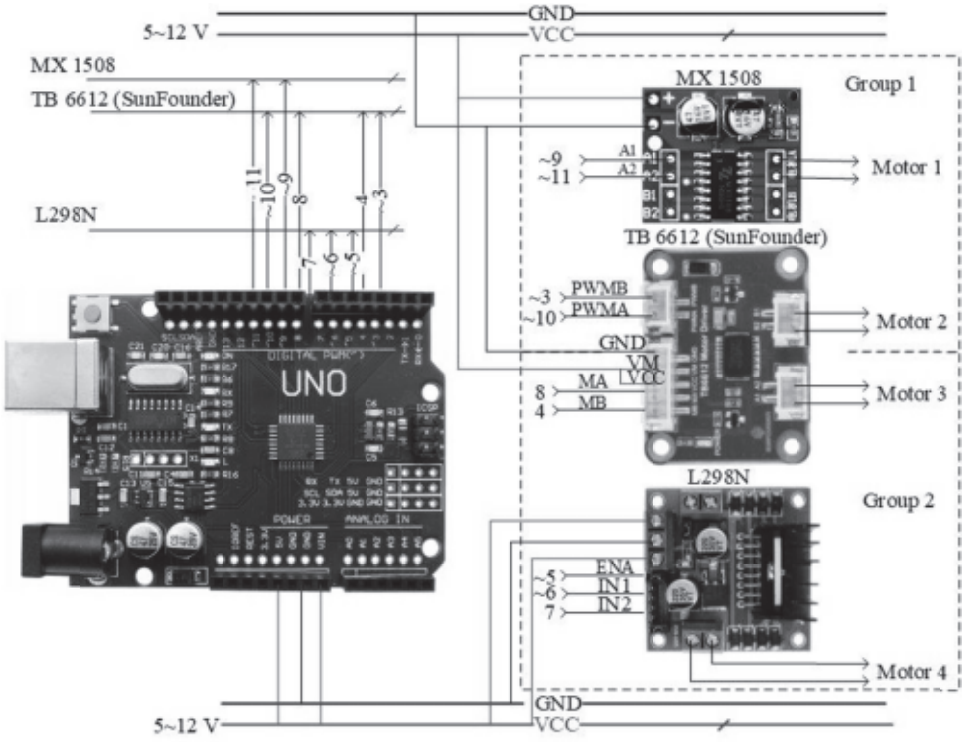


Рисунок 1 — Электрическая схема подключения драйверов L298N, TB6612 (SunFounder) и MX1508 к микроконтроллеру ATmega328p через плату Arduino UNO

Таблица 1 — Логика управления драйвером L298N

Вывод IN1	Вывод IN2	Вывод ENA	Результат
HIGH	LOW	PWM	Вперед
LOW	HIGH	PWM	Назад

Вывод IN1	Вывод IN2	Вывод ENA	Результат
LOW	LOW	LOW	Холостой
HIGH	HIGH	LOW	Тормоз

Таблица 2 — Логика управления драйвером TB6612 (SunFounder)

Вывод MA	Вывод PWMA	Результат
HIGH	PWM	Вперед
LOW	PWM	Назад
HIGH	LOW	Холостой
LOW	LOW	Тормоз

Таблица 3 — Логика управления драйвером MX1508

Вывод A1	Вывод A2	Результат
PWM	LOW	Вперед
LOW	PWM	Назад
LOW	LOW	Холостой
HIGH	HIGH	Тормоз

На схеме рисунка 1 и в таблицах 1-3 приведены требуемые логические состояния на выводах, перечисленных выше драйверов для управления коллекторными двигателями — Motor 1, Motor 2, Motor 3 и Motor 4:

1. для драйвера MX1508, выводы A1 и A2 — используются как для управления направлением, так и для управления скоростью вращения двигателя Motor 1 – посредством ШИМ (PWM);
2. для драйвера TB6612 (SunFounder), направления движения двигателей Motor 2 и Motor 3, задаются через выводы MA и MB, а скорость вращения задается через выводы PWMA и PWMB;
3. для драйвера L298N, через выводы IN1 и IN2 — осуществляется управление направлением вращения двигателя Motor 4, а вывод ENA — используются для управления скоростью двигателя посредством ШИМ.

Рассмотрим следующую ситуацию. Двигатели 2 и 3 управляются согласно специфики конкретного типа драйвера, к которому они подключены физически (в данном случае это TB6612), по какой-то причине появилась необходимость объединить двигатель 1 и двигателя 2 в одну группу (Group 1), а двигатель 3 с двигателем 4 (Group 2). По текущей схеме, двигатели 1 и 4 управляются другими драйверами и по совершенно другим электрическим принципам.

Очевидно, что на этапе разработки и дальнейшего поддержания программного обеспечения, в одном проекте приходиться учитывать логику управления каждого типа драйвера [7, 8]. Таким образом, программный код становится громоздким и сложно сопровождаемым.

Обобщая вышеизложенное сформулируем задачу создания и реализации методов и средств обеспечения группового управления двигателями в гетерогенной кибирфизической среде.

Групповое управление двигателями

Для решения поставленной задачи на базе ИПУ РАН, лабораторией «Киберфизических систем» была разработана специализированная программная библиотека, предоставляющая интерфейс программирования для группового управления двигателями коллекторного типа [9].

Несмотря на то, что библиотека написана на языке C++, не будем оперировать строгим синтаксисом языка, а только сосредоточимся на базовых идеях, которые были заложены перед этапом разработки.

Первая базовая идея программной библиотеки, заключается в представлении физической связки различных типов двигателей и типов драйверов в виде единой однородной программной абстракции:

$$\{m_1, m_2, \ldots, m_P\}_1, \{m_{P+1}, m2, \ldots, m_k\}_2, \ldots, \{m_{K+1}, m_{K+2}, \ldots, m_N\}_M.$$

где: m_i — объектно-ориентированная модель i-ого мотора в некотором множестве; M — правый индекс множества.

Моторы объединяются в множества, представляющие собой контейнеры: $\{\ldots\}_1, \{\ldots\}_2, \ldots, \{\ldots\}_M$.

Управление программными моделями, объектами моторов и контейнерами на базе их множеств выполняется менеджером. Через специально разработанный высокоуровневые интерфейс пользователя, менеджер организует и управляет группами двигателей.

На рисунке 2 показана связь программных и физических объектов, которые создаются библиотекой для группового управления двигателями, подключенных к различным драйверам. Каждый абстрактный мотор представляет собой независимый программный объект управления, который может быть объединен в группу, вне зависимости от того с каким драйвером он связан физически (группы 1 и 2 на рис. 2).

Ядром библиотеки являются два программных класса – Motor и MotoDriver. Программный класс Motor отвечает за создание программных абстракций физических моторов и реализует низкоуровневые функции управления драйверами двигателей. Класс MotoDriver осуществляет управление объектами класса Motor, предоставляя высокоуровневые методы программирования для группового управления двигателями [10, 11].

Рисунок 2 — Связь программных и физических объектов для группового управления четырьмя моторами постоянного тока, подключенных к разным типам драйверов двигателей

Пользовательский интерфейс связывания двигателя с его программной абстракцией выглядит следующим образом:

$$m_i = Motor(arg1, arg2, arg3, arg4),\ i=0,\ldots N,$$

где: $arg1$ — вывод ШИМ на МК; $arg2$ — первый управляющий вывод (pin на МК); $arg3$ — второй управляющий вывод; $arg4$ — тип дайвера двигателя.

В зависимости от типа драйвера, переменные $arg1$ и $arg3$ могут быть не обязательными (случай, когда $arg2 = arg3$). На данном этапе реализации программной библиотеки, перегрузка конструкторов и методов в классах не предусмотрена.

Далее моторы объединяются в множества:

$$Set_j = \{\{1, m_1\}, \{2, m_2\}, \ldots, \{P, m_p\}\}, j = 0,..M,$$

где: P — целочисленный уникальный идентификатор двигателя (порядковый номер мотора); M — количество экземпляров коллекций множеств двигателей.

Каждому из двигателей присваивается уникальный числовой идентификатор. Возможен минимальный вариант, состоящий из одного мотора и одного множества (коллекции). Таким образом, в зависимости от аппаратных возможностей МК создаются программные объекты класса: m_1, m_2, …, m_N и множества на основе их.

Затем создается сам объект класса группового управления моторами — MotoDriver:

$$obj_j = MotoDriver(Set_j),\ j = 0,..M.$$

Таким образом, предложенный подход к созданию единых абстракций обеспечивает дальнейшую масштабируемость пользовательских проектов.

В настоящее время разработаны основные базовые методы класса для управления моторами. Двигателями можно управлять индивидуально или в группе. Для управления отдельным двигателем (без учета групповых особенностей), разработаны два метода класса — Clockwise_Rotation, Counterclock_Rotation и Halt:

1. *obj $_j$.Clockwise_Rotation*([0:255], *i*);
2. *obj $_j$.Counterclockwise_Rotation*([0:255], *i*);
3. *obj $_j$.Halt*(*i*).

Метод Clockwise_Rotation заставляет ротор вращаться по часовой стрелке или Counterclock_Rotation (заставляет ротор вращаться против часовой стрелки). Оба метода вызываются с двумя одинаковыми параметрами. Первый параметр (*i*) — это рабочий цикл ШИМ (*min*:0, *max*:255). Второй параметр — это уникальный идентификатор мотора, который указывается при создании объекта коллекции моторов. Третий метод — Halt обеспечивает остановку мотора (в данном случае его торможение).

Второй базовой идеей, заложенной в библиотеке, является понятие группы, к которой принадлежит *i*-й мотор. После инициализации мотора, все двигатели по умолчанию относятся к нулевой группе. Любой из моторов можно перевести в другую группу [12, 13]. Перемещения осуществляются с помощью метода — MotorToGroup. Обращение к методу осуществляется следующим образом:

obj $_j$.*MotorToGroup(i, groupId),*

где *groupId* — уникальный идентификатор группы.

Метод может быть вызван сразу после инициализации объектов класса MotoDriver, так и в процессе пользовательского алгоритма управления моторами.

Групповое торможение двигателей осуществляется с помощью метода — Halt_Group:

obj $_j$. Halt_Group(groupId).

Структура библиотеки представляет собой классический вариант программы, написанной на языке C++ (рис. 3):

1. заголовочный файл motodriver.h, в котором объявляются основные классы и методы, подключается внешняя библиотека ArduinoSTL для использования классов map и string. При этом в заголовочном файле располагают только список полей и функций, без тел самих функций;
2. файла реализации motordriver.cpp, в котором содержаться реализации классов и методов;
3. заголовочный файл type-declaration.h, в котором содержатся справочные структуры, поддерживаемых типов драйверов библиотекой.

Методы классов программной библиотеки реализованы согласно стандарта C++ 17. Класс Motor содержит публичные поля motorID, groupId и shield_driver_type, которые соответствуют уникальному идентификатору мотора, группе к которой он принадлежит и типу драйвера к которому мотор подключен. Доступ к приватным полям класса (pwm_pin – ШИМ вывод, direction – направляющие выводы, dcycle – значение ШИМ), осуществляется с помощью методов get и set (геттеры и сеттеры). Все

методы класса MotoDriver являются публичными и реализуют групповое управление над коллекциями объектов класса Motor.

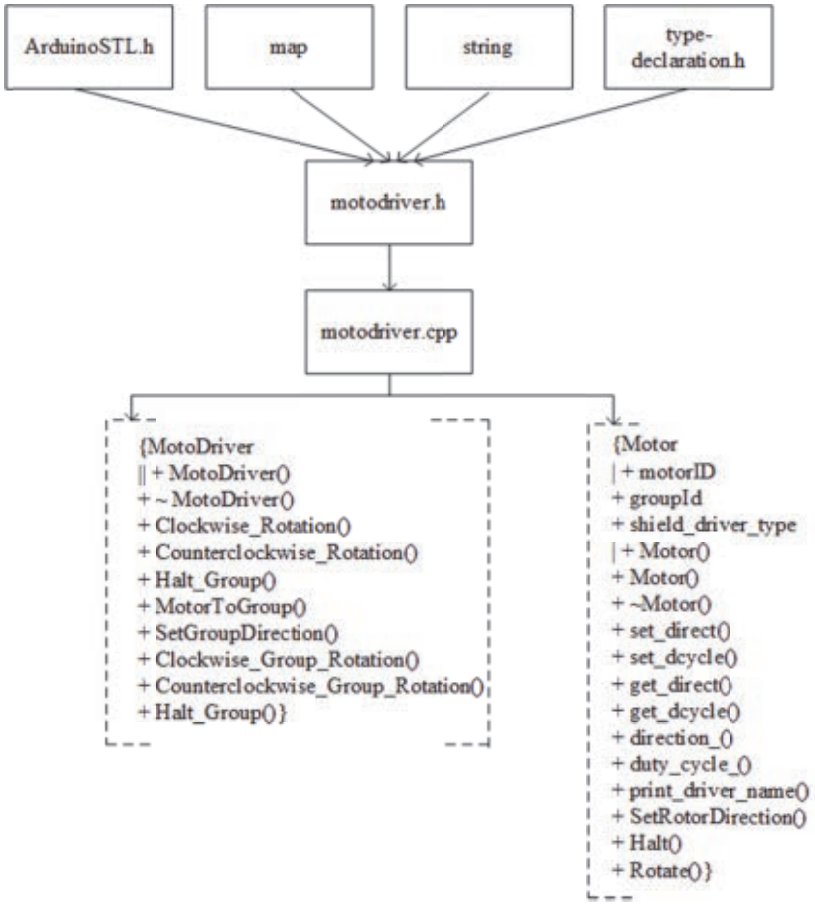


Рисунок 3 — Структура программной реализации библиотеки группового управления коллекторными двигателями

Предложенное решение по созданию системы управления двигателями в гетерогенной киберфизической среде включает в себя архитектуры системы и программную реализации в виде библиотеки. Реализация предназначена для упрощения разработки моторизированных и робототехнических устройств, позволяя разработчику абстрагироваться от аппаратной части проекта и сосредоточиться над реализацией алгоритмов управления роботов. Следует рассматривать библиотеку как вариант пользовательского интерфейса программирования, так как проект находится в процессе постоянного развития и нуждается в реализации новых идей.

Литература

1. Программная библиотека STM32F10x Standard Peripherals Library. [Электронный ресурс]. 2022. Дата обновления: 20.09.2022. URL: https://github.com/wajatimur/stm32f10x-stdperiph-lib

2. Программная библиотека Stepper Library for Arduino. [Электронный ресурс]. 2022. Дата обновления: 20.09.2022. URL: https://github.com/arduino-libraries/Stepper

3. Программная библиотека AFMotor. [Электронный ресурс]. 2022. Дата обновления: 20.09.2022. URL:

4. https://github.com/adafruit/Adafruit-Motor-Shield-library

5. Программная библиотека Freeduino Motor Shield. [Электронный ресурс]. 2022. Дата обновления: 20.09.2022. URL:

6. https://github.com/adafruit/Adafruit-Motor-Shield-library

7. Программная библиотека Adafruit Motorkit

8. [Электронный ресурс]. 2022. Дата обновления: 20.09.2022. URL:
9. https://docs.circuitpython.org/projects/motorkit/en/latest/
10. Хаменко В. Микросхемы драйверов реверсируемых двигателей постоянного тока фирмы Rohm. Компоненты и Технологии, № 48, 2005, С. 92-94.
11. Наунг Йе, Щагин А.В, Зо Мин Кхаинг. Режимы управления двигателям постоянного тока с замкнутым контуром в высокоточных системах позиционирования // «Известия вузов. Электроника» Т.23, № 3, июнь-июль 2018 С. 304-308
12. Щагин А. В., Чжо Ту. Система управления скоростью вращения вала асинхронного электродвигателя с использованием скалярного метода. Известия высших учебных заведений. Электроника, no. 2 (106), 2014, pp. 83-85.
13. Программная библиотека MotoDriver. [Электронный ресурс]. 2022. Дата обновления: 30.07.2022. URL: https://github.com/Runsolar/motodriver
14. Галин Р.Р., Камешева С.Б. Эффективное функционирование коллаборативной робототехнической системы в едином пространстве // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2021. № 1(99). С. 5-15.
15. Галин Р.Р., Мещеряков Р.В., Камешева С.Б. Distributing Tasks in Multi-agent Robotic System for Human-Robot Interaction Applications / Procceding of the International Conference on Interactive Collaborative Robotics (ICR 2020, Saint Petersburg). Saint Petersburg, Russia: Springer, 2020. Vol. 12336. С. 99-106.
16. Захарова А.А., Подвесовский А.Г., Коростелев Д.А., Кузин А.А. DecisionMaster: A multi-criteria decision support system with ability to combine different decision rules // SoftwareX. 2021. Volume 16, December 2021, 100814. С. https://doi.org/10.1016/j.softx.2021.100814.
17. Мамченко М.В., Романова М.А., Трефилов П.М. Defining the Critical Characteristics of Unmanned Vehicles in a Smart City / IFAC-PapersOnLine. Moscow: Elsevier, 2021. Vol.54, Issue 13 . С. 488-492.

Ю.Ф. Ивлев

ПРОБЛЕМЫ В СОЗДАНИИ ГЕККОНОПОДОБНЫХ РОБОТОВ

Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, yuvertb@sevin.ru

Аннотация

За последние два десятилетия предпринимались многочисленные попытки создать искусственные аналоги микрофибриллярного адгезионного покрытия гекконов для различных технических приложений. Искусственные гекконоподобные материалы и робототехнические устройства на их основе пока не могут сравниться по функциональности с биологическим прототипом. До сих пор не удалось реализовать способность к самоочистки, которая характерна для адгезива гекконов и без которой невозможно практическое применение искусственных гекконоподобных адгезионных материалов для захвата и перемещения предметов. Сколько-нибудь удовлетворительное объяснение эффекта самоочистки в настоящее время отсутствует. Кроме того, при проектирование гекконоподобных адгезивов принимается, что у самих гекконов преднагрузка, необходимая для достижения надежной адгезии, существенно ниже значений самой адгезии. Однако, имеются данные, свидетельствующие о том, что преднагрузка у гекконов в действительности может быть значительно выше конечной адгезии. Высокая преднагрузка предполагает наличие у гекконов механизмов, с помощью которых животные способны создавать преднагрузку локально, управляя контактными адгезионными площадками на пальцах при движении по наклонным и вертикальным поверхностям. Расшифровка и техническая реализация этих механизмов позволит использовать в робототехнических системах искусственные адгезионные материалы с высокими адгезионными способностями, применение которых было ранее затруднено из-за необходимости обеспечивать высокую преднагрузку.

Ключевые слова

Гекконы, сухие фибриллярные адгезивы, самоочистка адгезива, преднагрузка**.**

Yu.F. Ivlev

KEY ISSUES IN GECKO-INSPIRED ROBOTICS

A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, yuvertb@sevin.ru

Abstract

Over the past two decades, numerous attempts have been made to create artificial analogs of gecko microfibrillar adhesives with aim for using in various technical applications. Artificial gecko-inspired materials and robotic devices using them are not yet comparable in functionality with the biological prototype. So far, the self-cleaning ability, which is a key feature of the gecko adhesives and without which practical usage of artificial gecko-inspired adhesives for gripping and moving objects is impossible, has not been implemented yet. There is currently no satisfactory explanation for the self-cleaning effect. In addition, the design of gecko-inspired adhesives assumes that in geckos a preload required to achieve reliable adhesion is significantly lower than the values of the adhesion. However, there are evidences that the preload in geckos could actually be much higher than the final adhesion. The high preload suggests that geckos have mechanisms by which animals are able to create the preload locally by controlling the adhesive toe pads while climbing inclined and vertical walls. Revealing and technical implementation of these mechanisms will make it possible to use in robotics the artificial adhesive materials with high adhesive abilities, which application was previously difficult due to the need to provide high preload.

Key words

Geckos, dry fibrillar adhesives, adhesive self-cleaning, preload.

Гекконоподобные роботы – это механические устройства, которые способны или самостоятельно двигаться по наклонным и вертикальным поверхностям [1 – 6], или захватывать и перемещать предметы за счет использования адгезионных материалов [7 – 10], прототипом которых служат фибриллярные адгезионные структуры на подошвенной стороне пальцев гекконов. Взрывной интерес к изучению таких структур в начале века и многочисленные попытки воспроизвести их в технике порождены исследованиями, показавшими, что достаточно большая адгезия у гекконов (до 10 Н/см^2 или 10^5 Па [11]) может быть обеспечена только за счет сил Ван-дер-Ваальса [12]. Такие адгезионные материалы принято называть «сухими», поскольку их адгезия не требует дополнительных субстанций в области адгезионного контакта и определяется исключительно физико-химической природой взаимодействующих поверхностей и их пространственной структурой в микро- и нанометровом масштабе. Самодостаточность «сухих» адгезивов открывает широкие перспективы их использования в технике. Устройства, использующие «сухие» адгезивы, сохраняют работоспособность в условиях, когда другие способы силового контакта с поверхностью субстрата или перемещаемого объекта не могут быть реализованы, например в условиях разряженной атмосферы. Изготовление же адгезивов «сухого» типа из термостабильных и химически стойких материалов делает возможным их применение в качестве контактных элементов соответствующих механических устройств в широком диапазоне температур и в химически агрессивных средах. Эти механические устройства могут быть использованы в качестве элементов систем удаленного сбора информации и дистанционного управления технологическими процессами. Кроме того, отсутствие повреждений и следов адгезионного контакта на поверхности субстрата после его взаимодействия с микрофибриллярными «сухими» адгезивами позволяет использовать их для фиксации биосенсоров на поверхности тела человека [13, 14] и для крепления систем скрытого наблюдения а также в любых промышленных или бытовых конструкциях, где может быть востребовано крепление подобного типа [15].

Потенциальные преимущества указанных конструкций за последние два десятилетия стали основанием для нескольких тысяч исследований [16]. Тем не менее, до сих пор не удалось создать ни гекконоподобные адгезивы, ни, тем более, робототехнические устройства на их основе, которые были бы сравнимы по функциональности с биологическим прототипом.

Искусственные и естественные фибриллярные адгезивы «сухого» типа

Основные методы изготовления гекконоподобных фибриллярных адгезивов «сухого» типа были предложены уже к началу 2010-х годов [17, 18]. Для формирования фибрилл микро- и наноразмеров и разной структуры, в большей или меньшей степени, воспроизводящих естественный прототип, использовались следующие технологии: электронная литография; отливка (импринтинг) в формах, изготовленных с помощью электронной литографии и фотолитографии; литография методами атомно-силовой микроскопии; «вытягивание» фибрилл через поры в тонкой пластине; «вытягивание» фибрилл из полимера в электрическом поле; нанотрубки.

Искусственно созданные гекконоподобные адгезионные материалы практически по всем показателям, ключевым с точки зрения технических приложений, не только не уступают своим естественным прототипам, но в ряде случае превосходят их (см. табл. 1). Например, использование нанотрубок [19] позволило создать фибриллярный адгезив, который может обеспечить адгезию до 100 Н/см^2, что в десять раз больше, чем у естественного прототипа (при этом, однако, преднагрузка, необходимая для обеспечения такой адгезии, в десять раз выше самой адгезии).

Но одно свойство адгезива гекконов, которое является ключевым с точки зрения успешного внедрения гекконоподобных адгезионных материалов в техническую практику, до сих пор не удалось воспроизвести. Адгезив гекконов обладает уникальной способностью к самоочистке, которая предотвращает загрязнение адгезива и обеспечивает сохранение адгезионных свойств при перемещении животных по естественным поверхностям. Исходя из оценок ежедневного охотничьего маршрута гекконов в природе [20], длины шага животных и периода между линьками (когда вместе с эпидермисом

на всем теле обновляются и адгезионные структуры на подошвенной стороне пальцев), можно считать, что адгезив гекконов способен выдержать, по меньшей мере, 10^4 циклов «контакт-отрыв» без загрязнения и потери адгезионных свойств. Искусственные адгезивы при контакте с естественными поверхностями сохраняют свои адгезионные свойства в лучшем случае на протяжении нескольких десятков «шагов» [4] после чего требуют принудительной очистки или замены.

Таблица 1 — Основные свойства естественных и искусственных адгезивов «сухого» типа

Основные свойства адгезивов «сухого» типа	**Естественные**	**Искусственные**
Сила адгезии (Н/см^2)	до 10	от 1 до 100
Преднагрузка/Адгезия	0.1	от 0.1 до 10
Зависимость адгезии он направления приложения силы	есть	есть
Диапазон условий эксплуатации	узкий – ограничен пределами существования белковых (кератиновых) структур	широкий – определятся свойствами материала для изготовления адгезива
Устойчивость к загрязнения (большое число циклов «контакт-отрыв»)	есть	нет

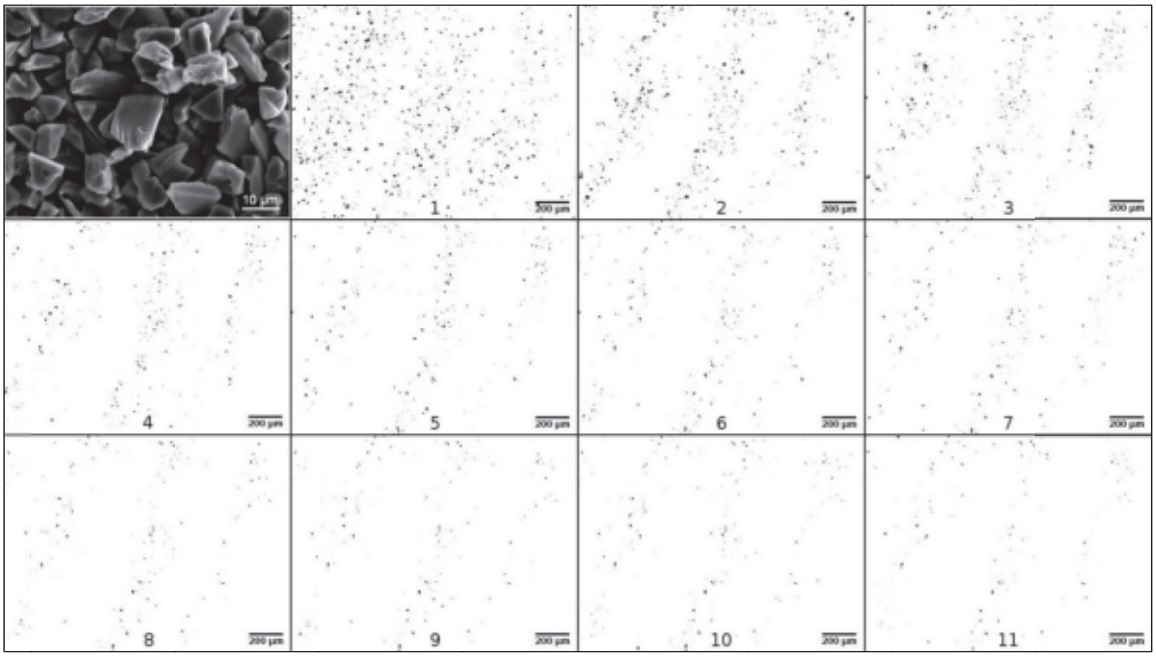


Рисунок 1 — Очищение от алмазной пыли адгезионной поверхности, взятой с подошвенной поверхности пальца геккона-токи (*Gekko gecko*)

Парадоксально, но из нескольких тысяч публикаций, посвященных в последние два десятилетия различным аспектам адгезии гекконов и способам ее реализации в технических устройствах, важнейший с технической точки зрения вопрос о механизмах пылезащиты и самоочистки рассматривался лишь в нескольких работах [16].

Часть гипотез, предложенных для объяснения устойчивости адгезива гекконов к загрязнению и/или его способности к самоочистке, сводятся к описанию условий, при которых в системе «адгезив-пылевая частица-опора» сила или энергия, необходимая для отрыва пылевой частицы от опорной поверхности, оказывается больше силы или энергии, необходимой для отрыва пылевой частицы от контактирующих с ней фибрилл. Основной недостаток этих гипотез и экспериментов, выполненных для

их проверки [21 – 24], состоит в том, что в них требуемый силовой и энергетический дисбаланс предполагается зависимым не только от геометрии фибриллярного покрытия, но и от размеров частиц загрязнения и от их формы, которая, как правило, считается сферической. Размеры и форма естественных загрязняющих частиц, очевидно, не отвечают таким условиям, что не мешает адгезионному покрытию гекконов освобождатся от пылевых частиц, форма которых далека от геометрически правильной (см. рис. 1)

В левом верхнем углу (см. рис. 1)– микрофотография алмазных гранул неправильной формы, которые были нанесены на адгезионную поверхность; после каждого контакта адгезива со стеклянной поверхностью на стекле остается все меньше алмазных гранул (черные точки); числа от 1 до 11 обозначают последовательность контактов; продолжительность каждого контакта адгезива со стеклом составляла несколько секунд, что на 1-2 порядка меньше продолжительности контакта при естественном движении животного [25].

Еще один подход к объяснению механизмов самоочистки фибриллярного адгезива предполагает, что энергия деформации, которая была запасена адгезионными фибриллами при контакте с опорой, при последующем отрыве от нее может быть использована для удаления (своего рода «стряхивания») загрязняющих частиц с поверхности адгезионного покрытия [26, 27]. Определенную роль в таком механизме отводят характерному выгибу (гиперэкстензии) пальцев, который наблюдается у многих гекконов во время отрыва лапы от субстрата [28]. Этой гипотезе, однако, противоречит хорошо выраженный гистерезис, который можно наблюдать при изгибе отдельных адгезионных фибрилл (рис. 2). Гистерезис обусловлен потерями энергии, которые могут достигать 98% от механической энергии, затраченной на деформацию фибрилл [29], что, очевидно, исключает ее вклад в очистку адгезива.

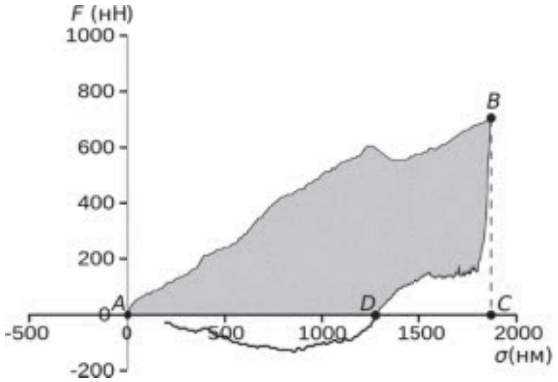


Рисунок 2 — Нагружение–разгрузка адгезионной фибриллы геккона-токи под действием кантилевера атомно-силового микроскопа; σ – смещение конца фибриллы, на который давит кантилевер с силой F; потери энергии при возвратной деформации фибриллы численно равны площади фигуры ABD, закрашенной серым цветом (по [29] с изменениями)

На рисунке 3 вверху – термограммы сделанные последовательно в начале шага левой задней лапой, термограммы пронумерованы римскими цифрами, на врезке справа – температурная шкала; внизу – изменение температуры в точке, на которую указывает белая стрелка на термограммах; римские цифры на графике обозначают температуру, измеренную на соответствующей термограмме; во время термографирования животное находилось на тонкой вертикальной пленке из полипропилена (полупрозрачного для теплового излучения), тепловизорная камера (SDS HotFind-L) регистрировала температуру с противоположной стороны пленки.

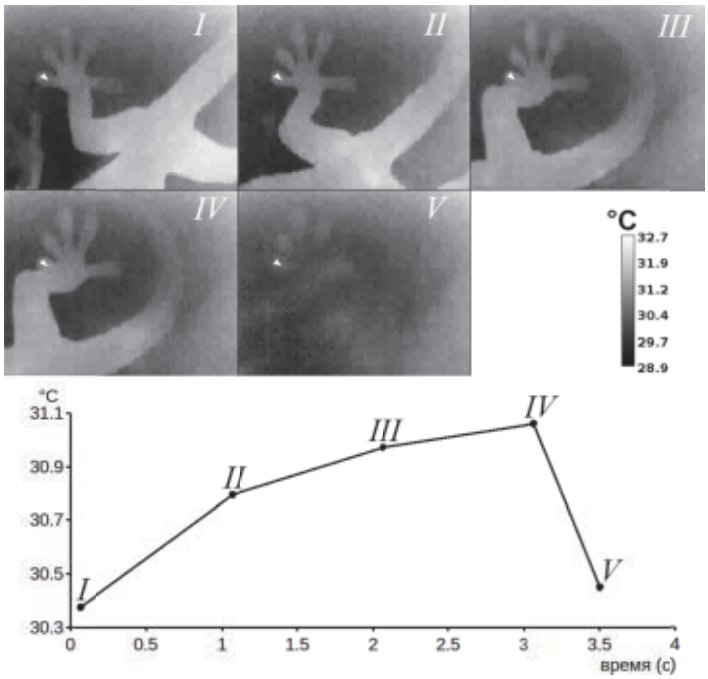


Рисунок 3 — Увеличение температуры в зоне контакта подошвенной поверхности пальца геккона-токи в процессе отделения лапы от опоры

Указанных выше ограничений отчасти лишен недавно предложенный подход к конструированию устойчивых к загрязнению гекконоподобных адгезивов [30]. Авторы этой работы исследовали искусственные, изготовленные на основе силикона адгезивы, загрязняемые сферическими стеклянными гранулами. В их модели форма «пыли» тоже имела значение, поскольку результат взаимодействия сферических гранул с субстратом и с адгезивом зависел от трения качения гранул в процессе сдвига адгезионной поверхности вдоль опоры перед отрывом. Тем не менее, общие выводы, сделанные авторами относительно возможных способов реализации пылеустойчивости и самоочистки фибриллярных адгезивов, не зависят от геометрии загрязняющих частиц. Предполагается, что самоочистка может быть улучшена без ухудшения адгезии посредством увеличении работы на отрыв всего покрытия при определенном уменьшении адгезионных свойств (поверхностной энергии) материала, из которого покрытие состоит, а также за счет увеличении его модуля упругости. Этот подход в отношении искусственных адгезионных материалов не применялся за рамками указанной работы, однако, есть основания считать, что он реализуется у самих гекконов. Работа по преодолению сил Ван-дер-Ваальса, которые действуют между двумя плотно соприкасающимися твердыми телами, составляет порядка 0.05 Дж/м2 [31], а при отрыве лап гекконов от опоры экспериментально определенные величины работы достигали 5 Дж/м2, то есть на два порядка больше [32]. С учетом продолжительности отделения лапы от опоры можно оценить интенсивность энергопотерь в этом процессе. Она может достигать 500 Вт/м2. Этого достаточно для заметного скачка температуры в области контакта (рис. 3). Однако, причины увеличения работы отрыва лап от субстрата до сих пор не вполне ясны, а возможные связи этого увеличения с механизмами самоочистки адгезива не рассматривались.

Управление контактным взаимодействием

Проблемы проектирования и создания гекконоподобных роботов не исчерпываются проблемами дизайна фибриллярных адгезивов «сухого» типа, воспроизводящих в той или иной степени структуру и физико-химические свойства адгезионного покрытия ящериц. Не менее важным являются механизмы организации адгезионного контакта на уровне всего устройства (в случае с гекконами – организма).

Считается, что адгезиву гекконов требуется относительно небольшая предварительная нагрузка, составляющая примерно порядка 10% от величины адгезии (см. табл. 1). Соответственно, низкая преднагрузка адгезива контактных площадок закладывается как параметр «по умолчанию» во всех разработ-

ках гекконоподобных устройств. Однако, хрестоматийное представление о низкой преднагрузке [33], не согласуется с рядом фактов, полученных при исследовании изолированных образцов их адгезива.

Неспособность в полной мере реализовать у искусственных гекконоподобных адгезивов функциональные характеристики их естественного прототипа логично приводят к мысли об использовании в технических конструкциях собственно адгезива гекконов. Однако, единичные попытки в этом направлении успехом не увенчались. В частности, манипулятор, в котором в качестве устройства захвата был использован образец адгезионного покрытия геккона-токи, смог захватывать и перемещать предметы (кремниевые диски) массой всего лишь около 1 мкг [8]. Площадь адгезива, использованного для захвата предметов, составляла при этом порядка 0.05 мм^2. С учетом того, что адгезия у гекконов может достигать 10 Н/см^2 [11], грузоподъемность такой площадки могла бы составить около 0.5 г, то есть, более чем на пять порядков больше достигнутой в работе [8] результата.

Значения адгезии (до 10 Н/см^2), полученные в экспериментах с живыми гекконами согласуются со значениями, которые получены в результате расчетов, учитывающих адгезионные свойства отдельных фибрилл [12] и их количество. Поэтому низкую грузоподъемность манипулятора с естественным адгезивом геккона в качестве устройства захвата можно объяснить тем, что в таком манипуляторе не были реализованы механизмы обеспечения нужного числа адгезионных контактов, которые реализованы у животных. Этот вывод, в свою очередь, ставит под сомнение представление о низкой преднагрузке, которая считается характерной для адгезива гекконов. Эти сомнения подкрепляются результатами проведенных автором испытаний изолированных образцов адгезива гекконов, в которых было измерено силовое взаимодействие образцов со стеклянной поверхностью в режиме «контакт-отрыв» (см. рис. 4). При испытании образцов адгезива площадью порядка нескольких десятых долей квадратного миллиметра сила адгезии при контакте со стеклянной поверхностью могла быть на порядок меньше силы преднагрузки.

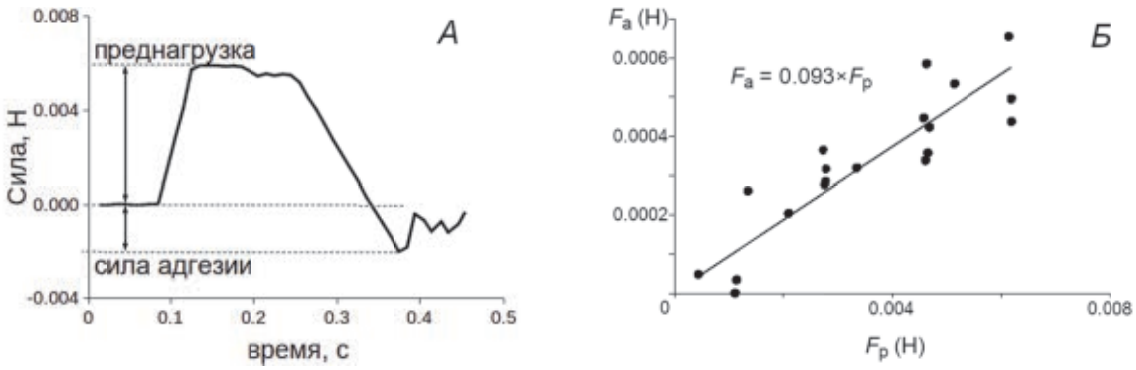


Рисунок 4 — Сила адгезии и преднагрузка при контакте образца адгезива геккона-токи со стеклянной поверхностью *А* – график силового взаимодействия адгезива с субстратом в процессе эксперимента, положительные значения силы соответствуют стадии предварительного прижатия образца к поверхности стекла, отрицательные значения силы соответствуют стадии отрыва образца от поверхности; *Б* – зависимость силы адгезии от преднагрузки, F_a – сила адгезии; F_p – сила преднагрузки

Предположения о реально высокой преднагрузке, необходимой для функционирования адгезива гекконов, и о наличии у животных механизмов управления конечностями, которые позволяют обеспечить такую преднагрузку в момент контакта с опорой, подтверждаются результатами измерений силового взаимодействия лап гекконов при свободном движении животных. Измерения были выполнены с использованием оптико-силового сенсора, работа которого основана на эффекте нарушения полного внутреннего отражения. Сенсор состоит из плоской прозрачной пластины (которая фактически является световодом) с подсветкой на боковых гранях. Контакт упругого тела с поверхностью пластины, приводит к утечке и рассеиванию света, который подсвечивает зону контакта. Яркость этой подсветки зависит (помимо оптических свойств контактной зоны) от давления, с которым упругое

тело действует на поверхность плоского световода и не зависит от формы контактирующего предмета [34, 35]. Чем выше такое давление, тем ярче зона контакта.

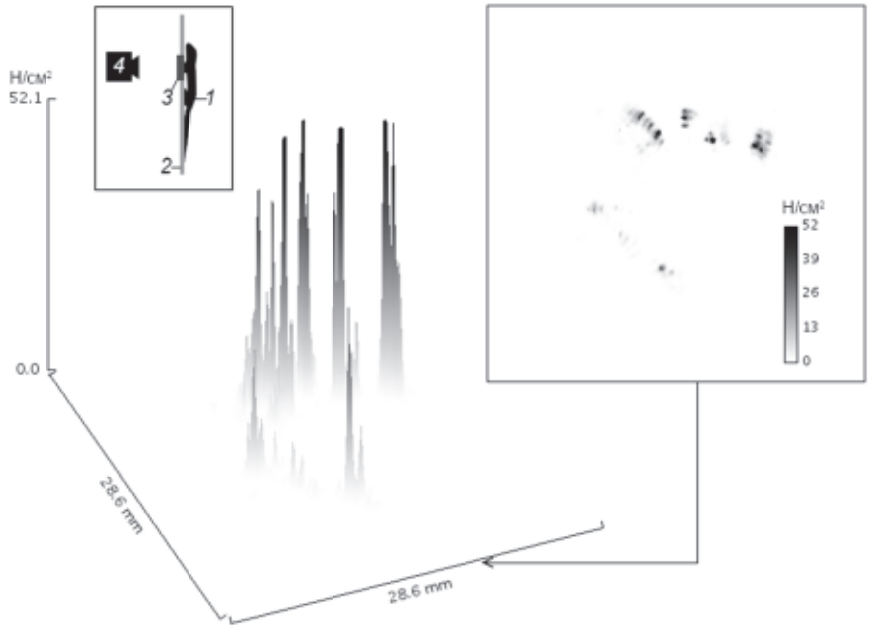


Рисунок 5 — Регистрация нагрузки, с которой подошвенная поверхность лап геккона-токи действует на опору при беге животного по вертикали

На рисунке 5 слева – изображение контактов между подошвенным адгезивом и поверхностью оптико-силового сенсора, на рисунке более темные участки соответствуют более ярким участкам на исходном изображении, цветовая шкала показывает связь между яркостью участков изображения и нагрузкой; справа – визуализации нагрузки на опору с помощью трехмерного графика; на врезке справа вверху – схема установки для измерения нагрузки на опору с помощью оптико-силового сенсора, *1* – геккон, бегущий по вертикальной стенке *2*, в которую вмонтирован сенсор *3*, изображение контактных зон на поверхности сенсора регистрируется видеокамерой *4* с противоположной от животного стороны

Предварительные калибровочные эксперименты показали, что зависимость между яркостью зоны контакта и давлением адгезива гекконов на поверхность сенсора можно считать неизменной для образцов адгезива, взятых от животных одного и того же вида, если условия визуализации контактной зоны остаются неизменными. Полученная зависимость между яркостью и удельной нагрузкой была использована для определения нагрузки на опору во время естественного бега гекконов-токи по вертикальной поверхности, в которую был встроен сенсор вышеуказанной конструкции. Когда животное наступало на поверхность сенсора, начиналась видеосъемка зоны контакта. Результаты видеорегистрации (см. рис. 5) показывают, что яркость зоны контакта адгезива с поверхностью сенсора соответствует удельной нагрузке, в несколько раз превышающей максимальное значение адгезии, ранее зарегистрированное у гекконов (10 Н/см^2 [11]). Данный факт говорит о том, что животные действительно способны создавать локальную преднагрузку на адгезионную поверхность, существенно превышающую значения конечной адгезии.

Посредством каких механизмов гекконы могут создавать высокую преднагрузку и как они управляют этим процессом, в настоящее время не ясно. Тем не менее, пример гекконов, показывает, что высокая преднагрузка адгезионного покрытия не является препятствием для его эффективного использование при решении технических задач, в которых изначально и предполагалось применять геконоподобные адгезионные материалы и робототехнические конструкции, а именно перемещение по наклонным поверхностям и захват предметов. Расшифровка и техническая реализация механизмов

создания преднагрузки для использования искусственных фибриллярных адгезивов позволит использовать такие материалы, как покрытие на основе углеродных нанотрубок [19], обеспечивающих адгезию на уровне 100 Н/см^2, но требующих при этом в десять раз большей преднагрузки (см. табл. 1). Применение таких адгезивов в перспективе позволит существенно увеличить размеры, массу, и грузоподъемность гекконоподобных механизмов.

Ключевой проблемой при создании «сухих» фибриллярных гекконоподобных адгезивов и их применении в робототехнических устройствах является до сих пор нерешенная проблема самоочистки адгезионного покрытия, которая, однако, решена у самих гекконов. Кроме того, в настоящее время при создании искусственных аналогов адгезива гекконов, принимается, что преднагрузка, необходимая для достижения надежного адгезионного контакта, у гекконов значительно меньше значений самой адгезии. Ряд экспериментальных данных, однако, показывает, что соотношении преднагрузки и адгезии у гекконов прямо противоположное, в силу чего для обеспечения надежного адгезионного контакта животные должны иметь механизмы управления контактными адгезионными поверхностями. На данный момент эти механизмы не известны, но их поиск, исследование и техническая реализация позволят в перспективе использовать адгезивы, с более высокими адгезионными способностями, что позволит увеличить размеры, массу, и грузоподъемность механизмов, в которых используются гекконоподобные адгезионные материалы.

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 121122200210-0.

Литература

1. Kim S. et al. Smooth Vertical Surface Climbing With Directional Adhesion // IEEE Transactions on Robotics. 2008. V. 24. P. 65–74.

2. Asbeck A. et al. Climbing rough vertical surfaces with hierarchical directional adhesion // 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation. , 2009. P. 2675–2680.

3. Krahn J. et al. A tailless timing belt climbing platform utilizing dry adhesives with mushroom caps // Smart Mat. Struct. 2011. V. 20. P. 115021.

4. Murphy M. P. et al. Waalbot II: Adhesion Recovery and Improved Performance of a Climbing Robot using Fibrillar Adhesives // Int. J. Robot. Res. 2011. V. 30. P. 118–133.

5. Breckwoldt W. A. et al. Walking inverted on ceilings with wheel-legs and micro-structured adhesives // 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). , 2015. P. 3308–3313.

6. Bian S. et al. A Novel Type of Wall-Climbing Robot with a Gear Transmission System Arm and Adhere Mechanism Inspired by Cicada and Gecko // Appl. Sci. 2021. V. 11. P. 4137.

7. Jeong H. E. et al. A nontransferring dry adhesive with hierarchical polymer nanohairs // Proc. Nat. Acad. Sci. 2009. V. 106. P. 5639–5644.

8. Jeong J. et al. Geckoprinting: assembly of microelectronic devices on unconventional surfaces by transfer printing with isolated gecko setal arrays // J. Roy. Soc. Interface. 2014. V. 11. P. 627.

9. Jiang H. et al. A robotic device using gecko-inspired adhesives can grasp and manipulate large objects in microgravity // Science Robotics. 2017. V. 2. P. eaan4545.

10. Modabberifar M., Spenko M. Development of a gecko-like robotic gripper using Scott–Russell mechanisms // Robotica. 2020. V. 38. P. 541–549.

11. Irschick D. J. et al. A comparative analysis of clinging ability among pad-bearing lizards // Biological Journal of the Linnean Society. 1996. V. 59. P. 21–35.

12. Autumn K. et al. Adhesive force of a single gecko foot-hair // Nature. 2000. V. 405. P. 681–685.

13. Kwak M. K., Jeong H.-E., Suh K. Y. Rational Design and Enhanced Biocompatibility of a Dry Adhesive Medical Skin Patch // Advanced Materials. 2011. V. 23. P. 3949–3953.

14. Basak S. Walking through the biomimetic bandages inspired by Gecko's feet // Bio-Design and Manufacturing. 2020. V. 3. P. 148–154.

15. Kalantari A. et al. Autonomous perching and take-off on vertical walls for a quadrotor micro air vehicle // 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). , 2015. P. 4669–4674.

16. Niewiarowski P. H., Stark A. Y., Dhinojwala A. A Bibliometric Analysis of Gecko Adhesion: A View of Its Origins and Current Directions // Bio-inspired Structured Adhesives: Biological Prototypes, Fabrication, Tribological Properties, Contact Mechanics, and Novel Concepts / eds. L. Heepe, L. Xue, S. N. Gorb. Cham: Springer, 2017. P. 1–20.

17. .Boesel L. F. et al. Gecko-Inspired Surfaces: A Path to Strong and Reversible Dry Adhesives // Advanced Materials. 2010. V. 22. P. 2125–2137.

18. Brodoceanu D. et al. Hierarchical bioinspired adhesive surfaces–a review // Bioinspiration & Biomimetics. 2016. V. 11. P. 51001.

19. Qu L. et al. Carbon Nanotube Arrays with Strong Shear Binding-On and Easy Normal Lifting-Off // Science. 2008. V. 322. P. 238–242.

20. Aowphol A. et al. Foraging ecology of the Tokay gecko, Gekko gecko in a residential area in Thailand // Amphibia-Reptilia. 2006. V. 27. P. 491–503.

21. Hansen W. R., Autumn K. Evidence for self-cleaning in gecko setae // PNAS. 2005. V. 102. P. 385–389.

22. Gillies A. G. et al. Dry Self-Cleaning Properties of Hard and Soft Fibrillar Structures // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2013. V. 5. P. 6081–6088.

23. Mengüç Y. et al. Staying sticky: contact self-cleaning of gecko-inspired adhesives // Journal of The Royal Society Interface. 2014. V. 11. P. 20131205.

24. Xu Q. et al. Robust self-cleaning and micromanipulation capabilities of gecko spatulae and their biomimics // Nature Communications. 2015. V. 6. P. 9949.

25. Autumn K. et al. Dynamics of geckos running vertically // Journal of Experimental Biology. 2006. V. 209. P. 260–272.

26. Hu S. et al. Dynamic self-cleaning in gecko setae via digital hyperextension // Journal of The Royal Society Interface. 2012. V. 9. P. 2781–2790.

27. An H. et al. Self-Cleaning Performance of the Micropillar-Arrayed Surface and Its Micro-Scale Mechanical Mechanism // Langmuir. 2021. V. 37. P. 10079–10088.

28. Russell A. P. Integrative Functional Morphology of the Gekkotan Adhesive System (Reptilia: Gekkota) // Integrative and Comparative Biology. 2002. V. 42. P. 1154–1163.

29. Ивлев Ю. Ф., Ильин А. И., Трофимов О. В. Вязкоупругие свойства адгезионных щетинок геккона токи (*Gekko gecko* L.) // Доклады Академии Наук, Россия. 2016. Т. 467. С. 492–495

30. Alizadehyazdi V., Simaite A., Spenko M. Evaluation of Material Properties for Practical Microstructured Adhesives: Low Dust Adhesion and High Shear Strength // ACS Appl Mater Interfaces. 2019. V. 11. P. 8654–8666.

31. Израелашвили Д.Н. Межмолекулярные и поверхностные силы. — М.: Научный мир, 2011. — 456 с.

32. Gravish N., Wilkinson M., Autumn K. Frictional and elastic energy in gecko adhesive detachment // Journal of The Royal Society Interface. 2008. V. 5. P. 339–348.

33. Autumn K., Puthoff J. Properties, Principles, and Parameters of the Gecko Adhesive System // Biological Adhesives / ed. A. M. Smith. Cham: Springer International Publishing, 2016. P. 245–280.

34. Sharp J. S., Poole S. F., Kleiman B. W. Optical Measurement of Contact Forces Using Frustrated Total Internal Reflection // Phys. Rev. Applied. 2018. V. 10. P. 34051.

35. Tompkins C. G., Sharp J. S. Dual optical force plate for time resolved measurement of forces and pressure distributions beneath shoes and feet // Scientific Reports. 2019. V. 9. P. 8886.

Д.А. Корниенко, Ю.С. Дубинов

РАЗРАБОТКА НОВОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПО ЗАБОЛОЧЕННОЙ И ОБВОДНЕННОЙ МЕСТНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИБРАЦИОННОЙ ТЯГИ

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М.Губкина, Москва, ankoroff57@gmail.com, dubinov.y@gubkin.ru

Аннотация

Освоение труднодоступных месторождений Сибири является одной из главных задач нефтегазовой отрасли России. Немаловажную роль в процессе освоения новых месторождений играет транспортировка нефтегазового оборудования непосредственно в место его эксплуатации. В наши дни, не существует прототипов техники использующей направленные вибрации для перемещений полезных грузов. Предложен новый способ перемещения и транспортировки оборудования в условиях заболоченной и обводненной местности с помощью вибраций. Для проверки данной гипотезы были изготовлены опытные образцы и проведены первичные испытания моделей. По результатам проведенных, на данный момент, испытаний была изучена динамика управляемых перемещений опытного образца. Выявлены и исправлены недочеты предыдущих опытных образцов. Проводятся дальнейшие исследования в области использования вибраций для перемещения.

Ключевые слова

Вибрации, управление вибрациями, вибрационный вездеход, направленные вибрации, вибрации для перемещений.

D.A. Kornienko, Y.S. Dubinov

INVENTING A NEW VEHICLE FOR MOVING OVER ROUGH TERRAIN USING VIBRATION TRACTION

RSU of Oil and Gas (NRU) named after I.M. Gubkin, Moscow, Russia, ankoroff57@gmail.com, dubinov.y@gubkin.ru

Abstract

The development of hard-to-reach deposits in Siberia is one of the main tasks of the Russian oil and gas industry. An important role in the development of new fields is played by the transportation of oil and gas equipment directly to the place of its operation. Nowadays, there are no prototypes of technology using directional vibrations to move payloads. A new method of moving and transporting equipment in swampy and flooded areas using vibrations is proposed. To test this hypothesis, prototypes were made and initial tests of models were carried out. According to the results of the tests carried out at the moment, the dynamics of controlled movements of the prototype was studied. The shortcomings of the previous prototypes have been identified and corrected. Further research is being conducted into the use of vibrations for movement.

Key words

Vibrations, vibration control, vibration all-terrain vehicle, directional vibrations, vibrations for movement.

Для проверки гипотезы о возможности использования направленных вибраций для перемещения полезных грузов была концептуально разработана экспериментальная модель транспортного средства.

Данная модель, в дальнейшем именуемая как «Вибротрак», должна иметь двигатель (в качестве двигателя будет использоваться вибрационный динамик), средство управления вектором движения модели и корпус, обеспечивающий «жесткую» посадку вибрационного динамика.

Для изготовления первого экспериментального образца в программе «Autodesk Fusion 360» был разработан корпус (рис. 1-2).

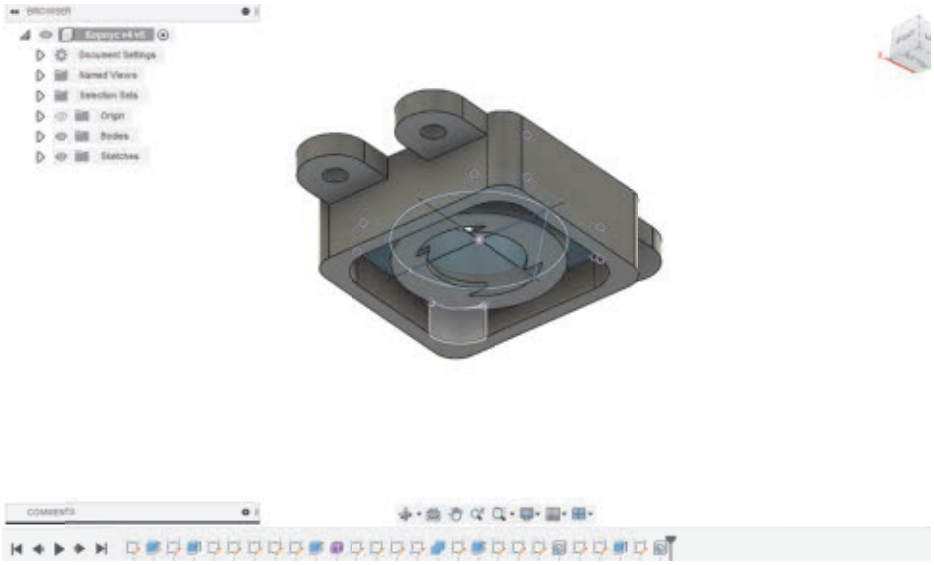


Рисунок 1 — Корпус Вибротрака

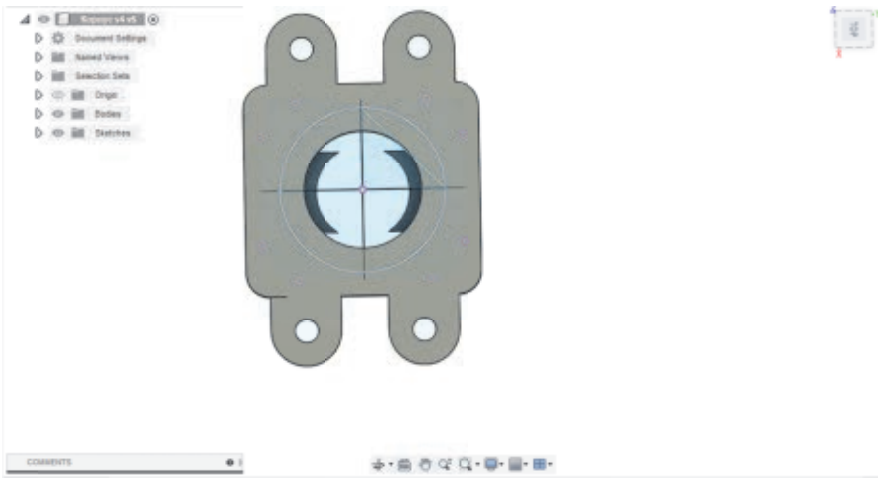


Рисунок 2 — Корпус Вибротрака (вид сверху)

Корпус, изображенный на рисунках 1 и 2, включает в себя: 4 крепления – для присоединения модели в общий блок, состоящий из нескольких моделей, отверстие для крепления вибрационного динамика (рис. 3), выемка для закрепления алюминиевой пластины (рис. 4).

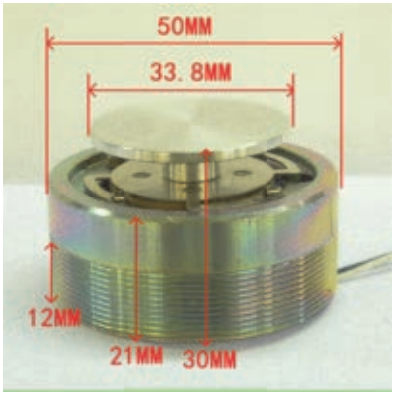


Рисунок 3 — Низкочастотный вибродинамик

Рисунок 4 — Алюминиевая пластина

Для изготовления модели была использована технология 3D печати. В качестве материала для печати был использован пластик марки PETG.

Фотография модели после печати представлена на рисунке 5.

Рисунок 5 — Модель Вибротрака после печати

Рисунок 6 — Сервопривод MicroServo

По завершению этапа печати была предпринята технология укрепления пластиковой модели путем точечной заливки эпоксидной смолы ЭД-20 в места концентрации внутренних напряжений модели.

В ходе проведения первичных испытаний было выявлено, что регулировать направление движения модели с помощью изменения частоты вибрации вибродинамика не представляется возможным. Модель была доработана таким образом, что пластина, являющаяся рабочей поверхностью вибрационного динамика, смогла изменять угол наклона по осям X и Y относительно остального корпуса модели. В качестве двигателей, обеспечивающих угол поворота пластины, были использованы 2 сервопривода MicroServo (рис. 6).

В качестве платы управления был использован микроконтроллер Arduino Uno с подключенным к нему Bluetooth модулем (рис. 7).

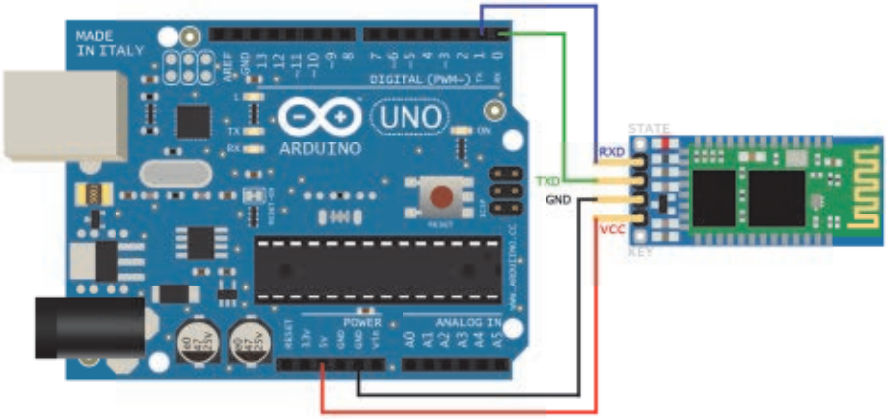


Рисунок 7 — Подключение Arduino Uno к Bluetooth модулю

Управление микроконтроллером и сервоприводами осуществляется с помощью телефона и созданной программы (рис. 8).

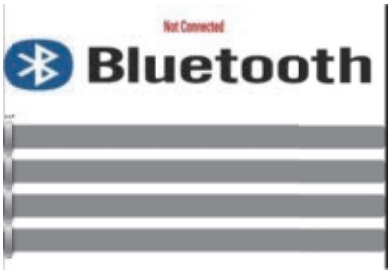


Рисунок 8 — Программа для управления сервоприводами с телефона.

Для регулировки частоты вибродинамика был использован осциллограф, подключенный к звуковому усилителю (рис. 9).

Рисунок 9 — Осциллограф, используемый для эксперимента

Итоговая схема модели представлена на рисунке 10.

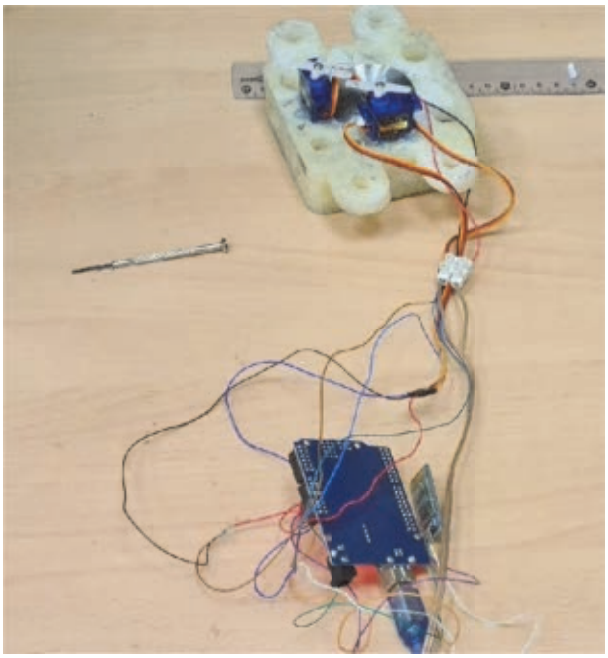


Рисунок 10 — Модель в собранном виде

В ходе испытаний было установлено, что вибрационный динамик на частотах от 10 до 50 Гц нагревается до температуры от 50 до 70 С. Для минимизации нагрева рабочей поверхности динамика были проделаны охлаждающие каналы (рис. 5). В дальнейшем планируется разработка активной системы охлаждения для увеличения продолжительности работы испытываемого образца.

Целью данного испытания является установление зависимости скорости перемещения опытного образца в зависимости от частоты вибрационного динамика. А также подбор оптимальной частоты для перемещения грузов разными способами.

Модель была собрана и установлена на ровную поверхность, с помощью мобильного приложения контроля сервоприводов были заданы максимальные значения угла поворота пластины для линейного перемещения. Измерение пройденного моделью пути осуществлялось с помощью линейки. На рисунке 11 представлен общий вид установки перед проведением испытаний.

С помощью осциллографа вибродинамику передавалась определенная частота в интервале от 10 до 50 Гц. Модель. Передвигаясь по столу определенный период времени, засекаемый с помощью секундомера, проходила путь, измеряемый линейкой. С каждой частотой было проделано 4 повторных испытания для определения среднего значения скорости модели. Ниже, на рисунке 12 изображен

график зависимости скорости от частоты колебаний вибродинамика, составленный из полученных данных.

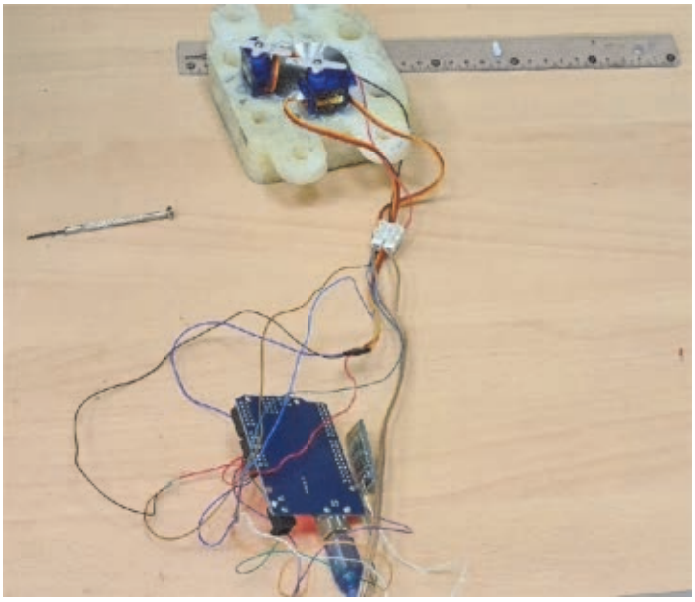


Рисунок 11 — Экспериментальная модель перед испытаниями

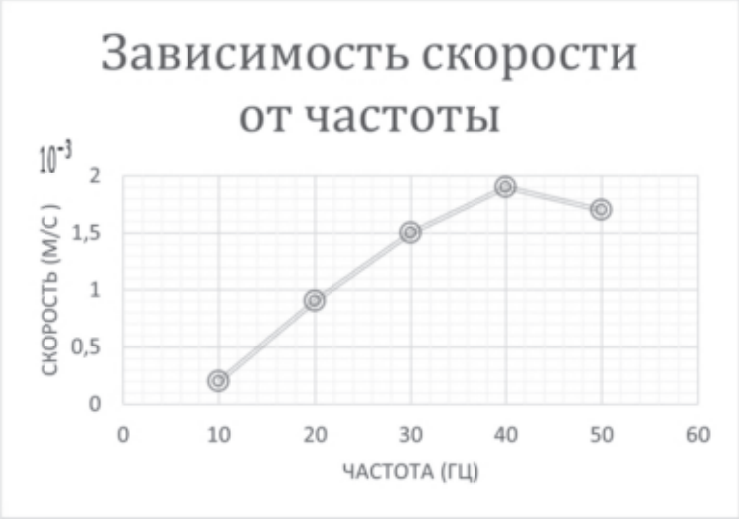


Рисунок 12 — График зависимости скорости модели от частоты колебаний вибродинамика

Анализируя график можно прийти к выводу, что наиболее оптимальной частотой для перемещения модели является частота равная 40Гц, при более высокой частоте колебаний вибрационного динамика экспериментальный образец двигается с меньшей скоростью.

Были проведены дополнительные исследования с целью изучения зависимости температуры рабочей поверхности динамика от частоты. Эксперимент заключался в измерении температуры поверхности динамика, работавшего с определенной частотой на протяжении 30 секунд. Измерения проводились с помощью тепловизора Fluke (рис. 13).

Рисунок 13 – Тепловизор «Fluke»

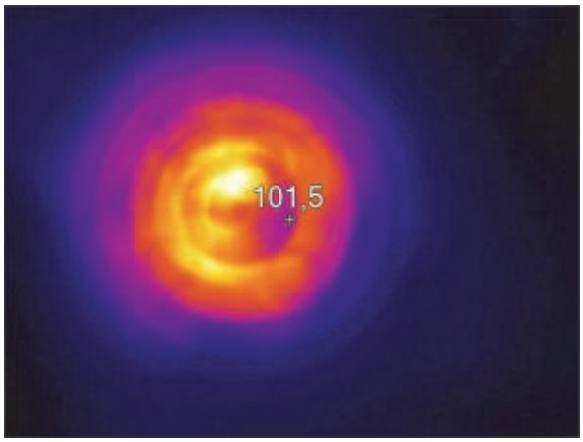


Рисунок 14 – Результат измерения в фаренгейтах

На рисунке 14 представлен промежуточный результат измерений, выводимый на экран тепловизора.

В ходе сопоставления температур с частотой колебаний, был получен график зависимости температуры от частоты (рис. 16).

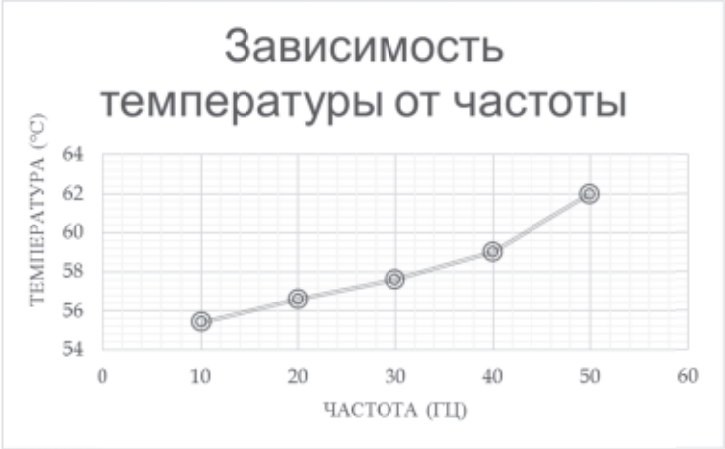


Рисунок 16 — График зависимости температуры рабочей поверхности вибродинамика от частоты его колебаний

Анализируя график можно прийти к выводу, что пропорционально увеличению частоты вибродинамика растет температура его поверхности. При работе вибродинамика на продолжительном временном промежутке необходима система охлаждения.

Для испытания грузоподъемности модели применялись 2 способа нагружения. В первом – груз мог свободно катиться, а во втором располагался так, чтобы присутствовало трение с поверхностью. (рис. 17).

Рисунок 17 — Испытание модели с грузом в 105 гр.

На рисунке 18 представлен график зависимости скорости перемещения образца от массы перемещаемого полезного груза.

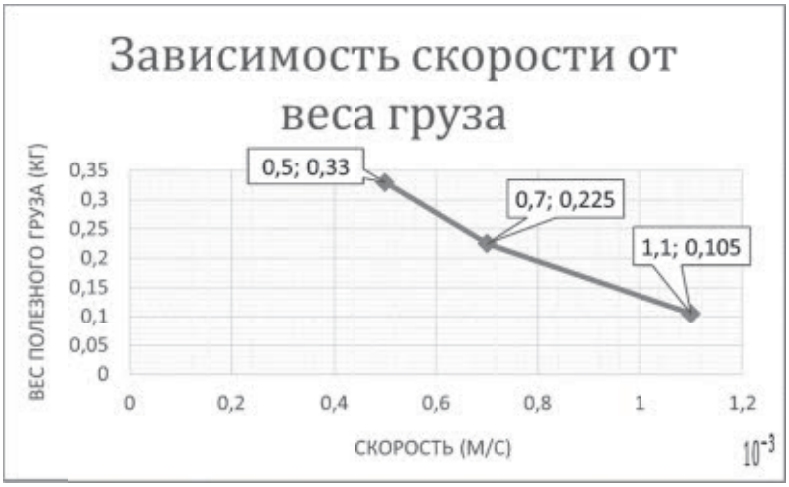


Рисунок 18 — Зависимость скорости модели от полезного груза

Анализируя полученные данные, делаем вывод, что частота в 40 Гц является наиболее оптимальной для перемещения не перекатывающихся грузов с помощью экспериментальной модели.

Проводя анализ проведенного эксперимента, приходим к выводу, что с помощью качения груза относительно поверхности, по которой движется модель, достигается большая грузоподъемность, чем в случае, когда на модель действует сила трения.

Проведенное исследование показало, что опытная модель вибрационного транспортного средства справляется со своей задачей перемещения небольших грузов. Полученные данные о нагреве корпуса вибродинамика, а также рабочей частоте, при которой достигается максимальная скорость модели, лягут в основу будущих экспериментов и исследований возможности перемещения грузов с помощью направленной вибрации.

Литература:

1. Клюев В.В. Неразрушающий контроль и диагностика: Машиностроение, 2003.
2. ГОСТ 24346-80 «Вибрация. Термины и определения». - Дата введения 1981-01-01.
3. Вибрации в технике: Справочник: в 6- ти т. — М.: Машиностроение. — Т. 1. Колебания линейных систем / Под ред. В.В. Болотина, 1999. — 504 с.

И.И. Нестеров, Н.В. Мальгин, А.Б. Кутман, А.А. Торопков

ВЫСОКОТОЧНЫЕ МЭМС ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ С ГИРОКОМПАСИРОВАНИЕМ

ООО «Гиролаб», г. Пермь, inbox@gyrolab.ru

Аннотация

Отталкиваясь от запросов рынка в малогабаритных высокоточных ИНС авиационного-космического, морского, наземного, в частности для применения в пилотажно-навигационных комплексах, в космических аппаратах, ракетной технике, инклинометрии, системах навигации различного рода беспилотных объектов (БПЛА, АНПА, беспилотный наземный транспорт), системах стабилизации компания «Гиролаб» тщательно отслеживала и тестировала все появляющиеся на рынке акселерометры и гироскопы МЭМС. По итогам тестирования нескольких десятков различных моделей были выбраны оптимальные по соотношению точность / цена и на их базе запущена линейка высокоточных ИНС МЭМС.

Ключевые слова

ИНС, инерциальные навигационные системы, МЭМС.

I.I. Nesterov, N.V. Malgin, A.B. Kutman, A.A. Toropkov

HIGH-PRECISION MEMS INERTIAL NAVIGATION SYSTEMS WITH GYROCOMPASSING

LLC «Gyrolab», Perm, Russia, inbox@gyrolab.ru

Abstract

Based on the market demands in small-sized high-precision INS - aviation, space, marine, ground, in particular for use in avionics flight navigation complexes, spacecrafts, rocket technology, inclinometry, navigation systems of various kinds of unmanned objects (UAV, autonomous uninhabited underwater vehicles, unmanned ground transport), stabilization systems — the company "Gyrolab" carefully tracked and tested all MEMS accelerometers and gyroscopes appearing on the market. Based on the results of testing several dozen different models, the optimal accuracy / price ratio was selected and a line of high-precision INS MEMS was launched in production.

Key words

INS, inertial navigation systems, MEMS.

Многолетний опыт разработки ИНС на базе МЭМС, волоконно-оптических и кольцевых лазерных гироскопов специалистов «Гиролаб» и усилия разработчиков по повышению точности микромеханических систем привели к появлению в линейке ИНС МЭМС со следующими точностями:

- Истинный курс (гирокомпасирование 5 мин.): 1°/cos(φ),
- Погрешность координат: 5 миль / 30 мин.,
- Потребляемая мощность: 1,6 Вт,
- Размеры: 89мм × 51мм × 23мм,
- Масса: 0,12 кг

Рисунок 1 — ИНС МЭМС OEM модели «ГЛ-ВГ110-XX»

Новая линейка представлена моделями «ГЛ-ВГ110-20», «ГЛ-ВГ110-40» и «ГЛ-ВГ110-60», которые реализованы в том же форм-факторе, что и уже зарекомендовавшая себя «младшая» ИНС МЭМС «ГЛ-ВГ110».

Технология единого интерфейса обеспечивает возможность переходить от системы к системе, лучшим образом выбирая массу, габарит, точность, энергопотребление и стоимость для каждой специфической задачи.

Микромеханические гироскопы нового поколения обеспечивают высокую устойчивость и точность при самом высоком ресурсе среди твердотельных датчиков.

Гирокомпасирование

ИНС МЭМС состоят из инерциально измерительного блока (ИИБ), включающего триаду гироскопов и массив акселерометров, точность которых обеспечивает определение направления на истинный север в режиме гирокомпасирования. Это преимущество позволяет обходиться без магнитного датчика для определения курса, и в условиях, когда датчик магнитного курса нельзя применить из-за помех.

Комплексирование

Системы имеют встроенный датчик давления, позволяющий уменьшить ошибки вертикальной скорости; встроенный трехосный магнитный датчик, предоставляющий дополнительную информацию пользователю о составляющих вектора магнитного поля и магнитный курс; ИНС МЭМС могут получать информацию от GNSS для расчета скомплексированных параметров навигации; могут получать информацию о скорости с датчика типа ЛАГ при использовании на море или пройденного пути (одометр) при использовании в наземной технике для расчета скомплексированных параметров навигации повышенной точности.

Современный интерфейс ETHERNET обеспечивает самую низкую задержку передаваемых пакетов при высокой производительности навигационных решений (1 мс).

Таблица 1 — Характеристики систем

	ГЛ-ВГ110-60	**ГЛ-ВГ110-40**	**ГЛ-ВГ110-20**
Технические характеристики, (1σ)			
Погрешность углов крена, тангажа:			
- в статическом положении	0.02º	0.025º	0.03º
- при любых условиях	0.10º	0.19	0.50
Погрешность определения угла курса	1º/cos(φ) 0.5º/cos(φ) (типичное)	2.3º/cos(φ) 1.6º/cos(φ) (типичное)	7.6º/cos(φ) 2.7º/cos(φ) (типичное)
Время определения угла курса	5 минут	5 минут	5 минут
Погрешность удержания угла курса	0.25º/ч	0.6º/ч	2.0º/ч

	ГЛ-ВГ110-60	**ГЛ-ВГ110-40**	**ГЛ-ВГ110-20**
Погрешность координат:			
- с достоверными данными СНС	В соответствии с характеристиками приемника СНС	В соответствии с характеристиками приемника СНС	В соответствии с характеристиками приемника СНС
- с потерей достоверных данных СНС	20 м / 3 мин, 150 м / 6 мин, 345 м / 8 мин, 1040 м / 12 мин, 9450 м / 30 мин	75 м / 3 мин, 410 м / 6 мин, 850 м / 8 мин, 2420 м /12 мин	140 м / 3 мин, 920 м / 6 мин, 2050 м / 8 мин, 6400 м / 12 мин
Погрешность скорости с достоверными данными СНС	0.15 м/с	0.15 м/с	0.2 м/с
Погрешнось измерения угловой скорости	0.003 °/с или 0.2 %	0.006 °/с или 0.2 %	0.01 °/с или 0.2 %
Погрешность измерения ускорений	0.5 mg или 0.2 %	0.5 mg или 0.2 %	0.5 mg или 0.2 %
Пределы:			
Угловой скорости	±300 °/с	±400 °/с	±400 °/с
Перегрузок	±20 g	±20 g	±20 g
Дополнительные свойства (встроенны в прибор):			
Высота барометрическая, диапазон	-0.5 … 10 км	-0.5 … 10 км	-0.5 … 10 км
Магнитный курс	$0.5°/\cos(i)^{1,2}$	$0.5°/\cos(i)^{1,2}$	$0.5°/\cos(i)^{1,2}$
Диапазон измерения магнитных индукций	±400 мкТл ±200 мкТл (линейный диапазон)	±400 мкТл ±200 мкТл (линейный диапазон)	±400 мкТл ±200 мкТл (линейный диапазон)
Наработка, ч	>15,000	>15,000	>15,000

Примечания: 1. При отсутствии внешних магнитных возмущений, 2. i – наклонение магнитного поля Земли в текущих координатах

Сегодняшний уровень точностей МЭМС гироскопов позволяет говорить, что характеристики МЭМС инерциальных навигационных систем на их основе не только достигли, но даже превзошли параметры волоконно-оптических гироскопов с разомкнутым контуром, при этом ИНС МЭМС обладают меньшими габаритами, весом и энергопотреблением.

М.Г. Щербаков

УНИВЕРСАЛЬНЫЕ ГАЗОАНАЛИЗАТОРЫ

АО «ГосНИИхиманалит», Санкт-Петербург, mail@himanalit.ru

Аннотация

В докладе представлены современные универсальные газоанализаторы, разработанные АО «ГосНИИхиманалит». Газоанализаторы предназначены для измерения массовой, предельно-допустимой концентрации в воздухе паров отравляющих веществ и аварийно химически опасных веществ, измерения радиационного фона, выдачи сигналов оповещения о пороговых и предельно допустимых концентраций и передачи в автоматизированном режиме параметров и концентраций с помощью постоянной радиосвязи и привязки к системе GPS. Разработанные универсальные газоанализаторы «Шмель» и «Оса» применяются на беспилотных летательных аппаратах типа «Phanton 4 Pro (Phanton 4)». Конструкция газоанализатора может быть изменена (увеличен размер газоанализатора и установлено большее количество датчиков для определения концентрации загрязняющих веществ) под любую модификацию беспилотных летательных аппаратов и для различных видов транспортных средств, в том числе робототехнических средств воздушного и наземного базирования.

Разработанные газоанализаторы прошли практическую проверку работоспособности при проведении опытно-исследовательских учений МЧС России в сентябре 2021 года. По результатам учений газоанализаторы получили положительную оценку своей работоспособности и были рекомендованы для принятия на снабжение подразделений аварийно-спасательных формирований МЧС России.

Ключевые слова

Газоанализатор, загрязняющие вещества, радиационная и химическая разведка, химический датчик, экологическая безопасность.

M.G. Shcherbakov

UNIVERSAL GAS ANALYZERS

JSC «GosNIIhimanalit», St. Petersburg, Russia, mail@himanalit.ru

Annotation

The report presents modern universal gas analyzers developed by JSC GosNIIhimanalit. Gas analyzers are designed to measure the mass, maximum permissible concentration in the air of toxic substances and chemically hazardous substances, measure the radiation background, issue warning signals about threshold and maximum permissible concentrations and transmit parameters and concentrations in automated mode using constant radio communication and linking to the GPS system. The developed universal gas analyzers «Bumblebee» and «Wasp» are used on unmanned aerial vehicles of the «Phanton 4 Pro (Phanton 4)» type. The design of the gas analyzer can be changed (the size of the gas analyzer has been increased and more sensors have been installed to determine the concentration of pollutants) for any modification of unmanned aerial vehicles and for various types of vehicles, including air- and ground-based robotic vehicles.

The developed gas analyzers passed a practical test of operability during the experimental research exercises of the Ministry of Emergency Situations of Russia in September 2021. According to the results of the exercises, the gas analyzers received a positive assessment of their performance and were recommended for acceptance for the supply of emergency rescue units of the Ministry of Emergency Situations of Russia.

Key words

Gas analyzer, pollutants, radiation and chemical exploration, chemical sensor, environmental safety.

В связи с постоянным ростом развития и совершенствования промышленности, одной из основных задач является обеспечение экологической безопасности опасных объектов производства. Увеличение производственных мощностей на предприятии и рост выпуска продукции приводят к увеличению вредных выбросов в природную среду. Сохраняются угрозы экологической безопасности несмотря на принимаемые меры по снижению уровней воздействия на окружающую среду химических, физических, биологических и иных факторов, по предотвращению чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, включая аварийные ситуации на опасных производственных объектах.

В связи с этим, развитие средств радиационной, химической, биологической (РХБ) разведки и химического контроля направлено на повышение оперативности и достоверности выявления РХБ обстановки путем создания дистанционных, автоматизированных и робототехнических средств РХБ разведки и химического контроля.

Основная часть

Контроль зараженности воздуха, местности и водоемов радиоактивными и опасными химическими веществами проводится в составе комплекса мероприятий гражданской обороны, при ликвидации последствий техногенных и природных аварий и катастроф, в процессе обеспечения промышленной безопасности и проведения экологического мониторинга в условиях интенсивного развития добывающих и перерабатывающих отраслей промышленности, транспорта и энергетики, утилизации отходов и т.п.

Задачи по радиационному и химическому контролю (РХК) решаются с использованием мобильных и стационарных лабораторий и автоматизированных систем контроля выбросов и стоков промышленных предприятий.

Одним из недостатков работы стационарных лабораторий является необходимость выезда в районы контроля специалистов для отбора проб и доставки их для анализа. Возможности мобильных лабораторий ограничены наличием дорожной сети в районах проведения РХК.

Одним из перспективных направлений развития системы технических средств радиационного и химического контроля является создание воздушных комплексов РХК на базе беспилотных летательных аппаратов или различных робототехнических средств наземного или воздушного базирования.

АО «ГосНИИхиманалит» проведены научные исследования по созданию универсальных газоанализаторов, которые могут быть индивидуальными (носимые), стационарными, устанавливаемые на малогабаритные беспилотные летательные аппараты и автомобильную технику.

Универсальные газоанализаторы предназначены для:

– обнаружения паров отравляющих веществ (ОВ);

– обнаружения пороговых и предельно допустимых концентраций паров аварийно-химических опасных веществ (АХОВ);

– измерения радиационного фона по эквивалентной дозе гамма-(рентгеновского) излучения, измерение накопленной во времени мощности эквивалента дозы гамма- (рентгеновского) излучения на местности;

– выдачи сигналов оповещения о пороговых и предельно допустимых концентраций ОВ и АХОВ, повышенном радиационном фоне (световая, звуковая, графическая система оповещения);

– передачи в автоматизированном режиме параметров и концентраций ОВ и АХОВ с помощью постоянной радиосвязи и привязки к системе GPS, графического отображения результатов на электронной карте и графической системе учёта результатов.

В качестве примера институтом разработаны газоанализаторы «Шмель» и «Оса», которые могут применяться на беспилотных летательных аппаратах (БПЛА) типа «Phanton 4 Pro (Phanton 4)».

Газоанализатор «Шмель» предназначен для:

– измерения массовой, предельно-допустимой концентрации в воздухе паров ОВ и АХОВ;

– измерения мощности амбиентного эквивалента дозы (МЭД) гамма- и рентгеновского излучений;

– измерения амбиентного эквивалента дозы (ЭД) фотонного излучения.

Внешний вид газоанализатора «Шмель» приведен на рисунке 1.

Газоанализатор обеспечивает:

1) Измерение в непрерывном режиме концентраций ОВ и АХОВ в воздухе и их индивидуальную или групповую идентификацию.

Перечень анализируемых (целевых) веществ:

– модуль ОВ: зарин, зоман, Ви-Икс, иприт, люизит, хлорциан, фосген, циановодород, CS, CR, хлор и аммиак;

– сенсорные модули: диоксид азота, оксид азота, аммиак, сероводород, диоксид серы, фосген, фтороводород, хлор, хлороводород, циановодород, кислород, угарный и углекислые газы, метан (горючие газы);

2) Измерение МЭД и ЭД фотонного (рентгеновского и γ-излучения) излучения;

3) Индикацию о режиме работы, уровне заряда встроенной аккумуляторной батареи (, звуковую и световую сигнализацию в случае превышения заданных пороговых значений концентрации, МЭД и ЭД;

4) Связь с компьютером посредством радиомодема;

5) Отображение результатов химической и радиационной разведки на электронной карте.

Рисунок 1 — Внешний вид газоанализатора «Шмель», размещенный на БПЛА типа «Phanton 4»

Газоанализатор состоит из двух блоков: блок управления и блок сенсорных модулей. Блоки газоанализатора (рис. 2) выполнены в сборных корпусах-кожухах обтекаемой формы. Корпус блока состоит из основания – несущего элемента конструкции с выполненными на его поверхности направляющими для посадочных шасси БПЛА, внешней крышки обтекаемой формы под которой расположена основная электроника блока и внутренней крышки, защищающей чувствительные элементы (сенсоры) блока от механических повреждений и обеспечивающей поток атмосферного воздуха через газовые сенсоры при вынужденной конвекции, вызванной вращением лопастей БПЛА.

На нижних поверхностях блоков расположены светодиодные индикаторы красного и зеленого света – служащих для индикации о состоянии газоанализатора.

На внутренней поверхности блока управления расположены:

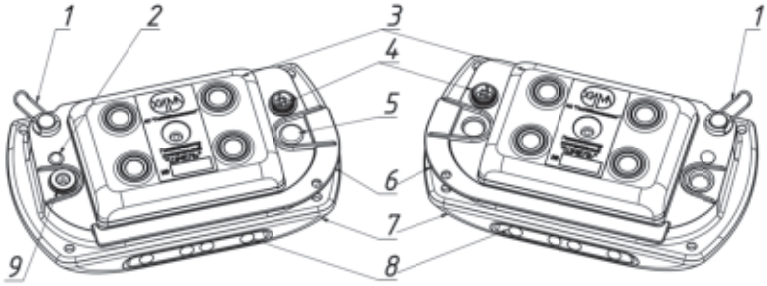
– кнопка для включения/выключения газоанализатора;

– разъем для подключения зарядного устройства;

– разъем для подключения блока сенсорных модулей;

– светодиодный индикатор для индикации зарядки аккумуляторной батареи;

– фиксатор для крепления блока на посадочной шасси БПЛА.



1 – фиксатор; 2 – индикатор зарядки АКБ; 3 – крышка внутренняя; 4 – разъем для подключения боков; 5 – кнопка; 6 – направляющая; 7 – крышка внешняя; 8 – светодиодные индикаторы; 9 – разъем для подключения зарядного устройства

Рисунок 2 — Блоки газоанализатора

На внутренней поверхности блока сенсорных модулей расположен разъем для подключения к блоку управления и фиксатор для крепления на посадочной шасси БПЛА. Блок управления имеет встроенные радиомодем и модуль геолокации. Жгут соединительный служит для подключения блока сенсорных модулей к блоку управления.

В газоанализаторе установлено 6-8 химических датчиков для определения концентрации загрязняющих веществ, а также для измерения радиационного фона по эквивалентной дозе гамма-(рентгеновского) излучения и измерение накопленной во времени мощности эквивалента дозы гамма-(рентгеновского) излучения на местности.

Основные технические характеристики газоанализатора «Шмель» приведены в таблице 1.

Таблица 1 — Основные технические характеристики газоанализатора «Шмель»

№ п/п	Основные технические характеристики	Значение
1	Время выхода газоанализатора на рабочий режим	не более 5 минут
2	Время непрерывной работы газоанализатора	не менее 60 минут
3	Быстродействие	5 - 40 с
4	Диапазон измерения ЭД	от 1,0 мкЗв до 15 Зв
5	Диапазон измерения МЭД	от 0,1 мкЗв/ч до 10 Зв/ч
6	Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерения ЭД и МЭД	не более ± 20%
7	Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерения концентрации ОВ и АХОВ сенсорными модулями	не более ± 25%
8	*Условия эксплуатации*:	
	Температура	От минус 10 до плюс 50 °С
	Относительная влажность (при 25 °С)	От 20 до 90%
	Атмосферное давление	От 730 до 790 мм. рт. ст.
9	*Массо-габаритные параметры*	
	Линейные размеры блока управления	162×90×60 мм
	Линейные размеры блока датчика	
	Масса	Не более 560 г

Конструкция газоанализатора может быть изменена (увеличен размер газоанализатора и установлено большее количество датчиков для определения концентрации загрязняющих веществ) под лю-

бую модификацию беспилотных летательных аппаратов и для различных видов транспортных средств, в том числе робототехнических средств воздушного и наземного базирования.

Газоанализатор «Оса» предназначен для:

– измерения массовой концентрации паров вредных веществ в атмосферном воздухе;

– обнаружения пороговых и предельно допустимых концентраций паров вредных веществ;

– измерение концентрации паров воздуха с использованием индикаторных трубок;

– отбор проб воздуха в пробоотборные мешки с последующим анализом в химической лаборатории;

– передачи в автоматизированном режиме параметров и концентраций АХОВ с помощью постоянной радиосвязи и привязки к системе GPS, графического отображения результатов на электронной карте и графической системе учёта результатов.

Внешний вид газоанализатора «Оса» приведен на рисунке 3.

а) б) в)

Рисунок 3 – Внешний вид газоанализатора «Оса», размещенный на БПЛА типа «Phanton 4 Pro»:
а) Газоанализатор «Оса» с химическими датчиками; б) Газоанализатор «Оса» с индикаторной трубкой; в) Отбор проб воздуха в пробоотборные мешки

В газоанализаторе устанавливается от 6 до 8 химических датчиков для определения концентрации паров вредных веществ. Газоанализаторы могут комплектоваться датчиками для определения более 80 опасных веществ по требованию Заказчика.

Принцип работы газоанализатора заключается в принудительной подаче загрязненного воздуха с помощью установленного насоса на химические датчики для определения концентрации с последующей передачей информации.

Устройство для газоанализатора «Оса», установленное на БПЛА

Устройство предназначено для:

– отбора проб воздуха в полете или стационарном расположение на местности в пробоотборные мешки (см. рис 3в) с последующим анализом в химической лаборатории;

– отбор проб воздуха с использованием сорбционных трубок с последующим анализом в химической лаборатории;

– измерение концентрации паров воздуха с использованием индикаторных трубок (см. рис. 3б).

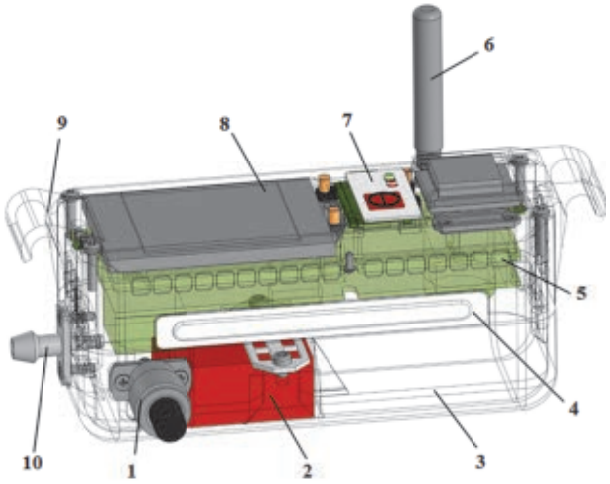
Внешний вид устройства для газоанализатора «Оса» приведено на рисунке 4.

Отбор проб осуществляется за счет принудительного прокачивания воздуха через входной патрубок (1) (см. рис. 4) устройства в пробоотборный мешок дистанционным включением насоса (2) (см. рис. 4) оператором с земли по системе ГЛОНАСС (GPS).

Отбор проб воздуха с использованием сорбционных трубок осуществляется на сорбент в трубке, установленной в входной патрубок (1) (см. рис. 4) устройства дистанционным включением насоса (2) (см. рис. 4) оператором с земли по системе ГЛОНАСС (GPS).

Измерение концентрации загрязненного воздуха с использованием индикаторных трубок осуществляется за счет принудительного прокачивания воздуха через индикаторную трубку, установ-

ленную в входной патрубок (1) (см. рис.4) устройства дистанционным включением насоса (2) (см. рис. 4) оператором с земли по системе ГЛОНАСС (GPS).



1 – входной патрубок; 2 – насос; 3 – корпус; 4 – сигнальные светодиоды; 5 – блок обработки информации; 6 – антенна; 7 – кнопка включения; 8 – аккумуляторная батарея; 9 – крышка; 10 – выходной патрубок

Рисунок 4 — Внешний вид устройства

Конструкция газоанализатора может быть изменена (увеличен размер газоанализатора и установлено большее количество датчиков для определения концентрации загрязняющих веществ) под любую модификацию беспилотных летательных аппаратов и для различных видов транспортных средств, в том числе робототехнических средств воздушного и наземного базирования.

Разработанные газоанализаторы прошли практическую проверку работоспособности при проведении опытно-исследовательских учений МЧС России по выполнению мероприятий по защите территорий, входящих в Арктическую зоны РФ, от чрезвычайных ситуаций в г. Дудинка Красноярского края в сентябре 2021 года. По результатам опытно-исследовательских учений газоанализаторы получили положительную оценку своей работоспособности и были рекомендованы для принятия на снабжение при комплектовании подразделений аварийно-спасательных формирований МЧС России.

Внедрение представленных газоанализаторов обеспечит двух-трехкратное повышение эффективности радиационной, химической разведки и химического контроля за счет следующих преимуществ:

– значительное расширение доступных для проведения РХК территорий и объектов (пересечённая местность, лесные массивы, горы, водные преграды);
– существенное увеличение скорости и производительности РХК;
– исключение риска для жизни и здоровья специалистов, проводящих РХК;
– обеспечение высокой оперативности поиска, обнаружения и принятия решений на ликвидацию источника загрязнения;
– значительное расширение возможностей по отбору проб воздуха;
– снижение затрат на оснащение техническими средствами РХК;
– сокращение эксплуатационных расходов;
– высокая оперативная готовность к выполнению задач (время подготовки к работе не превышает 15 минут);
– обеспечение возможности использования для РХК всего имеющегося парка квадрокоптеров и различных робототехнических средств.

О.В. Третьяков[1], П.Г. Тенишев[1], В.А. Туголуков[2]

СОЗДАНИЕ РОБОТИЗИРОВАННОГО СКОРОСТНОГО МОРЕХОДНОГО КАТЕРА В ПЛАНАРНОМ КОРПУСЕ

[1]ВМФ ВУНЦ «ВМА им. Н.Г. Кузнецова», Санкт-Петербург, vunc-vmf-3fil@mil.ru, tenishefff@yandex.ru; [2]ГЛИЦ МО РФ им. В.П. Чкалова, Феодосия, Республика Крым, variant_co@mail.ru

Аннотация

Первоочередной задачей проектанта роботизированного катера является разрешение проблемы штормовой безопасности катера путем рационального выбора формы корпуса и носовой оконечности катера. Проводится развертывание конструктивных решений катера в последовательности и порядке функционального проектирования планарных (пространственно плоских) треугольных конструкций корпуса. Масштабируемый корпус катера позволяет значительно снизить затраты, сроки и трудоемкость изготовления, сборки и монтажа конструкций наружной обшивки и внутреннего корпусного насыщения катера отсеками двигательной установки, топлива и боеприпасов, служебными помещениями, оборудованием и системами. Планарный корпус, благодаря треугольным конструкциям, обеспечивает высокую прочность, жесткость и относительную легкость катера. Катер, оснащенный специальными техническими системами и вооружением, благодаря высоким гидродинамическим качествам и повышенной скорости хода, обеспечивает решение возложенных на него задач.

Ключевые слова

Проектирование, роботизированный катер, планарный корпус, треугольные конструкции корпуса.

O.V. Tretiyakov[1], P.G. Tenishev[1], V.A. Tugolukov[2]

ROBOTIC FAST SEAKEEPING CRAFT IN PLANAR HULL DESIGN

[1]NTSC of the Naval Academy named N.G.Kuznetzov, St. Petersburg, Russia, vunc-vmf-3fil@mil.ru, tenishefff@yandex.ru; [2]SFTC of the MD RF named V.P. Chkalov, Feodosia, Crimea Republic, Russia, variant_co@mail.ru

Abstract

The first priority of the robotic craft designer is permission problems of storm safety of the craft by rational selection of the hull shape and the bow end of the craft. Deployment of design solutions of the craft is being carried out in sequence and order of functional design of planar (spatially flat) triangular structures of the hull. The scalable hull of the craft allows considerable reduction of costs, terms and labour intensity of manufacture, assembly and installation of structures of outer skin and inner hull saturation of craft with compartments of propulsion system, fuel and ammunition, service rooms, equipment and systems. The planar hull, thanks to its triangular structures, provides high strength, rigidity and relative lightness of the craft. The robotic craft, equipped with special technical systems and weapons, due to its high hydrodynamic qualities and increased speed, provides the solution of the tasks assigned to it.

Key words

Design, robotic craft, planar hull, triangular hull structures.

В создании все более скоростных и мореходных катеров идет постоянная конкурентная борьба по совершенствованию корпусов и использованию новых технологий.

Маркетинговые исследования подтверждают стремление военных операторов иметь преимущества перед конкурентами с более скоростными, более приспособленными, более маневренными, более экономичными по топливу, более устойчивыми в бурном море и более безопасными катерами, в том числе роботизированными (без экипажными), в интересах своих силовых структур и военно-морских сил (ВМС).

Наибольшую активность в области проведения исследований по созданию роботизированных катеров проявляют США, Турция, Китай и другие прибрежные государства [1-3]. Разработкой таких роботизированных катеров занимается довольно большой круг известных фирм, основной профиль деятельности которых заключается в создании беспилотных транспортных средств, роботизированных технических устройств и систем вооружения (рис. 1).

Роботизированный противолодочный катер ACTUV фирмы DARPA, США

Многофункциональный дистанционно-управляемый катер *ULAQ* фирмы *ARES Shipyard*, Турция

Боевой беспилотный катер JARI-USV корпорации China Shipbuilding Industry Corporation, Китай

Рисунок 1 — Создание роботизированных катеров за рубежом

Анализ информации о зарубежных роботизированных катерах позволяет сформировать обширный перечень задач, для выполнения которых предназначены катера, а именно [4]:

– несение дозорно-патрульной службы по охране мест стоянок кораблей, а также каботажных коммуникаций и районов нефтепромыслов, в том числе:

– патрулирования акваторий портов, баз и проливных зон, разведка, противодействие диверсионным и террористическим атакам на реках, в портах и прибрежных водах, борьба с подводными лодками и иными подводными боевыми средствами противника, включая необитаемые подводные аппараты, а также с боевыми пловцами и их носителями (при переходе морем, проводке корабля в узкостях, стоянке на рейде или в порту);

– поиск и уничтожение мин, прорыв минных и противодесантных заграждений в районе высадки морского десанта;

– тыловое обеспечение действий морской пехоты;

– вскрытие тактической обстановки в интересах ВМС в прибрежной морской зоне;

– химическая, биологическая, радиологическая разведка; мониторинг окружающей среды;

– поисково-спасательные операции; обеспечение скрытных минных постановок;
– обеспечение радиоэлектронной борьбы путем постановки активных и пассивных помех;
– имитация присутствия боевых сил флота в районе;
– выполнение функций выносного корпоста для применения огневых средств кораблей;
– обеспечение отработки кораблями задач по отражению нападения малозаметных морских быстроходных надводных целей.

В последние годы при проектировании большое внимание уделяется характеристикам, обеспечивающим длительное автономное функционирование роботизированных катеров. Имеются тенденции к увеличению водоизмещения роботизированных катеров, их автономности и радиуса действия. Планируется увеличение огневой мощи патрульных и противолодочных роботизированных катеров, предлагается наряду с пулеметными и артиллерийскими системами оружия устанавливать пусковые устройства управляемых ракет или для стрельбы малогабаритными противолодочными торпедами [5].

Зарубежные роботизированные катера имеют существенные конструктивные различия, в первую очередь в зависимости от своего целевого назначения, а также от предпочтений фирмы-разработчика (см. рис. 1).

Создатели роботизированных катеров заняты поисками такой компромиссной формы обводов, которая бы обеспечивала достижение высокой скорости хода при различном волнении и состоянии моря без ущерба обитаемости и безопасности для экипажа и груза, с минимальными энергетическими затратами, эксплуатационными расходами и строительной стоимостью самого корпуса катера.

Первоочередной задачей проектанта роботизированного катера является разрешение проблемы штормовой безопасности катера за счет снижения нагрузок от удара волн путем рационального выбора формы корпуса и носовой оконечности катера. Для предполагаемых районов эксплуатации катера – дальневосточного Тихого океана и северного морского пути Ледовитого океана – эта проблема осложняется необходимостью учета тяжелых условий эксплуатации катера – частых штормов, обледенения, плавания во льдах и других побочных явлений внешней среды функционирования.

При проектировании формы корпуса и носовой оконечности катера, кроме критериев ходкости на тихой воде, следует учитывать требования мореходности и прочности на штормовом волнении (умеренных амплитуд качки и гидродинамических нагрузок, предотвращения существенного слеминга и заливания палубы) и в ледовых условиях. Для проектирования формы корпуса и носовой оконечности катера на ударные нагрузки предлагается проектирование треугольной формы шпангоутов на нагрузки при слеминге. При этом функцией цели при проектировании носовых обводов ниже конструктивной ватерлинии является сопротивление воды движению катера. Ограничение по днищевому слемингу определяется минимальной осадкой носом, однако его не всегда можно выполнить. Снизить ударные нагрузки возможно путем уменьшения площади плоского участка днища в носу, однако это обычно противоречит условиям ходкости и вместимости. В связи с этим предлагается применить треугольно-гофрированное днище в носовой части и на всю длину планарного корпуса (рис. 2).

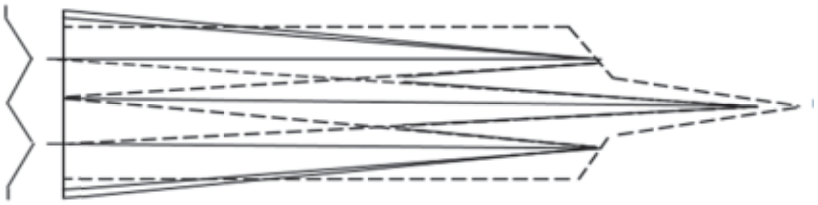


Рисунок 2 — Треугольно-гофрированное днище на всю длину корпуса

Через функциональные критерии и алгоритмы первоочередного расчета корпуса проводится развертывание конструктивных решений катера в последовательности и порядке функционального проектирования планарных (пространственно плоских) треугольных конструкций корпуса *triple-hull* («трипл-халл»).

Простая по проектированию, постройке и эксплуатации корпусная конструкция катера, состоящая из планарных конструкций [6] позволяет значительно снизить затраты, сроки и трудоемкость изготовления, сборки и монтажа корпусных конструкций наружной обшивки и внутреннего корпусного насыщения катера. При этом конструкция корпуса за счет своей масштабируемой геометрии – длины $\boldsymbol{L}$ = 20 м и ширины $\boldsymbol{B}$ = 5 м – определяет площадь палубы, вместимость и объемы отсеков двигательной установки, топлива и боеприпасов, оборудования и служебных помещений, технических систем и средств обслуживания в корпусе *triple-hull* (рис. 3).

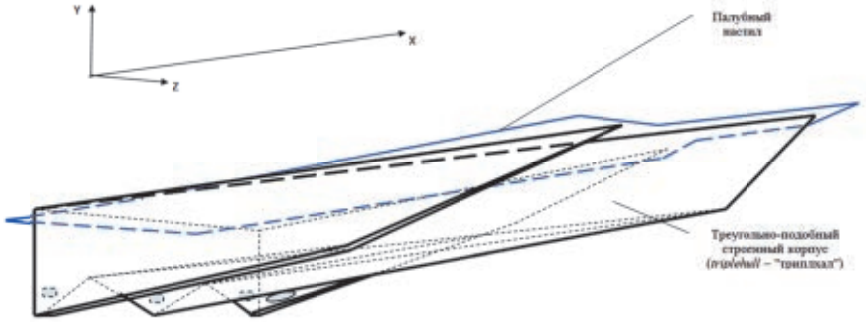


Рисунок 3 – Корпус *triple-hull* («трипл-халл») в изометрии

Высота борта $\boldsymbol{H}$ = 2 м и осадка $\boldsymbol{T}$ = 1 м определяются из соотношений параметров корпуса катера, которые в свою очередь обеспечивают остойчивость, быстроходность, непотопляемость, высокую ходкость и ледопроходимость катера.

Планарный корпус, благодаря треугольным конструкциям, обеспечивает высокую прочность, относительную легкость и конструктивную жесткость корпуса катера. Благодаря высоким гидродинамическим качествам крепкого треугольного корпуса и высокой скорости (до 65 узлов), обеспечиваемой двумя дизельными двигателями *MTU 8V2000M61* (*Motoren- und Turbinen- Union* (*MTU*) *Friedrichshafen GmbH,* Германия) [7] потребной суммарной мощностью 1200 кВт и двух водометных движителей (ВД) *FF340* [8] мощностью по 530 кВт, катер сравнительно небольшого водоизмещения (20 т) обеспечивает решение возложенных на него задач (рис. 4).

Для обеспечения решения возложенных задач катер оборудуется специальными техническимисистемами и средствами. В зависимости от поставленной боевой задачи катер может быть оснащен электрооптическим датчиком на верхней части надстройки, радаром с фазированной решеткой, гидролокатором, и вооружен установкой вертикального пуска на 2…4 ячейки, торпедным аппаратом, ракетной установкой, зенитно-ракетным комплексом и дистанционно-управляемым боевым модулем с двумя 30-мм автоматическими пушками.

Роботизированный скоростной мореходный катер в планарном корпусе должен иметь аппаратно-программный комплекс управления, позволяющий реализовать дистанционное и автоматическое управление катером, с сохранением ручного управления, по аналогии с предлагаемым АО НПП «АМЭ», Санкт-Петербург, аппаратно-программным комплексом управления [9]. Ручное управление реализуется непосредственно на борту катера штатными средствами. Дистанционное управление катером осуществляется с выносного пульта управления (монитор, штурвал, рычаг подачи газа). Автоматическое управление катером осуществляется путем назначения катеру маршрутов, задач и программ работы.

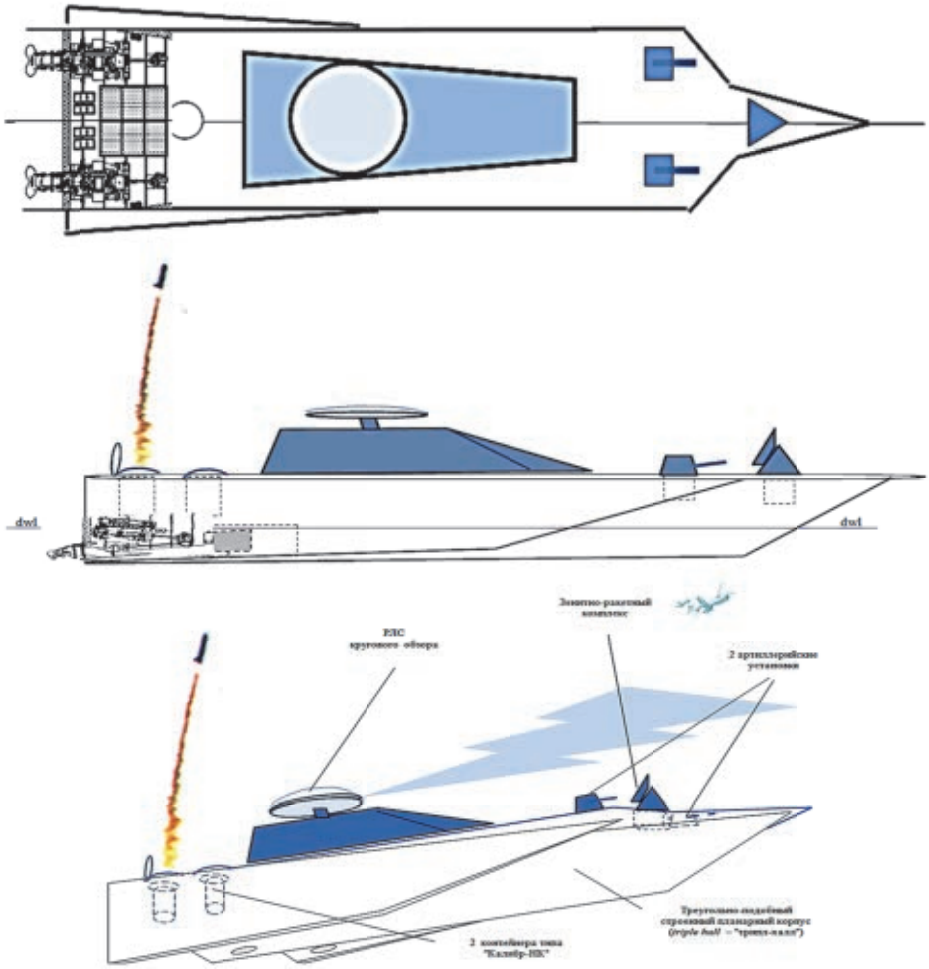


Рисунок 4 — Роботизированный скоростной мореходный катер в планарном корпусе

Литература

1. [Электронный ресурс] сайт. URL: http://weaponscollection.com/23/11110-bezekipazhnyy-protivolodochnyy-kater-actuv-rodom-iz-ssha.html (дата обращения: 15.04.2022).

2. [Электронный ресурс] сайт. URL: https://www.korabel.ru/news/comments/bezekipazhnyy_ boevoy _kater_dlya_chernogo_morya_i_ne_tolko_-_video.html (дата обращения: 15.04.2022).

3. [Электронный ресурс] сайт. URL: Китайский боевой беспилотный катер с ФАР и установкой вертикального пуска (дата обращения: 15.04.2022).

4. [Электронный ресурс] сайт. URL: https://naukarus.com/tendentsii-razvitiya-bezekipazhnyh-katerov (дата обращения: 16.04.2022).

5. [Электронный ресурс] сайт. URL: https://naukarus.com/osobennosti-razvitiya-zadachi-i-sostav-kompleksa-bezekipazhnyy-robotizirovannyy-kater (дата обращения: 16.04.2022).

6. Патент РФ на изобретение № 2770817 «Планарный корпус авианесущего и транспортно-десантного корабля и функциональный комплекс, реализуемый на его базе». Авторы: Третьяков О.В., Тенишев П.Г., Власов А.А., Коваль А.А., Жирин Д.В., Туголуков В.А.

7. [Электронный ресурс] сайт. URL: https://dieselgass.ru/wp-content/uploads/2019/12/2000-dgs.pdf (дата обращения: 08.07.2021).

8. [Электронный ресурс] сайт. URL: https://www.kongsberg.com/ru/maritime/about-us/news-and-media/our-stories/waterjets---40-years (дата обращения: 20.08.2021).

9. [Электронный ресурс] сайт. URL: https://hl.mailru.su/mcached?q=Катер%20безэкипажный%20%20боевой&c=23-1%3A677-1&r=8111229&qurl=http%3A%2F%2Fnppame.com%2Fnapravlenija-razrabotok%2Frobototehnika%2Fmnogofunkcionalnyj-kompleks-na-baze-bezjekipazhnogo-atera%2F&frm=webhsm (дата обращения: 17.04.2022).

Авс Ахмад, А.С. Ющенко

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОДВОДНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА С ВОЛНООБРАЗНЫМИ ДВИЖИТЕЛЯМИ

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, aws.ahmad318@gmail.com, arkadyus@mail.ru

Аннотация

Динамическая модель аппарата имеет решающее значение для проектирования системы управления автономным подводным аппаратом (АНПА). Данная работа посвящена изучению и анализу динамической модели подводного робота с волнообразными движителями, с целью определения гидростатической силы, действующая на робот, и гидродинамическич параметров, включая матрицу добавленной массы и матрицу демпфирования, с использованием теории полос (strip theory) и метода CFD SolidWorks. Для упрощения модели были приняты несколько предположений в том чесле: движение аппарата по крену не учитывается, нет связи между движением по глнбине и по курсу, боковые и вертикальные движения отделены от раскачивания и рыскания, эффектом нелинейного демпфирования пренебрегают, демпфирование можно приближенно считать линейным из-за малой скорости робота.

Ключевые слова

Волнообразное движение, добавленная масса, метацентрическая высота, восстанавливающая сила, гидродинамические эффекты, матрица демпфирования.

Aws Ahmad, A.S. Yuschenko

DYNAMIC MODEL OF AN UNDERWATER MOBILE ROBOT WITH UNDULATING PROPULSORS

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia, aws.ahmad318@gmail.com, yusch@bmstu.ru

Abstract

This article is devoted to the study and analysis of a dynamic model of an underwater robot with undulating propulsion fin. The purpose of the analysis is to determine the hydrostatic force parameters, and hydrodynamic parameters (added mass matrix and damping matrix). We used strip theory to determine added mass matrix and Computational fluid dynamics method (CFD) in Solidworks to determine damping matrix. To simplify the model, several assumptions are made: roll motions are not considered, there is no connection between diving and swimming forward, side, and vertical motions are separated from swaying and yaw, the high-frequency motion of the robot is not considered, the effect of nonlinear damping is neglected, and linear damping is considered due to low speed robot.

Key words

Undulating propulsion, added mass, metacentric height, restoring force, hydrodynamic effects, damping matrix.

В настоящее время большое внимание исследователей уделяется разработке и управлению подводных роботов для изучения и защиты подводной среды, проведения поисково-спасательных работ и разведывательных операций. Ведется активный поиск новых типов двигательных механизмов, способных работать не только в водной среде, но также и на суше, в прибрежной полосе [1-6].

В результате наблюдения и анализа механизмов движения живых существ начались разработки роботов с волнообразным механизмом движения [6], свойственного скатам «batoids», и некоторым другим подводным существам. Этот способ движения позволяет обеспечить значительную маневренность, режим стабилизации при наличии течения, и также обладает относительной бесшумностью по сравнению с

альтернативными способами движения подводных роботов, которые используют классические механизмы. В настоящее время существует довольно много прототипов роботов, работающих с волнообразными движительными механизмами, однако методики проектирования систем управления, учитывающих особенности движителя, пока не существует. Особенности, связанные с применением таких роботов, возникают и в тех случаях, когда задача выполняется роботами данного типа совместно с роботами иной конструкции – подводными, наземными, БПЛА. Для создания такой методики целесообразно вначале исследовать динамику робота и определить его динамические характеристики, чтобы затем построить систему управления роботов такого типа.

Динамическая модель робота

Адекватная модель динамики подводного робота должна описывать движение робота с шестью степенями свободы с учетом действия гидростатических сил, гравитации и плавучести, а также гидродинамических сил, сопротивления воды и подъемной силы, создаваемой корпусом робота, движущегося в воде. Необходимо также учесть дополнительные эффекты вызванные ускорением воды, вытесненной транспортным средством, возмущающими силами от подводных течений, и силами тяги от плавников.

Модель робота должна соответствовать инерциальной системе координат (NED-North-East-Down) $O_E X_E Y_E Z_E$, которую мы совместим с собственной системой координат робота $O_b X_b Y_b Z_b$, с центром в центре масс робота, оси которой совпадают с главными осями конструкции робота и соответствуют углам тангажа, крена и рысканья (surge, sway, heave).(см. рис. 1). Мы будем ниже использовать также международные обозначения, принятые для морских аппаратов и приведенные в таблице 1 [7].

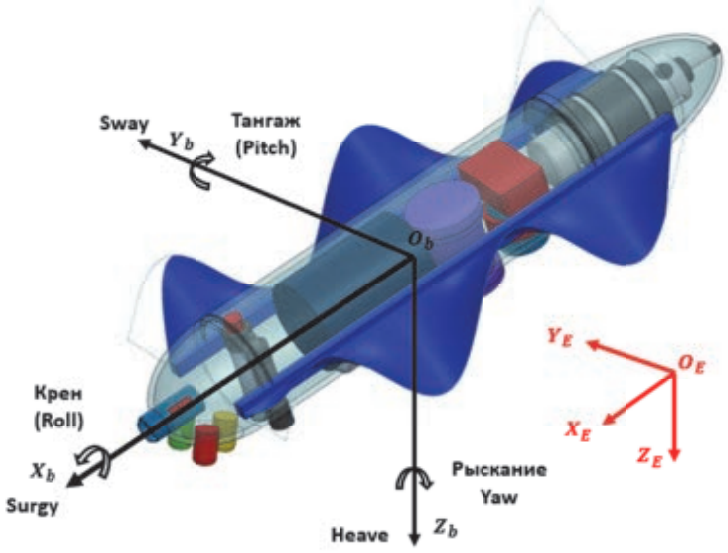


Рисунок 1 — Назначенные системы координат робота

Таблица 1 — Обозначение SNAME для морских аппаратов

		Силы и моменты	$\boldsymbol{\nu_1, \nu_2}$	$\boldsymbol{\eta_1, \eta_2}$
Движение в направлении X	Surge	X	*u*	*x*
Движение в направлении Y	Sway	Y	υ	*y*
Движение в направлении Z	Heave	Z	ω	*z*
Вращение вокруг оси X	Roll	K	*p*	ϕ
Вращение вокруг оси Y	Pitch	M	*q*	θ
Вращение вокруг оси Z	Yaw	N	*r*	ψ

Как показано на рисунке 1, конструкция робота обладает симметрией относительно продольной и поперечной оси. Для упрощения модели мы сделаем следующие предположения:

– Движение по крену не учитывается ввиду значительного расстояния между центром тяжести и центром плавучести и относительно большой площади контакта робота с водой в вертикальном направлении.

– Можно пренебречь связью между движением по глубине и по курсу.

– Демпфирование можно приближенно считать линейным. Эффектом нелинейного демпфирования пренебрегают.

С учетом этих предположений основное уравнение динамики подводного аппарата может быть упрощено и описано следующим образом [8]:

$$\boldsymbol{\nu_1} = \mathbf{R}_I^B \dot{\boldsymbol{\eta}}_\mathbf{1}$$

$$\boldsymbol{\nu_2} = \mathbf{J}(\theta, \psi)\dot{\boldsymbol{\eta}}_\mathbf{2} \qquad (1)$$

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\eta}}_\mathbf{1} \\ \dot{\boldsymbol{\eta}}_\mathbf{2} \end{bmatrix}, \boldsymbol{\nu} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\nu_1} \\ \boldsymbol{\nu_2} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M}_\nu . \dot{\boldsymbol{\nu}} + \mathbf{C}_\boldsymbol{\nu}(\boldsymbol{\nu})\boldsymbol{\nu} + \mathbf{D}(\boldsymbol{\nu})\boldsymbol{\nu} + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}_\mathrm{E}$$

где: $\boldsymbol{\eta}_1 = [x,\ y,\ z\ ]^T$ вектор координат положения робота, $\boldsymbol{\eta}_2 = [\ \phi\ ,\theta\ ,\ \psi]^T$ вектор координат углов Эйлера, которые описывают положение и ориентацию робота согласно таблице 1, в инерциальной системе отсчета $O_E X_E Y_E Z_E$.

$\boldsymbol{\nu_1} = [u,\ \upsilon,\ \omega\ ]^T, \boldsymbol{\nu_2} = [p\ , q\ , r]^T$ векторы линейной и угловой скорости в системе координат $O_b X_b Y_b Z_b$.

$\boldsymbol{\tau} = \left[\tau_u,\ 0,\ \tau_\omega\ ,0, \tau_q, \tau_r\right]^T$ управляющие входы $\tau_u,\ \tau_\omega$ обозначают силы, развиваемые волной (surge), и подъема, и τ_q, τ_r это момент тангажа и рыскания в системе координат $O_b X_b Y_b Z_b$.

$\boldsymbol{\tau}_E = [\tau_{uE},\ \tau_{\upsilon E},\ \tau_{\omega E}\ ,0,0, \tau_{Er}]^T$ Здесь$\tau_{uE},\ \tau_{\upsilon E},\ \tau_{\omega E}$ - это силы возмущения, действующие от волны на покачивание и подъем, τ_{Er} момент возмущения, действующий на рыскание.

J - матрица Якоби, вектор $\dot{\boldsymbol{\eta}}_\mathbf{2}$ не имеет физической интерпретации и связан с фиксированной угловой скоростью тела правильной матрицей Якоби:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin\theta \\ 0 & \cos\phi & \cos\theta\sin\phi \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix}$$

$\mathbf{R}_I^B -$ матрица вращения, выражающая преобразование из инерциальной системы отсчета в собственную систему координат робота, выражается в терминах углов Эйлера.

$$\mathbf{R}_I^B = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta & \sin\psi\ \cos\theta & -\sin\theta \\ -\sin\psi\ \cos\phi + \cos\psi\sin\theta\sin\phi & \cos\psi\cos\theta + \sin\psi\ \sin\theta\sin\phi & \sin\phi\ \cos\theta \\ \sin\psi\ \sin\phi\ + \cos\psi\sin\theta\cos\phi & -\cos\psi\sin\phi\ + \sin\psi\ \sin\theta\sin\phi & \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix}$$

Гидростатические эффекты

Когда робот погружается в жидкость, тогда он находится под действием гидростатических сил (силы тяжести и архимедовой силы), которые также называются восстанавливающими силами (restoring forces). Очень важно принять во внимание статическое равновесие механической конструкции робота в распределении электронных и механических элементов внутри робота. Для поддержания устойчивого равновесия, робот должен иметь большую метацентрическую высоту (metacentric height), когда центр тяжести COG, расположен непосредственно под центром плавучести COB как показано на рисунке 2. Это создает восстанавливающий момент, который противодействует любым

внешним силам или возмущениям, вызывающим вращение вокруг осей крена (roll) и/или тангажа (pitch), и возвращает робот в исходное полположение.

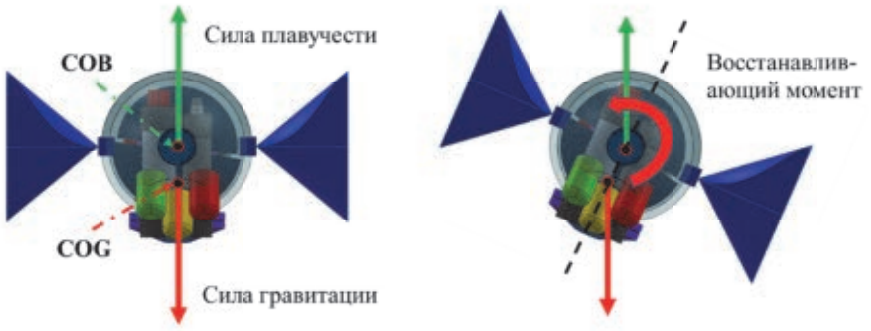


Рисунок 2 — Восстанавливающий момент

В уравнени (2) $g(\eta)$ означает сместное дествие гравитации и плавучести в инерциальной системе координат.

$$\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ W - B \end{pmatrix}, \tag{2}$$

где: $W = m.g$ сила тяжести дейсвует на центр масс COG который имеет кординаты в системе координат робота $O_b X_b Y_b Z_b$ т.е. $[x_G, y_G, z_G]^T = [0,0,0]^T$, $B = -\rho W_0 g$ - архимедовая сила (архимеда) дейсвует на центр центра плавучести COB имеет кординаты в системе координат робота $[x_B, y_B, z_B]^T = [0,0, z_B]^T$, W_0 обьем робота, ρ плотность среды.

Гидродинамические эффекты

Гидродинамические силы, действующие на подводного робота делятся на силу, вызванную добавленной массой (added mass), и силу, вызванную демпфированием (potential damping).

Матрица добавленной массы и инерции

Когда твердое тело движется в жидкости, необходимо учитывать дополнительную инерцию жидкости, окружающей тело. Эта жидкость, ускоряется вместе с самим телом, поэтому для достижения этого ускорения необходима сила. На жидкость действует сила реакции, равная по величине и противоположная по направлению. Эта сила реакции представляет собой вклад добавленной массы.

Матрицу добавленной массы и инерции можно записать в виде:

$$\mathbf{M}_\nu = \mathbf{M}_{RB} + \mathbf{M}_A$$
$$\mathbf{M}_A = \mathbf{M}_{A_cylinder} + \mathbf{M}_{A_Spheroid} \tag{3}$$

где M_{RB} матрица твердого тела (rigid body matrix), m вес робота.

$$\mathbf{M}_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \tag{4}$$

$\mathbf{M}_A$ матрица добавленной массы (added mass matrix). Корпус робота полностью погружен в воду, движется с малой скоростью и имеет три плоскости симметрии, как это принято для подводного аппарата, поэтому согласно [8] можно записать так: $\mathbf{M}_A = -diag(X_{\dot{u}}, Y_{\dot{v}}, Z_{\dot{\omega}}, K_{\dot{p}}, M_{\dot{q}}, , N_{\dot{r}})$.

Элемнты добавленной массы можно теоретически вывести, используя геометрию твердого тела и его симметрию [9], применяя "теорию полос" (strip theory). Для цилиндрического твердого тела массы m, длины L с круглым сечением радиуса r можно получить следующие коэффициенты присоединенной массы:

$$\boldsymbol{X_{\dot{u}} = \frac{dX}{d\dot{u}}}$$

$$\mathbf{M}_{A_cylinder} = -\boldsymbol{diag}(\boldsymbol{X_{\dot{u}}, Y_{\dot{v}}, Z_{\dot{\omega}}, K_{\dot{p}}, M_{\dot{q}}, N_{\dot{r}}})$$

$$\mathbf{X_{\dot{u}} = -0,1\bar{m}}\,, \mathbf{Y_{\dot{v}}} = -\boldsymbol{\pi\rho\bar{r}^2\bar{L}}\,,\ \mathbf{Z_{\dot{\omega}}} = -\boldsymbol{\pi\rho\bar{r}^2\bar{L}}$$

$$\boldsymbol{K_{\dot{p}} = 0}\,, \boldsymbol{M_{\dot{q}}} = -\boldsymbol{\frac{1}{12}\pi\rho\bar{r}^2\bar{L}^3}, \mathbf{N_{\dot{r}}} = -\boldsymbol{\frac{1}{12}\pi\rho\bar{r}^2\bar{L}^3} \qquad (5)$$

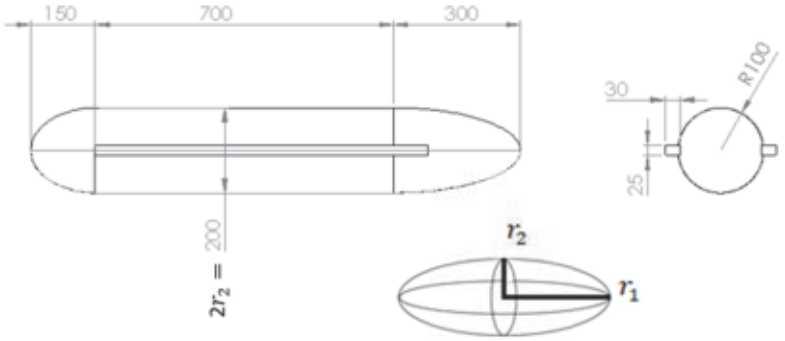


Рисунок 3 — Размеры робота

В целом, вычисление коэффициентов матрицы добавленных масс для общей формы представляет собой сложную задачу, которую необходимо решить с помощью методов CFD и подтвердить экспериментально. Однако существует несколько упрощенных методов, которые обеспечивают соответствующие приближения первого порядка для часто используемых форм (например, сфер, цилиндров, пластин и т. д.).

Расмотруемый робот, как показано на Рис. 3, его корпус имеет типичную циледрическую форму, обладающую вращательной симметрией вокруг оси x. Поэтому можно восспользоваться теорией тонкого тела (slender body) и k-факторов Лэмба (Lamb's k-factors) [10] для вытянутого сфероида, чтобы оценить коэффициенты добавленной матрица масс, которая затем будет приведена к уравнеию (3). Согласно теории тонкого тела (slender body) [9] можно записать:

$$\mathbf{M}_{A_Spheroid} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{m_{s11}} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \boldsymbol{m_{s22}} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \boldsymbol{m_{s26}} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \boldsymbol{m_{s33}} & \mathbf{0} & \boldsymbol{m_{s35}} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \boldsymbol{m_{s53}} & \mathbf{0} & \boldsymbol{m_{s55}} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \boldsymbol{m_{s62}} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \boldsymbol{m_{s66}} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{m_{s22}} = \mathbf{m_{s33}} = \int_{\mathbf{L}} \boldsymbol{\pi\rho r(x)^2\,dx}\,, \boldsymbol{m_{s62}} = \boldsymbol{m_{s26}} = \int_{\boldsymbol{L}} \boldsymbol{x\pi\rho r(x)^2\,dx}$$

$$\boldsymbol{m_{s53}} = \boldsymbol{m_{s35}} = -\int_{\boldsymbol{L}} \boldsymbol{x\pi\rho r(x)^2\,dx}\ , \boldsymbol{m_{s55}} = \boldsymbol{m_{s66}} = \int_{\boldsymbol{L}} \boldsymbol{x^2\pi\rho r(x)^2\,dx} \qquad (6)$$

Осевая добавленная масса по k-факторам Лэмба m_{11} может быть расситана согласно формулам:

$$\boldsymbol{m_{s11} = -k_1 \frac{4}{3} \pi \rho r_1 r_2^2}, \qquad \boldsymbol{k_1 = \frac{\alpha_0}{2 - \alpha_0}}$$

$$\boldsymbol{\alpha_0 = \frac{2(1-e^2)}{e^2}\left(\frac{1}{2}\ln\frac{1+e}{1-e} - e\right)}, \; \boldsymbol{e = 1 - \frac{r_2^2}{r_1}} \qquad \textbf{(7)}$$

В уравнении 7 коэффициент k_1 можно рассматривать как отношение добавленной массы к массе вытесненной жидкости. С использовнием пакета MATLAB для конструкции на рисунке. 3. были рассчитаны элементы матриц (5,6):

$$\mathbf{M_A} = \begin{bmatrix} 1.0273 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 32.564 & 0 & 0 & 0 & -1.8412 \\ 0 & 0 & 32.564 & 0 & 1.8412 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.8412 & 0 & 2.972 & 0 \\ 0 & -1.8412 & 0 & 0 & 0 & 2.972 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M_{RB}} = \begin{bmatrix} 32{,}28 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 32{,}28 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 32{,}28 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.172 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4.854 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4{,}855 \end{bmatrix}$$

Добавленная масса создает также дополнительный кориолисов и центростремительный вклад. Можно показать, что матричное выражение для суммарного кориолисова эффекта можно записать таким образом[9]:

$$\boldsymbol{C_v = C_{RB} + C_A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -m_{33}\omega & -m_{22}v \\ 0 & 0 & 0 & -m_{33}\omega & 0 & m_{11}u \\ 0 & 0 & 0 & m_{22}v & -m_{11}u & 0 \\ 0 & -m_{33}\omega & -m_{22}v & 0 & m_{66}r & -m_{55}q \\ m_{33}\omega & 0 & m_{11}u & -m_{66}r & 0 & 0 \\ m_{22}v & -m_{11}u & 0 & m_{55}q & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad (8)$$

где C_{RB} матрица эффекта Кориолиса, связанная с твердым телом, C_A эффект Кориолиса, вызванный добавленной массой.

Гидродинамическое демпфирование

Вязкость жидкости обуславливает наличие диссипативных сил дрейфа и подъема действующих на корпус робота. Принятое упрощение состоит в том, чтобы рассматривать только линейные и квадратичные члены и группировать их в матрице демпфировании следущим образом [9]:

$$\mathbf{D}(\boldsymbol{\nu}) = \mathbf{D} + \mathbf{D}_{\boldsymbol{n}}(|\boldsymbol{\nu}|) > 0 \; \forall \boldsymbol{\nu} \qquad (9)$$

где $\mathbf{D}$ — линейная матрица демпфирования, а $\mathbf{D}_{\boldsymbol{n}}(|\boldsymbol{\nu}|)$ — квадратичная матрица демпфирования. Если скорости робота достаточно высоки, то слагаемым $\mathbf{D}$ можно пренебречь. В противном случае можно пренебречь слагаемым $\mathbf{D}_{\boldsymbol{n}}(|\boldsymbol{\nu}|)$. В нашем случае скорость робота считается малой, мы пренебрегаем слагаемым $\mathbf{D}_{\boldsymbol{n}}(|\boldsymbol{\nu}|)$. Здесь $\mathbf{D}(\boldsymbol{\nu})$ матрица демпфирования, включающая все силы дрейфа F_{drag} и подъемной силы F_{lift}, а эффектом нелинейного демпфирования мы пренебрегаем. Коэффициенты этой матрицы также считаются постоянными. Для полностью погруженного тела можно представить матрицу ДД в виде [9]:

$$\mathbf{D}(\boldsymbol{\nu}) = -diag(X_u, Y_v, Z_\omega, 0, M_q, N_r) - diag(X_{u|u|}|u|, Y_{v|v|}|v|, Z_{\omega|\omega|}|\omega|, 0, M_{q|q|}|q|, N_{r|r|}|r|)$$

$$X_u = \frac{\partial X}{\partial u}$$

Силы дрейфа F_{drag} и подъема F_{lift} являются результатом давления и трения жидкости, обтекающей поверхность робота. Подъемная сила перпендикулярна направлению движения, а сила дрейфа параллельна и противоположна направлению движения как показано на Рис. 4. Обе эти силы являются функцией квадрата скорости и сущесствено зависят от формы корпуса робота, от поверхностного трения, угола α наклона корпуса по отношению к направлению движения и угла бокового скольжения β в соответствии с формулами:

$$\mathbf{F}_{drag} = \frac{1}{2}\rho \mathbf{V}^2 C_d A$$

$$\mathbf{F}_{lift} = \frac{1}{2}\rho \mathbf{V}^2 C_l A \qquad (10)$$

где ρ плотность жидкости, **V** скорость робота, A поперечное сечение референтной области. Коэффициенты динамического дрейфа C_d и подъема C_l обычно получают из лабораторных экспериментов и используют на практике для определинии зависимостей между характиристками жидкости и поверхности робота.

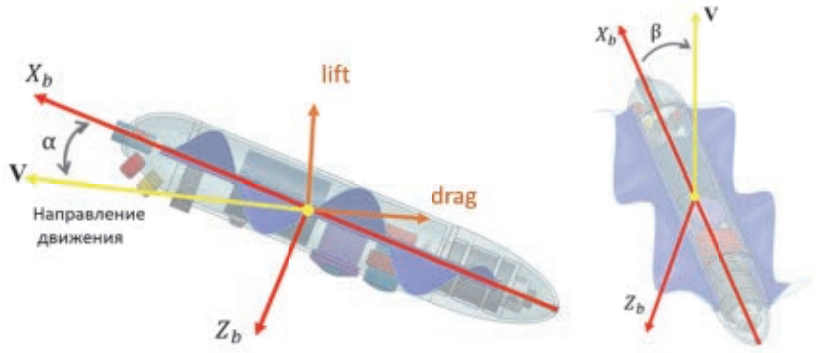


Рисунок 4 — Силы дрейфа и подъема

Для тихоходного подводного аппарата подъемными силами F_{lift} можно пренебречь по сравнению с силами дрейфа F_{drag}. Матрица демпфирования рассчитается с помощью моделирования силы дрейфа F_{drag} с использованием метода CFD (Computational Fluid Dynamics).

CFD моделирование

Гидродинамические характеристики, такие как скорость и давление на корпус робота, были ранее проанализированы с помощью CFD-моделирование в работах [11-13]. CFD-моделирование также обеспечивает определении коэффициента дрейфа для корпуса робота. Для моделирования силы дрейфа робота использовалось программное обеспечение Solidworks Flow Simulation. При моделировании корпус робота считается находящимся в состоянии покоя, а сила дрейфа рассчитывается для определенной скорости жидкости.

В нашей работе для выполнения моделирования водного потока требуются следующие шаги: создание геометрии модели, настройка сетки, настройка физических условий, выполнение расчетов и обработка результатов. Жидкость движется в резервуаре со скоростью, изменяющейся от 0 до 2 м/с для поступательного движения и от 0 до 2 рад/с для вращательного движения. Соответственно, выбран интервал роста скорости 0,1 м/с и 0,2 рад/с. Обратим внимание, что качество сетки обычно важно для анализа CFD, но наша цель - зафиксировать основные эффекты демпфирования. Поэтому мы выбрали конфигурации

сетки, чтобы найти хороший компромисс между временем вычисления и точностью. Результаты измерения силы демпфирования и момента приведены в таблице 2.

Таблица 2 — Демпфирующие силы и моменты при различных скоростях и $\alpha = \beta = 0$

СКОРОСТЬ (М/С)	**0,1**	**0,2**	**0,3**	**0,5**	**0,6**	**0,8**	**1**	**1,1**	**1,5**	**2**
SURGE (Н) СИЛА ПО X	0,024	0,09	0,2	0,3	10	1,3	2	2.2	4,6	8
SWAY (Н) СИЛА ПО Y	0,4	1,7	3,7	10	15.6	25	38	40	85	145
HEAVE (Н) СИЛА ПО Z	0,2	3,2	8,4	13	20	41,2	68.5	81	158	327
СКОРОСТЬ (РАД/С)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0.8	1	1.5
YAW (Н.М) МОМЕНТ ПО Y	0,025	0,099	0,22	0,39	0,612	0,88	1,19	1,94	2,44	6,8
PITCH (Н.М) МОМЕНТ ПО Z	0,045	0,17	0,4	0,713	1,113	1,44	1,9	2,55	3,98	8.9

Результаты моделирования в пакете SolidWorks при скорости потока в разных направлениях показаны на рисунке 5, 6, 7, 8 и 9. Зависимости между демпфированием и скоростями, аппроксимированные полиномами второго порядка приведены в таблице 3 и на рисунке 5, 6, 7, 8 и 9. Наши результаты показывают, что квадратичное демпфирование доминирует над эффектами демпфирования. В результате нашего CFD моделирования, можно писать матрицу демпфирования таким образом:

$$\mathbf{D}(\mathbf{v}) = \boldsymbol{diag}([1.57u + 0.5], [39.54v + 1.98], [62.3\omega + 5], 0\ , [3.93q - 0.33], [2.98r - 0.51]) \quad (11)$$

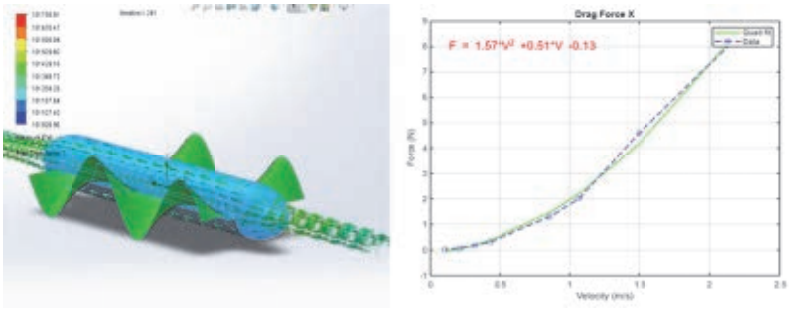


Рисунок 5 — Демпфирующие силы по оси X

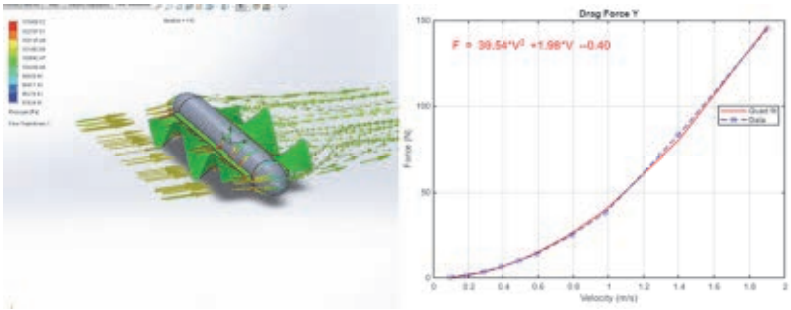


Рисунок 6 — Демпфирующие силы по оси Y

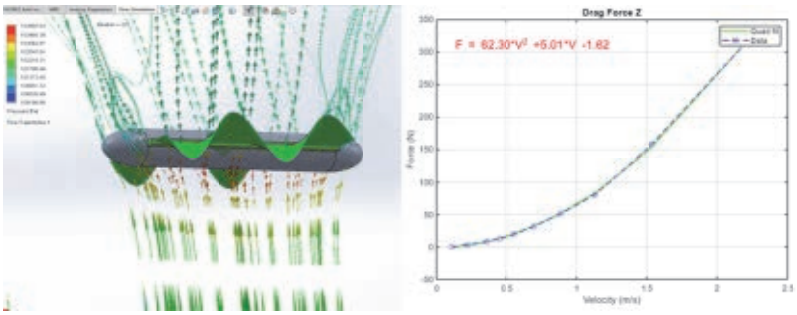


Рисунок 7 — Демпфирующие силы по оси Z

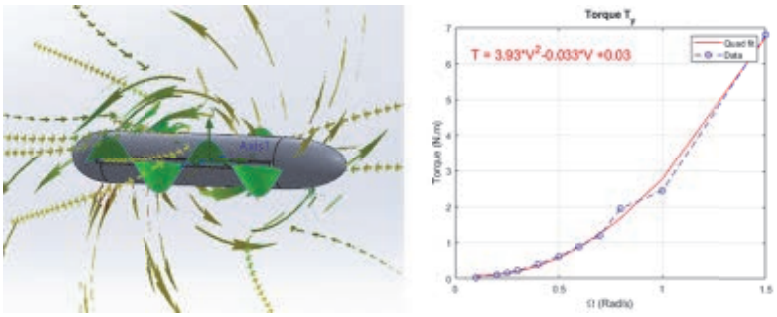


Рисунок 8 — Демпфирующий момент отнасительно оси Y

Таблица 3 — Аппроксимация результатов CFD-моделирования

SURGE (Н) СИЛА ПО X	$\boldsymbol{F_x = 1,57u^2 + 0,5 - 0,13}$
SWAY (Н) СИЛА ПО Y	$F_y = 39{,}5v^2 + 1{,}98v$-0,4
HEAVE (Н) СИЛА ПО Z	$F_z = 62{,}3\omega^2 + 5\omega$+1,62
PITCH (Н.М) МОМЕНТ ОТНАСИТЕЛЬНО Y	$T_y = 3{,}93q^2 - 0{,}33q + 0{,}3$
YAW (Н.М) МОМЕНТ ОТНАСИТЕЛЬНО Z	$T_z = 2{,}98r^2 - 0{,}098r$+0,04

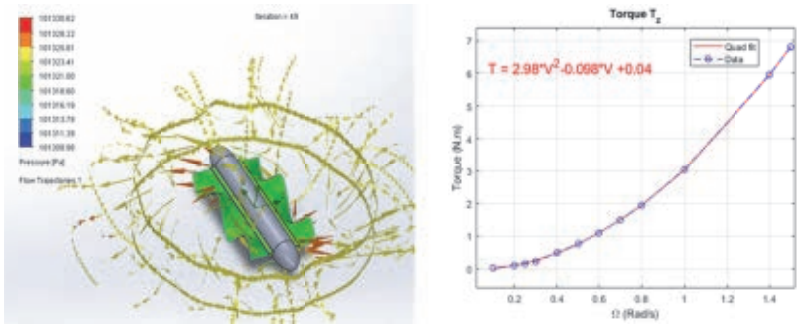


Рисунок 9 — Демпфирующий момент вокруг оси Z

В работе представлены динамическая модель подводного робота с волнообразными движителями и уравнения динамики движения, затем рассчитаны гидростатические параметры для определения гидростатической силы, действующей на робота. Гидродинамические параметры (матрица добавленной массы и матрица демпфирования) были рассчитаны с использованием метода CFD-моделирования в SolidWorks. Результаты моделирования показывают, что квадратичные элементы эффекта демпфирование доминирует над ленинами. В дальнейшем основное внимание необходимо уделить построению алгоритмов управления по курсу и крену подводного робота, а также управлению по глубине и по тангажу, что позволит нам обеспечивать движение вдоль заданного пути, обход препятсвий и т.д .

Литература

1. Li M. et al. Design and performance evaluation of an amphibious spherical robot //Robotics and Autonomous Systems. – 2015. – Т. 64. – С. 21-34.

2. Zhong B. et al. On a CPG-based hexapod robot: AmphiHex-II with variable stiffness legs //IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. – 2018. – Т. 23. – №. 2. – С. 542-551.

3. Kim H. G. et al. Hexapedal robotic platform for amphibious locomotion on ground and water surface //Journal of Bionic Engineering. – 2016. – Т. 13. – №. 1. – С. 39-47.

4. Kashem S., Sufyan H. A novel design of an aquatic walking robot having webbed feet //International Journal of automation and Computing. – 2017. – Т. 14. – №. 5. – С. 576-588.

5. Qing-Ping W. E. I. et al. Design and kinetic analysis of a biomimetic underwater vehicle with two undulating long-fins //Acta Automatica Sinica. – 2013. – Т. 39. – №. 8. – С. 1330-1338.

6. T. J. Hu, L. C. Shen, L. X. Lin, and H. J. Xu, “Biological inspirations, kinematics modeling, mechanism design and experiments on an undulating robotic fin inspired by gymnarchus niloticus,” Mech. Mach. Theory, vol. 44, no. 3, pp. 633–645, Mar. 2009.

7. SNAME, Nomenclature for treating the motion of a submerged body through a fluid. Technical

8. and Research Bulletin, 1950, pp. 1–5

9. Antonelli G., Antonelli G. Underwater robots. – Switzerland: Springer International Publishing, 2014. – T. 3 23-48.

10. T. Fossen, Guidance and Control of Ocean Vehicles (Wiley, Chichester, 1994).

11. Severholt J. Generic 6-dof added mass formulation for arbitrary underwater vehicles based on existing semi-empirical methods. – 2017.

12. Singh J, Gandhi D, Sanghani M, Robi PS, Dwivedy SK. Design and development of underwater robot. In2015 International Conference on Robotics, Automation, Control and Embedded Systems (RACE) 2015 Feb 18 (pp. 1-7). IEEE.

13. Ji D, Rehman FU, Ajwad SA, Shahani K, Sharma S, Sutton R, Li S, Ye Z, Zhu H, Zhu S. Design, and development of autonomous robotic fish for object detection and tracking. International Journal of Advanced Robotic Systems. 2020 May 27;17(3):1729881420925284.

В.В. Сергеев[1], С.И. Косянчук[1], А.Л. Шидловский2, К.С. Талировский[2]

СИСТЕМА ФОТО И ВИДЕО СЪЕМКИ ДЛЯ БУКСИРОВЩИКА ВОДОЛАЗОВ

[1]АО «НИИ телевидения», Санкт-Петербург, npk62ypr@niitv.ru; [2]ФГБУ ВО Санкт-Петербургский университет противопожарной службы МЧС России, shaten7575@inbox.ru

Аннотация

В докладе рассматриваются вопросы применения буксировщиков водолазов, позволяющих эффективно выполнять поисково-спасательные работы на больших площадях с привлечением минимального количества личного состава водолазов. Приводятся основные технические параметры разработанного для МЧС буксировщика водолазов «Фактор» с грузовым контейнером на гибкой сцепке для транспортировки грузов. Приводится сравнительный анализ тактико-технических характеристик буксировщика водолаза «Фактор» с аналогичными устройствами, представленными на мировом рынке, такими как: «Rotinor», «Seabob», «Bonex», «Dive x-tras Piranha».Описаны преимущества буксировщика «Фактор» благодаря оригинальному размещению на нем водолаза по сравнению с зарубежными аналогами. В докладе предлагается оснастить буксировщик системой для фото и видео съемки со светодиодными светильниками для повышения качества выполнения подводных работ и расширения функциональных возможностей буксировщика. В докладе описывается структура и приводятся основные технические параметры оборудования для фото и видео съемки объектов наблюдения на скорости хода буксировщика. Рассматриваются вопросы оснащения буксировщика дополнительными узлами и функциями - глубиномером с индикацией предельной рабочей глубины и компасом.

Ключевые слова

Буксировщики водолазов, водолазное оборудование, подводные работы, подводное телевидение, ТВ камеры, светодиодные системы подсветки.

V.V. Sergeev[1], S.I. Kosyanchuk[1], A.L. Shidlovsky[2], K.S. Talirovskiy[2]

PHOTO AND VIDEO SHOOTING SYSTEM FOR DIVING TOW

[1]JSC «Television Scientific Research Institute», St. Petersburg, Russia, npk62ypr@niitv.ru; [2]St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergencies of Russia, shaten7575@inbox.ru

Abstract

The report discusses the use of the divers tow , which make it possible to effectively carry out search and rescue operations over large areas with the involvement of a minimum number of divers. The main technical parameters of the diver tow «Factor» developed for the Ministry of Emergency Situations with a cargo container on a flexible hitch for transporting goods are given. A comparative analysis of the tactical and technical characteristics of the diver tow «Factor» with similar devices on the world market, such as: «Rotinor», «Seabob», «Bonex», «Dive x-tras Piranha» is given. The advantages of the diver tow «Factor» are described due to the original placement of a diver on it compared to the best foreign analogues. The report proposes to equip the diver tow with equipment for photo and video shooting with LED lights to improve the quality of underwater work and expand the functionality of the tow. The report describes the structure and provides the main technical parameters of equipment for photo and video shooting of objects of observation at the speed of the towing. Perspective issues of equipping the diver tow with additional units and functions are considered - a depth gauge with indication of the maximum working depth and a compass.

Key words

Diver tows, diving equipment, underwater works, underwater television, TV cameras, LED lighting systems.

В настоящее время буксировщики водолазов широко используются в мировой водолазной практике, поскольку их применение позволяет в кратчайшие сроки выполнить поисково-спасательные работы на больших площадях с привлечением минимального количества личного состава водолазов и, тем самым, спасти человеческие жизни, вовремя выполнить ремонтно-восстановительные работы на затонувших объектах или предотвратить экологические катастрофы.

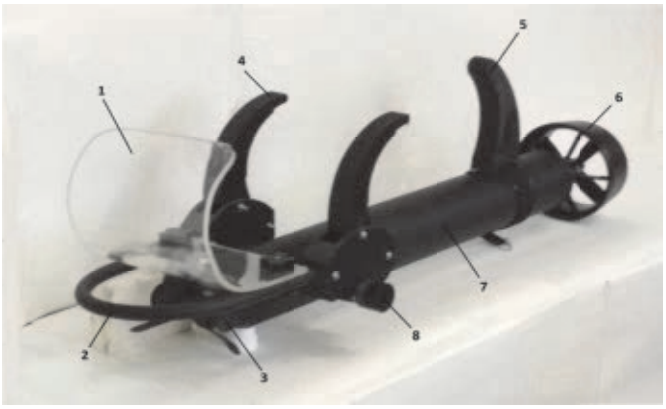
Для решения большинства поисково-спасательных задач, особенно на больших площадях, водолазу необходимы подводные средства передвижения. Так, буксировщик позволяет ускорить выполнение водолазом следующих работ:

- поиск затонувших объектов и пострадавших в акватории океанов и морей на больших площадях;
- доставка оборудования на глубину другим водолазам;
- доставка снаряжения и баллонов с кислородом для спасения людей на затонувших объектах;
- транспортировка грузов, пострадавших или погибших;
- осмотр трубопроводов и подводных объектов;
- проведение анти террористических операций, разведки, охраны, минирования/разминирования и других специальных работ силовыми ведомствами.

Для нужд МЧС разработан буксировщик водолаза «Фактор» с грузовым контейнером на гибкой сцепке для транспортировки грузов [1], (см. рис. 1).

Рисунок 1 — Общий вид буксировщика водолазов «Фактор» с грузовым контейнером

Конструкция буксировщика водолазов приведена на рисунке 2.



1- лобовой обтекатель; 2- бампер; 3- приборный блок; 4-плечевые упоры; 5-задний упор; 6-насадка на винт; 7-корпус; 8-органы управления и герметичная крышка с зарядным разъемом

Рисунок 2 — Конструкция буксировщика «Фактор»

Основные технические характеристики буксировщика приведены в таблице 1.

Размещение водолаза на буксировщике позволяет иметь свободные руки для управления буксировщиком (см. рис. 3).

Таблица 1 — Основные технические параметры буксировщика «Фактор»

Технические параметры	Значение
Длина* ширина* высота, мм	1580*465*450
Диаметр корпуса, мм	150
Глубина погружения, м	до 80
Скорость, узел	0-3,5
Дальность буксировки, км	До 12
Вес, включая батарею, кг	27
Время работы, час	4
Номинальное напряжение АКБ, В	48

Рисунок 3 — Размещение водолаза на буксировщике «Фактор»

Благодаря оригинальному размещению водолаза на буксировщике «Фактор» отсутствуют существенные недостатки лучших зарубежных аналогов -«Rotinor», «Seabob», «Bonex», «Dive x-tras Piranha», которые имеют «тянущий» принцип действия, где водолаз держится руками за рычаги буксировщика (см. рис. 4 – 7), а именно:

- в процессе перемещения у водолаза устают руки и по прибытию к месту работы ему необходимо время для восстановления сил;
- направленный в лицо встречный поток воды затрудняет видимость в воде;
- нет возможности для транспортировки пострадавшего и груза.

Рисунок 4 — Буксировщик «Rotinor»

Рисунок 5 — Буксировщик «Seabob»

Рисунок 6 — Буксировщик «Bonex»

Рисунок 7 — Буксировщик «Dive x-tras Piranha»

Среди приведенных аналогов буксировщик «Rotinor» является более совершенным и имеет лучшие технические характеристики - скорость до 5,5 узлов, оснащен датчиком глубины, компасом, гидролокатором, дисплеем. Благодаря лучшим техническим характеристикам, буксировщик «Rotinor» широко используется в НАТО, масса буксировщика 100 кг. Остальные буксировщики имеют близкие технические параметры с буксировщиком «Фактор».

Для расширения функциональных возможностей буксировщика «Фактор» и повышения эффективности поисково-спасательных и осмотровых работ, работ по составлению донных карт, паспортов безопасности подводных объектов и их охраны, выполнения специальных видов работ, а также учебного процесса обучения водолазов, предлагается оснастить буксировщик «Фактор» системой фото и видео съемки (ФВС) объектов наблюдения с системой подсветки. Так, полученные в процессе работы водолаза фото и видео материалы, позволят обеспечить высокое качество выполняемых подводных работ, сократить время пребывания водолазов в водной среде, привлечь для анализа фото и видео материалов экспертов на суше и, при необходимости, выполнить повторную видео съемку проблемных мест объектов, исключить при осмотре человеческий фактор и пропуск участков объектов или поверхности дна.

На рисунке 8 приведен общий вид буксировщика «Фактор» с установленной системой ФВС.

Рисунок 8 — Буксировщик «Фактор» с установленной системой ФВС

Для установки оборудования потребуется доработка конструкции буксировщика в части обеспечения питания аппаратуры и нейтральной плавучести.

Вся аппаратура системы фото и видео съемки выполняется в виде отдельных навесных на буксировщик герметичных корпусов, которые устанавливаются с помощью кронштейнов на бампер (поз.2 на рисунке 2) в передней части буксировщика.

Состав системы ФВС (см. рис. 8):

- блок цветной или монохромной телекамеры для получения фото и видео изображений (поз.1);
- два светодиодных светильника для обеспечения требуемой освещенности объектов наблюдения телекамерой (поз.2 - ближний и дальний свет);
- блок управления с процессорным модулем и встроенным дисплеем (поз.3) предназначен:
  - для управления светильниками с возможностью плавной регулировки мощности излучения;
  - установки режимов работы (фото/ видео, наблюдение/запись);
  - цифровой обработки получаемых изображений для повышения их качества;
  - наблюдения в реальном времени на встроенном дисплее формируемых изображений;
  - накопления фото и видео информации на твердотельный накопитель для их передачи и дальнейшего использования.

Аппаратура легко монтируется и демонтируется на буксировщик водолаза при необходимости выполнения задач фото и видео съемки.

Таблица 2 – Основные технические параметры системы ФВС для буксировщика

Технические параметры	Значение/описание
Блок телекамеры	Формирование изображений
Цветная или монохромная матрица	IMX265 (КМОП)
Разрешение, пкс	2048*1536
Интерфейс Ethernet, Мбит/с	100
Угол поля зрения по диагонали в воде, град	52
Минимальная освещенность на объекте, лк	0,1
Максимальная дальность видимости, Zб	1
Светильник светодиодный 1	Ближний свет
Светодиодная матрица, Вт	50
Максимальная осевая сила света, кд	5000
Угол излучения в воде, град	51
Светильник светодиодный 2	Дальний свет
Светодиодная матрица, Вт	50
Максимальная осевая сила света, кд	11500
Угол излучения в воде, град	23
Блок управления	Управление режимами работы
Микрокомпьютер	Raspberry P4
Оперативная память, GB	8
Флэш-память, GB	128
Дисплей	5"Amoled, 960*544
Режимы работы	Фото/видео, наблюдение/запись
Частота кадров в режиме «Видео», к/сек	25
Время записи, час, не менее	20
Управление мощностью излучения кнопками Диммер(+) и (-)	Есть
Мощность потребления, Вт, не более	15

Структурная схема системы ФВС приведена на рисунке 9.

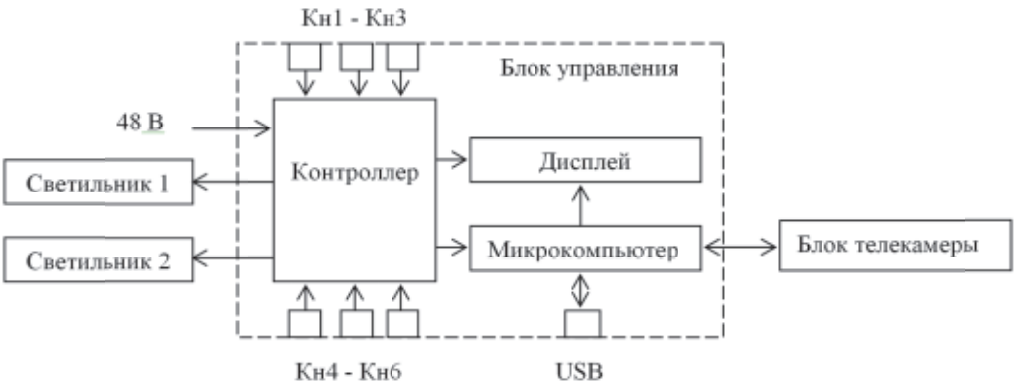


Рисунок 9 — Структурная схема системы ФВС для буксировщика

Рассмотрим составные части системы ФВС.

На основе анализа приведенных в работах [2, 3] критериев выбора фоточувствительных матриц– квантовой эффективности, порога абсолютной чувствительности, величины отношения сигнал/шум, динамического диапазона и числа фоточувствительных элементов, для блока телекамеры системы фото и видео съемки для буксировщика водолазов была выбрана ТВ камера с Ethernet интерфейсом на моно-

хромной КМОП матрице IMX265LLR: число фоточувствительных элементов 2048×1536, размер элемента 3,45×3,45 мкм. ТВ камера имеет высокую контрастную чувствительность и небольшие массогабаритные характеристики, что обеспечивает наблюдение низкоконтрастных объектов в водной среде.

Для обеспечения необходимого уровня освещённости объектов наблюдения на требуемых дистанциях съёмки, были разработаны два светильника на светодиодных матрицах 50 Вт каждый. Светильник 1 имеет угол излучения в воде 51 градус и осевую силу света 5000 кд (ближний свет). Светильник 2 имеет угол излучения в воде 23 градуса и осевую силу света 11500 кд (дальний свет). Контроллер в блоке управления формирует отдельно для каждого светильника необходимые для их работы напряжение и ток с возможностью плавной регулировки мощности их излучения водолазом. Управление системой ФВС обеспечивается с помощью шести герметичных кнопок Кн1…Кн6 в блоке управления. Кн1 предназначена для включения системы ФВС, Кн2 - для включения светильника 1, Кн3 - для включения светильника 2, Кн4 - для увеличения мощности излучения светильников, Кн5 - для уменьшения мощности излучения светильников, Кн6 - кнопка включения записи изображения на твердотельный накопитель.

После включения системы ФВС, изображение от ТВ камеры поступает в микрокомпьютер, обрабатывается и отображается на дисплее. Водолаз в зависимости от относительной прозрачности водной среды и дальности наблюдения может включить один или два светильника и установить необходимый уровень их излучения. Для записи фото кнопка Кн6 нажимается кратковременно, а для перехода в режим видео - кнопка Кн6 нажимается на время примерно 3 сек. После выполнения водолазом задания имеется возможность переписать полученные записи из системы, для этого в системе ФВС предусмотрен разъем USB под герметичной крышкой**.**

В настоящее время изготовлено и установлено на буксировщик «Фактор» опытное оборудование системы ФВС.

В дальнейшем в систему ФВС планируется подключить дополнительные датчики для обеспечения безопасности и навигации - установка датчика глубины с индикацией на дисплее достижения предельной рабочей глубины и компаса.

Оснащение буксировщика «Фактор» системой фото и видео съемки позволит обеспечить подсветку, фото и видео запись выполняемых водолазом работ на буксировщике, контролировать качество выполняемых подводных работ, сократить время пребывания водолазов в водной среде, исключить человеческий фактор при поиске и осмотре объектов. Для расширения функций системы ФВС, в нее дополнительно планируется подключить датчик с индикацией достижения предельной рабочей глубины для обеспечения безопасности водолаза и компас для обеспечения навигации.

Литература

1. Шидловский А.Л., Митрофанов О.А., Талировский К.С. «Анализ сравнительных характеристик подводного буксировщика водолаза «Фактор» с аналогами мировых производителей». Материалы международной научно-практической конференции «Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы. Мониторинг, предотвращение и ликвидация чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера». Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России, 28 октября 2021 г, с.686-690.

2. Войтов А.А., Сергеев В.В., Соколов В.А., Форсов Б.Ю. «Формирование изображений в активных системах подводного видения». Вопросы радиоэлектроники, сер. Техника телевидения, 2015, вып.5. С. 21-31.

3. Сергеев В.В., Карпов В.В., Прибылов Ю.С., Соколов В.А. «Активная система подводного видения для автономных необитаемых подводных аппаратов». Вопросы радиоэлектроники, сер. Техника телевидения, 2019, вып.2, с. 53-61.

С.А. Половко, А.С. Проценюк, В.В. Целуйко

ОПЫТ СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ ПОДВОДНОЙ СТЫКОВКИ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ СОВМЕСТНЫХ ДЕЙСТВИЙ

ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург, polovko@rtc.ru, a.procenyuk@rtc.ru, v.celuyko@rtc.ru

Аннотация

Для группового управления автономными необитаемыми подводными аппаратами, требуется обеспечить надежное взаимодействие членов подводной группы в условиях ограниченной пропускной способности гидроакустических каналов связи. Одним из вариантов организации взаимодействия подводных роботов является совместное использование автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) и стационарной донной станции. Донная станция может быть реализована на базе телеуправляемого необитаемого подводного аппарата (ТНПА), имеющего надежный канал связи с надводным носителем или с радиобуем. Настоящая статья посвящена рассмотрению проблемы подводной стыковки необитаемых аппаратов. Мы рассматриваем вариант вертикального движения небольшого маневренного АНПА по целеуказанию системы технического зрения. Система технического зрения состоит из активных световых маркеров, установленных на ТНПА и телевизионных камер на АНПА.

Ключевые слова

Подводная стыковка, группа роботов, АНПА, донная станция**.**

S.A. Polovko, A.S. Procenyuk, V.V. Tceluyko

EXPERIENCE IN CREATING AN UNDERWATER DOCKING SYSTEM FOR ORGANIZING JOINT ACTIONS

Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, St. Petersburg, Russia, polovko@rtc.ru, a.procenyuk@rtc.ru, v.celuyko@rtc.ru

Abstract

For group control of autonomous uninhabited underwater vehicles, it is required to ensure reliable interaction of members of the underwater group in conditions of limited capacity of hydroacoustic communication channels. One of the options for organizing the interaction of underwater robots is the joint use of autonomous uninhabited underwater vehicles (AUUV) and a stationary bottom station. The bottom station can be implemented on the basis of a teleoperated uninhabited underwater vehicle (TUUV), which has a reliable communication channel with a surface carrier or with a radio beacon. This article is devoted to the problem of underwater docking of uninhabited vehicles. We are considering the option of vertical movement of a small maneuverable ANPA by targeting the vision system. The vision system consists of active light markers installed on the TNPA and television cameras on the AUUV.

Key words

Underwater docking, robot group, AUUV, bottom station.

Известными общими преимуществами группового применения роботов при выполнении подводных операций являются: уменьшение времени выполнения операции в целом; экономия ресурсов отдельного робота за счет оптимального планирования ресурсов группы; возможность формирование мобильной сети гидроакустических маяков для повышения надежности навигации [1]. При этом групповое взаимодействие принципиально может быть организовано либо по централизованной, либо по децентрализованной схеме коммуникации. Для централизованной сети все роботы группы

должны быть в зоне гидроакустической видимости, причём канал связи должен обеспечивать хорошую пропускную способность. В реальности обеспечить такие условия весьма проблематично.

Таким образом, необходимо решить задачу создания алгоритмов группового управления автономными необитаемыми подводными аппаратами, которые обеспечивали бы надежное взаимодействие членов подводной группы и элементы их самоорганизации в условиях неизбежно ограниченной пропускной способности гидроакустических каналов связи. Одним из вариантов организации взаимодействия подводных роботов является совместное использование автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) и стационарной донной станции [2]. В свою очередь, донная станция может быть реализована на базе телеуправляемого необитаемого подводного аппарата (ДС-ТНПА), имеющего надежный канал связи с надводным носителем или с радиобуем. В это схеме функции роботов-членов группы разделены.

АНПА выполняют следующие функции:

- обзорно-поисковая съемка дна;
- автоматический поиск и исследование донных объектов или донной поверхности по заданной программе;
- измерение параметров среды (давление, температура, электропроводность);
- запись и накопление в памяти АНПА регистрируемой информации, включая видеоданные, данные гидроакустической аппаратуры и тому подобные большие объемы данных.

Донная станция на базе ТНПА выполняет следующие функции:

- получение и накопление больших объемов данных от АНПА по надежному каналу связи;
- передача данных на надводный носитель или радиобуй по надежному каналу связи.

Для осуществления передачи данных с АНПА на ДС-ТНПА необходима техническая реализация высокоскоростного подводного канала связи. Наиболее надежной реализацией такого решения представляется высокоскоростной оптический канал подводной связи. В последние десятилетия появился ряд решений такого рода [3]. В данной статье рассматривается вариант организации высокоскоростного канала связи АНПА с ДС-ТНПА, предполагающий контактную стыковку двух объектов.

Стыковка АНПА с подводным носителем является сложной операцией, так как предусматривает тесное взаимодействие подвижных объектов в условиях подвижной среды. Можно выделить несколько этапов данной операции:

- приведение АНПА в район нахождения ДС-ТНПА с большого расстояния;
- точное позиционирование АНПА относительно стыковочного узла;
- обеспечение безопасного перемещения АНПА до момента стыковки.

В настоящей работе рассмотрен наиболее ответственный этап: перемещение АНПА до момента стыковки с ДС-ТНПА

Обзор существующих решений

В РФ и за рубежом рассмотрено несколько подходов к осуществлению подводной стыковки.

Существующие решения для приведения АНПА и ТНПА торпедообразной формы традиционно основываются на применении специальных стыковочных рам воронкообразной формы. Типовое решение представлено на рисунке 1.

Другие возможные решения основываются на применении стыковочных штырей и рам различной конструкции, захватываемых специальным устройством со стороны АНПА, а также активных захватов со стороны стыковочных модулей. Однако такие решения менее популярны из-за ограниченных возможностей по взаимодействию с АНПА.

Для выполнения сближения и стыковки стыковочный модуль оснащается гидроакустическими и, при необходимости, оптическими средствами определения положения АНПА. Гидроакустические системы на основе короткобазной схемы (с расположением антенн на носителе) применяются для

определения положения на больших расстояниях. Ультракороткобазные схемы с расположением антенн на АНПА позволяют выполнять определение положения на малых дистанциях.

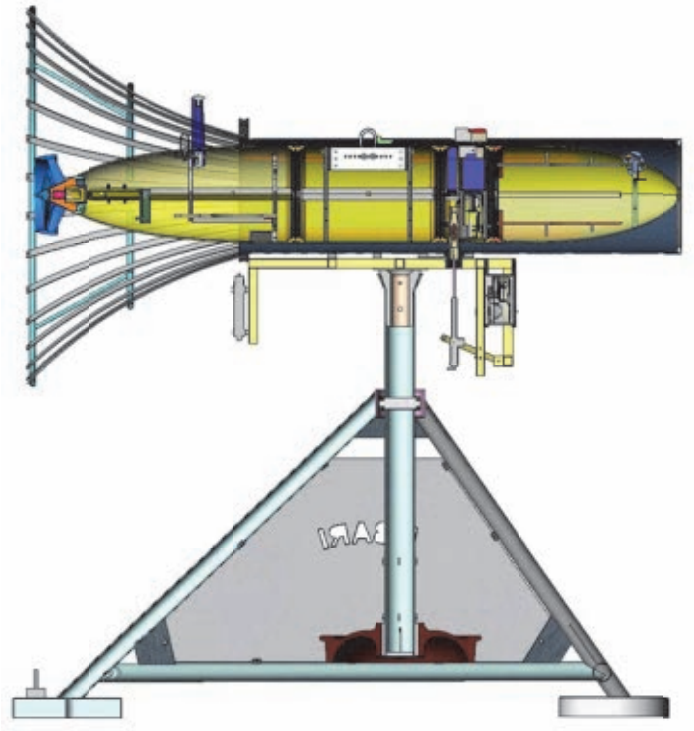


Рисунок 1 — Стыковочная рама воронкообразной формы [4]

Существуют также единичные экспериментальные исследования, показывающие применимость для наведения сканирующих гидролокаторов (совместно с компьютерной модели стыковочного устройства), а также электромагнитных сенсоров.

На финальных стадиях стыковки наиболее эффективным признано применение оптических систем, обеспечивающих высокую точность и непрерывность измерений. Основным ограничивающим фактором применения таких систем является работа только в пределах дальности видимости в воде. Можно выделить подходы, основанные на наблюдении активных световых маркеров, пассивных шаблонов, а также системы, работающие по произвольным объектам. Среди этих подходов применение активных световых маркеров является наиболее эффективным, поскольку обеспечивает максимальную дальность (превышающую дальности видимости в воде) и надежность измерений, а также является наименее затратным с точки зрения вычислительных ресурсов.

В состыкованном состоянии модуль обеспечивает удержание АНПА, зарядку батарейных модулей, высокоскоростной информационный обмен для получения больших объемов данных, задания новых миссий, диагностики аппаратной части, проверки целостности программного обеспечения и т.п.

Разработка решений для конкретного АНПА всегда тесно связана с особенностями самого аппарата (геометрия, расположение движительно-рулевых модулей), с планируемым размещением стыковочного узла, с решаемыми задачами. Горизонтальное приведение удобно для аппаратов, которые не могут обеспечить управляемость на малых скоростях. Однако размещение такого стыковочного модуля на ДС-ТНПА сопряжено с рядом технологических проблем.

Заметим, что для выполнения вышеперечисленных задач в составе группы, АНПА должны обладать высокой маневренностью, включая способность двигаться с малыми скоростями, зависать на месте и перемещаться вертикально. Это позволяет разработать решение с возможностью полностью автоматического приведения на ДС-ТНПА, при этом стыковка осуществляется в вертикаль-

ном направлении. Соответствующее расположение стыковочного модуля на ДС--ТНПА является более эффективным.

Этапы выполнения подводной стыковки

Процесс приведения и стыковки состоит из последовательности этапов:

- сближение на дистанцию гидроакустической связи;
- приведение АНПА к ДС-ТНПА по данным системы гидроакустической навигации и связи;
- стыковка.

Этапы выбраны с учетом характеристик сенсоров, обеспечивающих различные диапазоны и точности определения положения.

Допустим, исходно АНПА находится вне зоны гидроакустической связи с ДС-ТНПА и движется в предполагаемую точку связи. При этом обеспечивается навигация в географических координатах с применением навигационной системы на базе инерциальной системы, доплеровского и электромагнитного лагов. Возможна также коррекция координат с применением спутниковой навигации в надводном положении. Важно отметить, что точности такой навигации заведомо недостаточно для успешной стыковки даже в том случае, когда координаты носителя хорошо известны.

Зона приведения определяется дистанциями между АНПА и ДС-ТНПА в диапазоне от километра и обуславливается возможностями передачи гидроакустического сигнала. При появлении гидроакустической связи с носителем, положение АНПА может быть определено приближенно с помощью системы гидроакустической навигации и связи и гидроакустической навигации. Дальнее приведение позволяет сблизиться с носителем на дистанцию, с которой возможно осуществление стыковки.

На стадии стыковки применяется оптико-телевизионный принцип определения положения, обеспечивающий высокую частоту и точность измерений.

Наиболее эффективной схемой для оптического наведения является применение специальных активных световых маркеров, которые могут быть заметны с дистанции порядка 15-20 метров. Две телевизионные камеры АНПА, направленные вниз, обеспечивают получение изображений маркеров, а бортовой вычислитель СТЗ – совместный анализ изображений от обеих камер. При появлении в поле зрения телевизионных камер АНПА световых маркеров производится расчет положения АНПА относительно системы координат (СК) стыковочного модуля. [5] Стыковочные координаты вводятся таким образом, чтобы при размещении АНПА в стыковочном модуле (в состыкованном состоянии) СК АНПА и стыковочного модуля совпадали. Это позволяет при выполнении этапа стыковки разделить управление движением АНПА по вертикали и по горизонтали. Задачей управления по горизонтали является удержание маркеров в центре изображений. Когда эта задача достигается, производится постепенное снижение АНПА до контакта с ДС-ТНПА.

Пример маркера показан на рисунке 2.

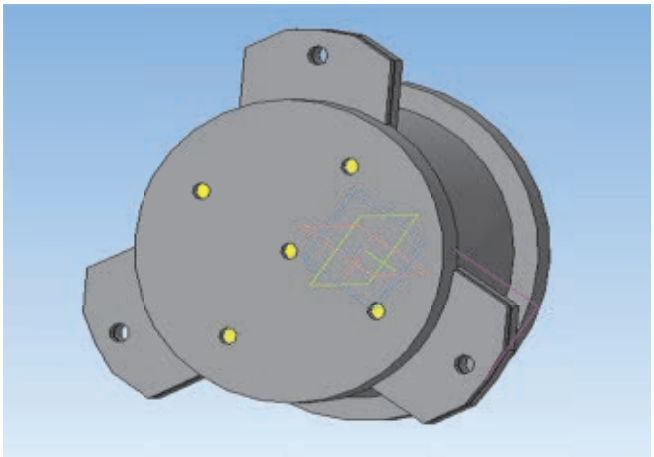


Рисунок 2 — Маркер для осуществления подводной стыковки

Факт стыковки определяется, например, по срабатыванию концевых выключателей, по появлению связи по системе высокоскоростного оптического обмена либо по стабильному положению маркеров в поле зрения телевизионной камеры

Рассмотренное решение по реализации подводной стыковки было успешно отработано на компьютерных моделях [6].

Рассмотренный подход к созданию систем подводной стыковки может быть внедрен при разработке технологий подводной робототехники для практического использования в следующих прикладных областях:

− разработка подводных роботов для обеспечения комплексных морских изысканий, навигационно-гидрографического и подводно-технического сопровождения строительства и эксплуатации объектов подводных добычных комплексов, морского, речного и трубопроводного транспорта;

− разработка групп автономных мобильных роботов, способных к самостоятельному взаимодействию при функционировании в слабо структурированной, динамически изменяющейся среде в условиях ограничений на пропускную способность каналов связи.

Рассмотренная система подводной стыковки с определёнными доработками может использоваться для стыковки АНПА с надводным кораблём.

Дальнейшие исследования будут проводиться по двум направлениям:

− оптимизация управления АНПА в ходе стыковки с ДС-ТНПА с учетом возмущающих воздействий с привлечением аппарата точных гидродинамических расчетов;

− проработка вариантов организации надежной высокоскоростной передачи данных между АНПА и ДС-ТНПА с использованием бесконтактных каналов высокоскоростной подводной связи.

Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России FNRG-2022-0025 1021101316168-7-2.2.2 № 075-01623-22-01 «Алгоритмы группового управления автономными необитаемыми подводными аппаратами в условиях ограниченной пропускной способности гидроакустических каналов связи».

Литература

1. Будко Павел Александрович, Жуков Геннадий Анатольевич Групповое использование робототехнических комплексов при выполнении миссий на глобальных удалениях от пункта управления // T-Comm. 2017. №9. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/gruppovoe-ispolzovanie-robototehnicheskih-kompleksov-pri-vypolnenii-missiy-na-globalnyh-udaleniyah-ot-punkta-upravleniya (дата обращения: 09.10.2022).

2. https://ckb-rubin.ru/proekty/robototekhnika/kompleks_vitjaz_d/ [Электронный ресурс] (дата обращения: 09.10.2022)

3. Z.Zeng, S.Fu, H.Zhang, Yu.Dong, Ju.Cheng. (2016). A Survey of Underwater Optical Wireless Communications. IEEE Communications Surveys & Tutorials. 19. 204 - 238.

4. https://www.keywordbaskets.com/YXV2IGRvY2tpbmcgc3RhdGlvbg/ - электронный ресурс.

5. Vasilyev, Ivan & Popov, Alexander & E.Y., Smirnova & Shmakov, Oleg & Tselouyko, Vasily. (2018). The Vision System Software to Enable Maneuvering of Underwater Vehicle. 10.2507/29th.daaam.proceedings.078. p.p.0540-0546

6. D.Frolov, S.Polovko Pose estimation for the case of prolonged under-ice based AUV December 2021 Journal of Physics Conference Series 2131(3):032068 Open access.

К.К. Забелло, Н.А. Щур

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СОПРЯЖЕННЫХ РАСЧЁТОВ ДИНАМИКИ ТЕЛА, СОВЕРШАЮЩЕГО ВЗМАХОВЫЕ КОЛЕБАНИЯ, И ГИДРОДИНАМИКИ, ОБТЕКАЮЩЕЙ ЕГО ЖИДКОСТИ

ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург, kosnay@mail.ru, koliambos@mail.ru

Аннотация

В настоящей статье представлена разработка методики расчета для класса задач, где движение тела вызвано крупномасштабной деформацией формы самого тела, в частности деформацией типа взмах крыла. Апробация данной технологии происходит на задаче о полете комара в неподвижной среде. Параметры задачи, форма колебаний и деформации крыла берутся, исходя из статьи [3]. Расчетная методика предполагает совместное решение уравнений динамики тела и уравнений гидродинамики жидкости, обтекающей его. Для данной задачи был разработан оригинальный алгоритм деформации сетки, позволяющий вести гидродинамические расчеты вблизи крыльев модели, совершающего взмаховые и изгибные колебания. Использование технологии деформируемых сеток позволяет максимально точно воспроизводить форму колебаний. К тому же, расчетная схема обладает свойством консервативности, что позволяет получать высокое качество расчета, подтвержденное сравнением с экспериментальными данными.

Ключевые слова

Деформируемые сетки, алгоритм деформации, взмаховые колебания, полет комара, сопряженный расчет, взаимодействие тела с потоком, вычислительная гидрогазодинамика.

K.K. Zabello, N.A. Shur

DEVELOPMENT OF A TECHNOLOGY FOR COUPLED CALCULATIONS OF THE DYNAMICS OF A BODY PERFORMING WAVE OSCILLATIONS AND HYDRODYNAMICS OF A FLUID FLOWING AROUND IT

Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, St. Petersburg, Russia, kosnay@mail.ru, koliambos@mail.ru

Abstract

This article presents the development of a calculation methodology for a class of problems where the movement of a body is caused by a large-scale deformation of the shape of the body itself, in particular, a wing flap type deformation. The approbation of this technology takes place on the task of flying a mosquito in a stationary environment. The parameters of the problem, the shape of the vibrations and the deformation of the wing are taken based on the article [3]. The calculation method involves the joint solution of the equations of the dynamics of the body and the equations of the hydrodynamics of the fluid flowing around it. For this task, an original mesh deformation algorithm was developed that allows hydrodynamic calculations to be performed near the wings of the model performing flapping and bending vibrations. The use of deformable mesh technology allows you to reproduce the shape of vibrations as accurately as possible. In addition, the calculation scheme has the property of conservativeness, which makes it possible to obtain high quality calculations, confirmed by comparison with experimental data.

Key words

Deforming meshes, deformation algorithm, swinging oscillations, mosquito flight, conjugate calculation, fluid body interaction, computational fluid dynamics.

На сегодняшний день существует целый класс задач – задач биоморфного движения за счет крупномасштабной деформации частей тела или тела целиком. В данных задачах изучается взаимодействие между движущимся (или деформирующимся) твердым телом (системой тел) и потоком жидкости или газа. Особый интерес представляет механика полета насекомых, плавания рыб. Для обоих случаев характерно наличие взамаховых колебаний крыльев, плавников, хвоста и т.д. Известно, что данный механизм движения обладает высоким КПД, доходящим до 80 %, что значительно превосходит существующие аналоги, так КПД винта в среднем имеет значение в 45 % [1]. Помимо этого, такой механизм движения позволяет определенным видам рыб развивать скорость более 100 км/ч, что значительно превосходит скорость существующих подводных аппаратов.

Таким образом, изучения данного вида движения является перспективным направлениям развития как подводных, так и воздушных летательных аппаратов. С этой целью предлагается технология сопряжённого расчёта динамики жидкости или газа и твердого тела, совершающего взмаховые колебания.

Одной из основных сложностей решения данного класса задач является необходимость вести расчеты в области с изменяющейся и/или движущейся геометрией. Существует несколько подходов, учитывающих движение границ расчетной области. Метод накладывающихся сеток предполагает решение сразу на двух сетках, где одна является неподвижной, а вторая, содержащая движущиеся границы, движется поверх другой. Однако, в этом случае возникает проблема переинтерполяции данных, которая может приводить к ухудшению качества решения. Аналогичная проблема присуща другому методу адаптирующихся сеток, предполагающему построение новой сетки на каждом шаге по времени, что является ресурсоемкой операцией. Упомянутых выше недостатков лишен метод деформируемых сеток. Данный подход предполагает, что при движении границы сетка внутри расчетной области также смещается (деформируется). При этом количество ячеек и топология сетки остаются неизменными.

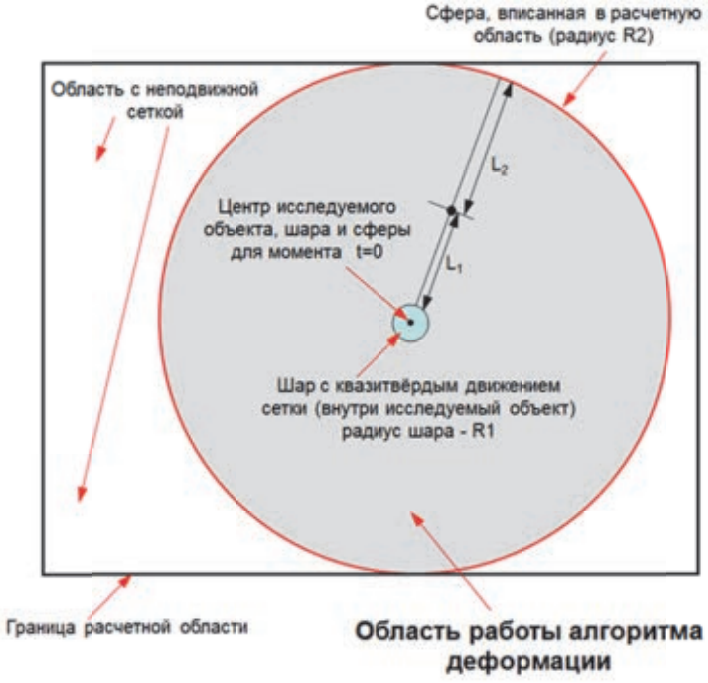


Рисунок 1 — Схема работы алгоритма деформации по перемещению центра масс тела

Открытым при этом остается вопрос применения алгоритма деформации сетки в соответствии с движением границ расчетной области. На данный момент существуют различные методы деформации сетки: алгебраические, основанные на явных соотношениях между движением границ и деформацией сетки, а также дифференциальные, предполагающие решение дифференциальных уравнений относительно смещений узлов сетки или их скоростей. Неоспоримым преимуществом первого варианта

является простота реализации и малая ресурсоемкость по сравнению со вторым вариантом, а также высокая точность при малых деформациях.

В данной работе используется алгебраический алгоритм деформации, устанавливающий явные соотношения между движением границ и деформацией сетки. Предлагаемый алгоритм является модернизацией способа деформации, предложенного Н.А. Щуром [2]. Новый алгоритм позволяют учитывать движения границ расчётной области при взмаховых колебаниях. Он состоит из трех более простых алгоритмов, каждый из которых отвечает за определённый вид движения: взмах, изгиб и перемещение центра масс тела.

Каждый алгоритм предполагает разбиение расчетной области на три части (см. рис. 1). Исследуемое тело окружают сферой радиуса R_1, центр которой совпадает с центром массы тела. Внутри данной сферы узлы движутся квазитвердо с центром массы исследуемого объекта, что позволяет сохранить качество сетки вблизи поверхности тела. Полученная система окружается еще одной сферой радиуса R_2, центр который совпадает с центром массы тела в начальный момент времени. Основная работа алгоритма деформации осуществляется в области между сферами, отмеченной серым цветом (см. рис. 1). Здесь происходит «размазывание» деформации до сферы радиуса R_2, так чтобы на сфере смещения узлов сетки равнялись нулю. Вне сферы радиуса R_2 алгоритм деформации не применяется, и сетка остается неизменной.

Смещения узлов, расположенных между сферами, вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} \Delta x_{node} &= \Delta x_c \cdot \frac{L_2}{L_1+L_2} \\ \Delta y_{node} &= \Delta y_c \cdot \frac{L_2}{L_1+L_2} \\ \Delta z_{node} &= \Delta z_c \cdot \frac{L_2}{L_1+L_2} \end{aligned} \qquad (1)$$

где $\Delta x_c, \Delta y_c, \Delta z_c$ – смещения центра массы тела на некотором шаге по времени. L_1 и L_2 – расстояния от узла до внутренней сферы и до внешней сферы соответственно. Отмечу, что внешняя сфера остается неподвижной, в то время как центр внутренний сферы движется вместе с центром массы тела.

Движения тела происходит за счет крупномасштабной деформации самого тела – взмаховые колебания. В результате разные точки тела движутся по-разному, что приводит к необходимости использовать алгоритмы деформации внутри малой сферы (см. рис. 2). Данные алгоритмы схожи с описанным выше. Отличия заключается в использовании других геометрических примитивов – вместо сферы используются конус и сектор заданной высоты для изгибной и взмаховой деформации соответственно. Отмечу необходимость учета анизотропности данных объектов при «размазывании» деформации.

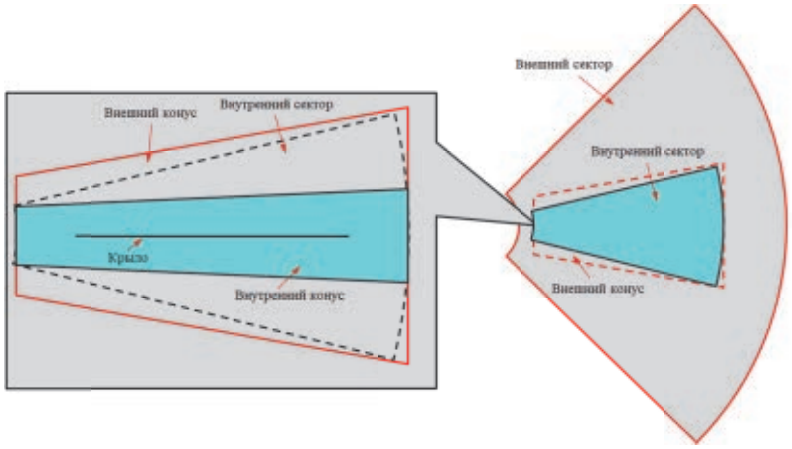


Рисунок 2 — Схема работы алгоритма деформации для изгиба (слева) и взмаха (справа) в плоскости перпендикулярной хорде крыла

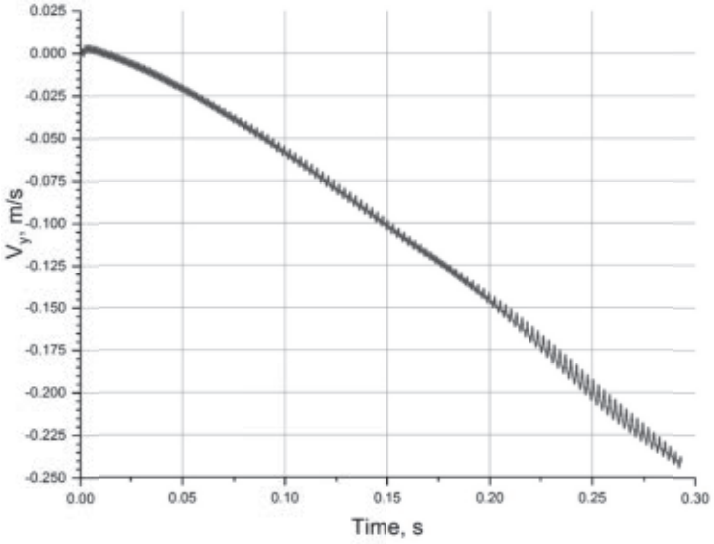


Рисунок 3 — Зависимость вертикальной скорости комара от времени

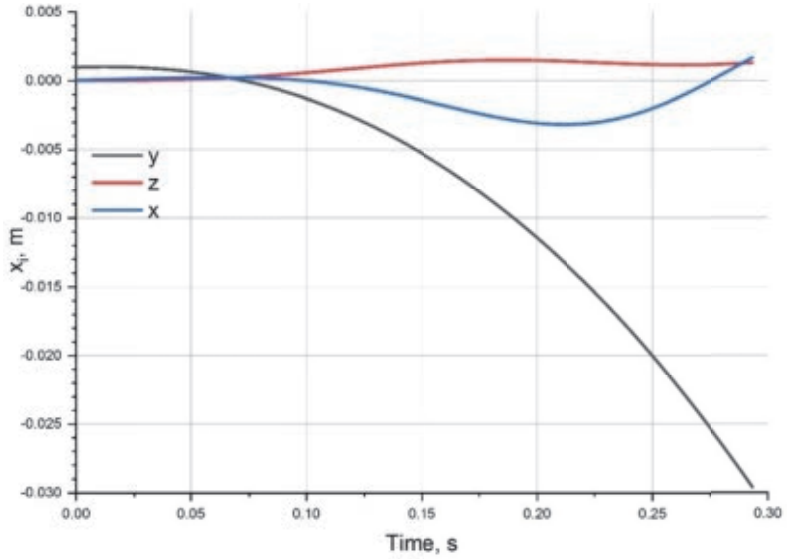


Рисунок 4 — Изменение положения центра масс комара со временем

Апробация предложенной технологии расчета производится на задаче о полете комара в неподвижной несжимаемой среде в поле силы тяжести. Постановка задачи схожа с представленной в статье [3]. Кратко приведем основные аспекты в постановке задачи:

- Масса комара – 5 мг;
- Длина крыла – 5.7 мм;
- Средняя ширина крыла – $d = 1.5$ мм;
- Амплитуда взмаха и изгиба – 22^0 и 50^0;
- Частота колебаний – 350 Гц, что соответствует периоду $T_к \cong 0.00286$ с.

$Re = \frac{\rho V d}{\mu} = 120$, что соответствует ламинарному течению;

Начальные условия:

- Объект неподвижен;
- Среда неподвижна;

Численные параметры:

- Количество ячеек сетки – 900 тыс;
- Размер пристенной ячейки – 10^{-5} м;
- Шаг по времени – $\frac{T_к}{100}$.

В результате расчетов были получены трёхмерные поля гидродинамических величин вблизи комара, а также кинематические характеристики комара.

Анализируя рисунок вертикальной скорости (см. рис. 3), можно заметить, что не смотря на постоянное уменьшение скорости в процессе расчета, ускорение движения в вертикальном направлении составляет всего -0.8 м/с^2, что гораздо меньше ускорение свободного падения. Таким образом, можно говорить о значительной компенсации силы тяжести за счет наличия подъемной силы на машущих крыльях. Также можно отметить колебания вертикальной скорости, что указывает на наличие колебаний подъёмной силы в процессе взмаха крыла.

Помимо постоянного движения отмечаемого по вертикальной (y) координате, наблюдаются также заметные смещения по продольной (x) координате и по боковой (z) (см. рис. 4), данные смещения очевидно связаны с изменением углов ориентации в процессе полета.

Наблюдаются существенные колебания угловой скорости дифферента (см. рис. 5), очевидно это связано с тем, что центр масс расположен на 3 мм точки крепления крыльев, данный факт приводит к появлению значительных моментов по дифференту при взмахе крыльев.

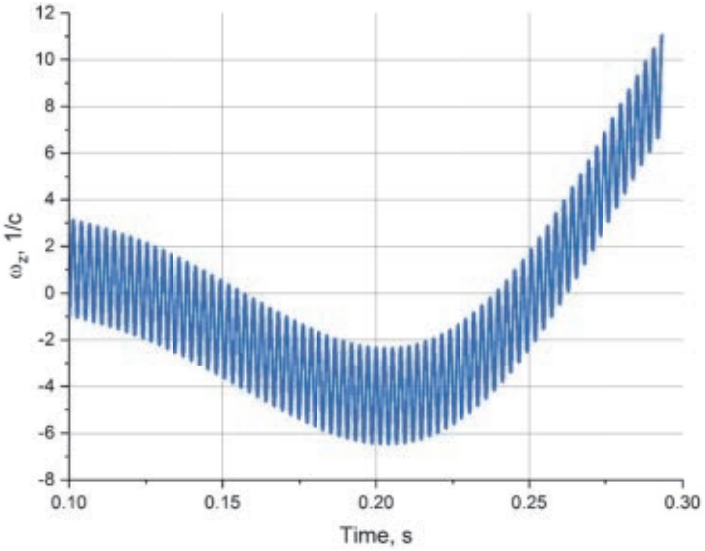


Рисунок 5 — Зависимость угловой скорости дифферента от времени

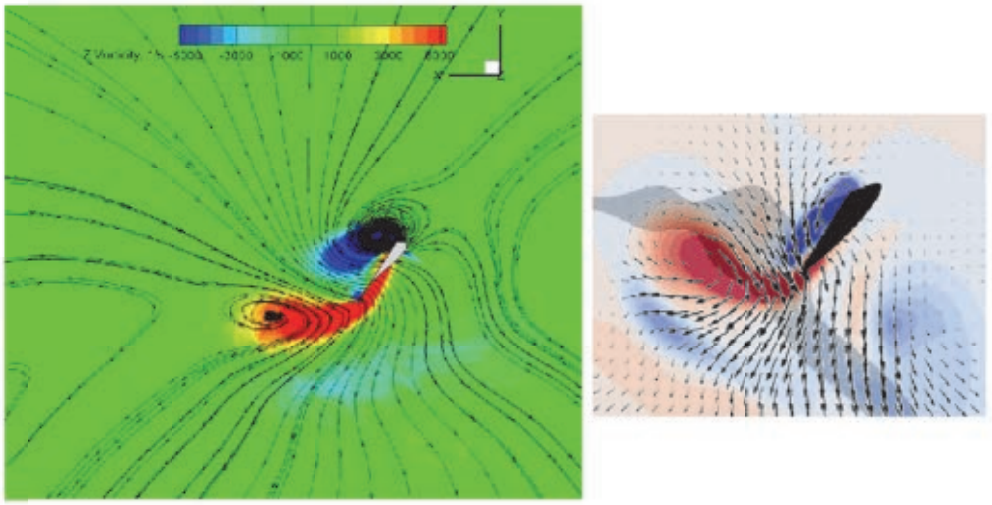


Рисунок 6 — Сравнение полей завихренности в вертикальной продольной плоскости на середине длины крыла с аналогичным полем, полученным в работе [3]

Помимо кинематических характеристик получено хорошее качественное совпадение в гидродинамических полях с работой [3] (см. рис. 6), где представлены как результаты эксперимента, так и CFD расчета с использованием метода накрадывающихся сеток. Возможные отличия могут быть связаны с несколько упрощенной кинематикой крыла используемой в данной работе, в частности зануление изгибных колебаний у основания крыла.

Разработана технология сопряженного расчета динамики жидкости и тела совершавшего взамаховые колебания. Проведена апробация технологии на задаче о полете комара в неподвижной несжимаемой среде в поле силы тяжести. Получено качественное совпадение с результатами статьи [3].

Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России FNRG-2022-0013 1021060307689-7-1.2.1;2.2.2 № 075-01623-22-00 «Исследование путей создания и областей возможного применения биоморфных подводных роботов».

Литература

1. Д. Краснопевцев, А. Шапкин, Новые типы движетелей для плавсредств. Журнал Физика, №1/2006 (2005).

2. Щур, Н. А. Численное исследование свободных и вынужденных колебаний тел в потоке / дис.: канд. физ.-мат. наук : 01.02.05 – СПб., 2008. – 105 с. библиогр. : 93-105.

3. Bomphrey, R., Nakata, T., Phillips, N. et al. Smart wing rotation and trailing-edge vortices enable high frequency mosquito flight. Nature 544, 92–95 (2017). https://doi.org/10.1038/nature21727.

А.А. Иванов

К ВОПРОСУ ОБ УПРАВЛЯЕМОСТИ ГИПЕРИЗБЫТОЧНОГО РЕКОНФИГУРИРУЕМОГО НПА

ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург, al_ivanov@rtc.ru

Аннотация

Рассмотрены вопросы выбора направления осей поворотных импеллеров для ПА с изменяемыми формой внешнего корпуса и относительным расположением избыточного числа импеллеров. Построена расчётная схема на основе псевдообратного преобразования. Выполнено сравнение эффективности решения задачи при интуитивном априорном выборе направлений и выборе на основе рассмотренной модели.

Ключевые слова

Необитаемый подводный аппарат, кинематическая избыточность, реконфигурируемый НПА, гиперизбыточный мобильный робот.

A.A. Ivanov

ON THE ISSUE OF CONTROLLABILITY OF A HYPER-REDUNDANT RECONFIGURABLE UUV

Russian State Scientific Centre for Robotics and Technical Cybernetics, St. Peterburg, Russia, al_ivanov@rtc.ru

Abstract

The questions of choosing the direction of the axes of rotary impellers for UV with a variable shape of the outer body and the relative location of the excess number of impellers are considered. A calculation scheme based on a pseudo-inverse transformation is constructed. The comparison of the efficiency of solving the problem with an intuitive a priori choice of directions and a choice based on the considered model is carried out.

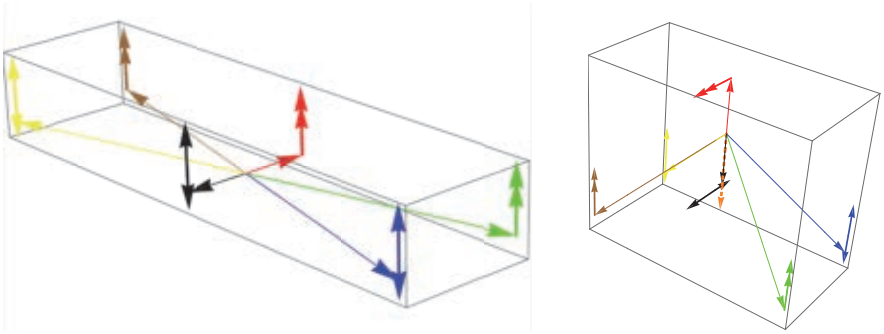
Key words

Uninhabited underwater vehicle, kinematic redundancy, modular robot, reconfigurable UUV, hyper-redundant mobile robot

Настоящая работа выполняется в рамках фундаментальных исследований по развитию теории синтеза оптимального управления гиперизбыточных роботов подводного базирования в условиях непрогнозируемых нестационарных течений и потоков. Гиперизбыточность мобильного робота возникает в условиях, когда число возможных управляющих воздействий, создаваемых приводами-движителями, превосходит достаточное для выполнения перемещения по заданному закону число воздействий. Для погружённого в жидкость твёрдого тела воздействия движителей должны обеспечить парирующий торсёр.

Одним из направлений конструирования НПА является разработка универсальных подводных аппаратов, способных адаптировать форму корпуса и расположение движителей к выполняемой задаче. Требования к необходимым для выполнения различных операций гидродинамическим качествам НПА существенно отличаются. В первом случае необходимо обеспечить управляемое быстрое перемещение с минимумом энергетических затрат, во втором – маневренность, управляемость и устойчивое позиционирование. Для реализации отмеченных качеств весьма полезным представляется наделение аппарата свойствами реконфигурируемости и гиперизбыточности. На примере предложенной ранее концепции конструкции гиперизбыточного реконфигурируемого необитаемого подводного ап-

парата [1, 2] в докладе рассмотрены вопросы анализа управляемости в различных конфигурациях, определяемых как различным размещением, так и изменением направления осей движителей. Проанализированные варианты конфигурации внешнего корпуса НПА приведены на рисунке 1.



а) б)

Рисунок 1 — Конфигурации НПА

Вариант а) предполагает работу НПА в режиме дальнего перемещения, вариант б) предполагается для маневрирования вблизи объектов внимания. В настоящем исследовании рассмотрены вопросы обеспечения управляемости НПА за счёт комбинированного воздействия торсёров, создаваемых движителями.

Уравнения модели

Динамика движения свободного НПА в конфигурации с зафиксированными положениями узлов модулей реконфигурации формы описывается системой шести дифференциальных уравнений динамики твёрдого тела.

В форме Даламбера-Эйлера уравнение динамики твёрдого тела имеет вид (1)

$$-T_{control} + T = 0, \quad (1)$$

где T- главный вектор-торсёр относительно центра масс тела сил инерции и внешних объёмных и поверхностных статических и динамических сил

$$T = T_{volume} + T_{surface_static} + T_{surface_dinamic} + T_{inertial}, \quad (2)$$

$T_{control}$- главный вектор-торсёр создаваемых импеллерами сил и моментов относительно центра масс тела выделен в уравнении отдельно.

Импеллеры создают силу упора и коллинеарный пропорциональный ей по величине момент.

Импеллер с номером k создаёт приложенную в точке r_k направленную по орту e_k силу $F_k = F_k e_k$.

Импеллер k создаёт момент m_k, пропорциональный вектору F_k с коэффициентом K_{mf}.

Центр масс НПА находится в точке r_C. Система отсчёта связана с корпусом центрального движительного модуля и находится в точке O.

Импеллер создаёт воздействие на среду эквивалентное торсёру

$$T_k = g_k \cdot F_k = ((e_k)^T, \left(dK_{mf} \cdot e_k + (r_k - r_C) \cdot e_k\right)^T)^T \cdot F_k \quad (3)$$

Условие управляемости НПА как твёрдого тела воздействиями импеллеров состоит в однозначной связи $\{F_k\}$ и T, т.е. в возможности набора импеллеров сформировать реакцию на произвольное шести компонентное воздействие.

Формально связь $\{F_k\}$ и T может быть записана в виде

$$A.F=T \quad (4)$$

где A - матрица 6xn (n≥6) - набор шестимерных столбцов с компонентами векторов g_k, коллинеарных торсёрам импеллеров относительно центра масс НПА в текущей конфигурации отсеков, $F=\{F_k\}$ - строка длиной n≥6 - набор величин усилий упора, создаваемых импеллерами, $T=\{T_k\}$ - столбец высотой 6 главный торсёр инерциальных, объёмных и поверхностных сил относительно центра масс НПА в текущей конфигурации отсеков.

Условие управляемости НПА как твёрдого тела воздействиями импеллеров состоит в однозначной связи F и T, т.е. матрица A должна иметь полный ранг (rank=6).

Псевдорешение определяется соотношением

$$F=A^{+}\cdot T=A^{T}\cdot(A\cdot A^{T})^{-1}\cdot T, \quad (5)$$

Псевдообратная матрица $A^{+}= A^{T}\cdot(A\cdot A^{T})^{-1}$ имеет размерность 6xn зависит от положения импеллеров, направлений осей рулевых колонок, коэффициента связности упора и момента импеллера, направления ориентации лопаток винта и положения центра масс НПА, т.е. для выбранного взаимного расположения и ориентации корпусов модулей – постоянна.

Направление оси импеллера относительно отсека задаётся вектором e_k , который лежит в плоскости перпендикулярной оси поворота рулевой колонки. В рассматриваемой конструкции на каждом отсеке установлены зеркально два импеллера. При выборе расположения оси Oz системы координат отсека колинеарно осям рулевых колонок импеллеров вектор e_k в этой системе координат имеет только две ненулевые проекции. Произвольное направление силы упора импеллера задаётся через орты системы координат отсека

$$i_k = e_{k,\,x} \text{ и } j_k = e_{k+6,\,y}$$
$$F_k = F_k\, e_k = F_{k,\,x}\, i_k + F_{k,\,y}\, j_k = F_{k,\,x}\, e_{k,\,x} + F_{k+6,y}\, e_{k+6,\,y} \quad (6)$$
$$F_k = \sqrt{((F_{k,\,x})^2+(F_{k+6,\,y})^2)}$$

Направление оси k-ого импеллера в системе координат определяется углом $\psi_k = \arctan2(F_{k,\,x}, F_{k+6,y})$.

Анализ конфигураций НПА

Первая из анализируемых конфигураций имеет условное название ПЛОСКОСТЬ 1. Схематическое расположение импеллеров на рисунке 2 соответствует изображению а) на рисунке 1. На рисунке 2 и далее однонаправленными двойными стрелками обозначены правосторонние винты, разнонаправленными двойными стрелками левосторонние винты. Стрелки, выходящие из одного центра, – условные радиус-векторы точек приложения упоров импеллеров.

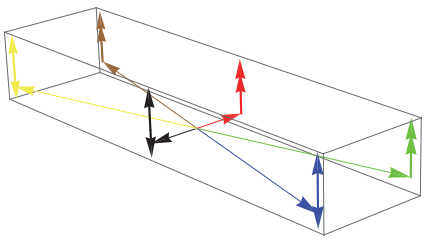


Рисунок 2 — Исходное расположение импеллеров в конфигурации ПЛОСКОСТЬ 1
с параллельным расположением их осей

Для исходного положения, соответствующего рисунку 2, матрица A имеет ранг 3 и НПА с таким расположением импеллеров не может быть управляемым.

Для заданного торсёра внешних сил {10., 10., 10., 1., 1., 1.} подстановка полученного с помощью метода сингулярных разложений псевдорешения (5)

{Fol,For,Fbl,Fbr,Ffl,Fbr}={0,74, 2,59, 1,06, 2,90, 0,43, 2,28} (7)

в уравнение связи F и T даёт результат {0., 10., 0., 1.11, 0.14, 1.}.

Физический смысл результата состоит в достижимости управления перемещением по вертикальной оси Oy и вращением вокруг оси килевой качки Oz. Что не противоречит интуитивному анализу рассматриваемой конфигурации.

Разрешение на поворот импеллеров вокруг осей рулевых колонок соответствует неопределённому направлению их осей и отражено на рисунке 3.

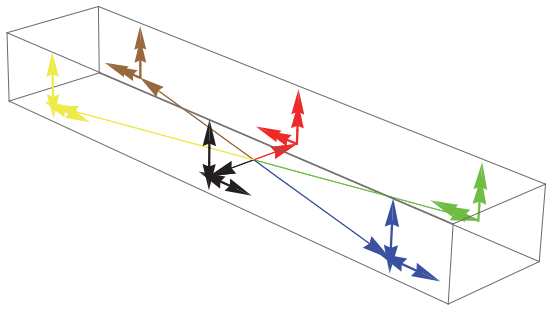


Рисунок 3 — Исходное расположение импеллеров в конфигурации ПЛОСКОСТЬ 1
с параллельным расположением осей рулевых колонок и неопределённым направлением осей импеллеров

Ранг матрицы A размера 6x12 в этом случае равен 5. Это также случай частичной управляемости.

Для заданного торсёра {10., 10., 10., 1., 1., 1.} подстановка полученного с помощью метода сингулярных разложений псевдорешения

{Folx,Forx,Fblx,Fbrx,Fflx,Fbrx,Foly,Fory,Fbly,Fbry,Ffly,Fbry}=
=
={2,38,-0,95, 2,38,-0,95, 2,38, -0,948, 0,74, 2,59, 1,06, 2,90, 0,43, 2,27} (8)

в уравнение связи F и T даёт результат {10.,10.,0.,1.,1.,1.}.

Рассчитанные по псевдорешению модули величин упоров

{Fol,For,Fbl,Fbr,Ffl,Fbr}={2,50, 2,76, 2,61, 3,05, 2,423, 2,47} (9)

Т.е. НПА неуправляем по оси Oz, что также интуитивно предсказуемо.

Следующие конфигурации (ПЛОСКОСТЬ 2) соответствуют расположению пар импеллеров в трёх ортогональных плоскостях. Рассматриваются два варианта фиксированное интуитивное направление и неопределённое направление.

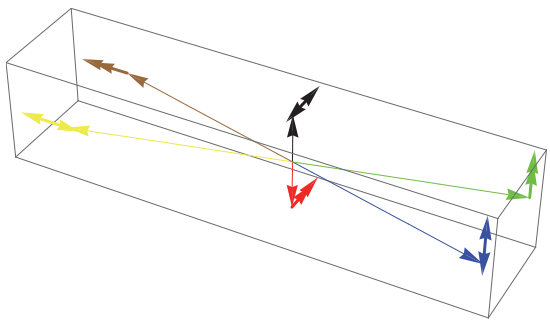
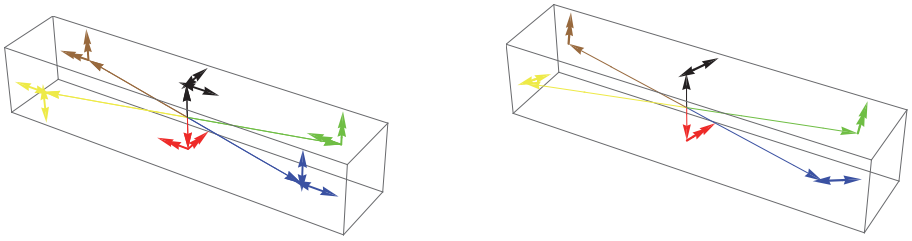


Рисунок 4 — Интуитивное расположение импеллеров в конфигурации ПЛОСКОСТЬ 2

Задаваемый торсёр, необходимая тяга импеллеров с интуитивно выбираемыми направлениями осей импеллеров и генерируемый торсёр в системе координат центрального модуля представлены шести компонентными наборами:
{10., 10., 10., 1., 1., 1.}, {-175., 185., 179.46, -169.46, -29.31, 19.31}, {10., 10., 10., 1., 1., 1.}.



а) б)

Рисунок 5 — Неопределённое расположение импеллеров в конфигурации ПЛОСКОСТЬ 2 а) и рассчитанные направления осей импеллеров б)

Для априори не заданного направления осей импеллеров псевдорешение системы шести уравнений с двенадцатью неизвестными и заданным торсёром внешних сил {10., 10., 10., 1., 1., 1.}. Псевдорешение, определяющее величину упоров и направления осей импеллеров, имеет вид

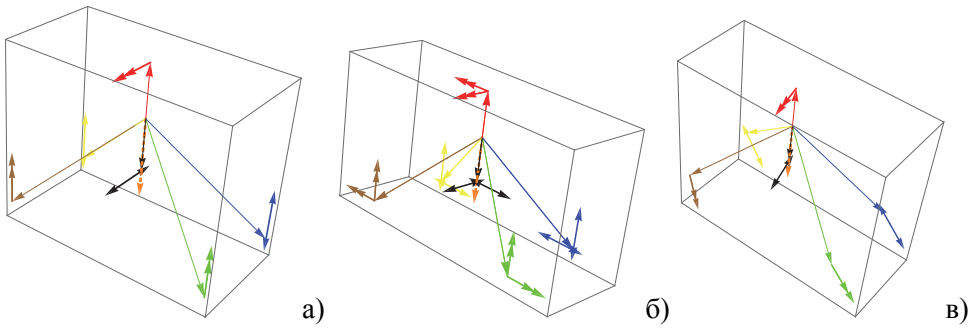
$$\{Folx,Forx,Fblx,Fbrx,Fflx,Fbrx,Foly,Fory,Fbly,Fbry,Ffly,Fbry\}= \\ =\{1,639,-1,693,\ 2,794,-0,538,-1,828,\ 3,777,\ 4,170,\ 5,830,\ 1,223,\ 3,171,\ -2,794,-0,538\}, \quad (10)$$

Рассчитанные по псевдорешению (10) модули величин упоров определяются набором {4,48086, 6,07097, 3,05065, 3,21686, 3,33988, 3,81543}, а генерируемый псевдорешением торсёр совпадает с задаваемый {10., 10., 10., 1., 1., 1.}.

Т.е. НПА управляем, выбор управлений однозначен. На рисунке 5*б* изображены рассчитанные направления осей винтов импеллеров.

Сравнение величин упоров для предопределённых направлений осей импеллеров и рассчитываемых направлений показывает, что желаемый торсёр внешних сил во втором варианте обеспечивается меньшей мощностью приводов.

П-образной конфигурации с условным названием КВАДРО 1 соответствует расположение пар импеллеров в трёх ортогональных плоскостях (рисунок 1). Рассматриваются два варианта фиксированное интуитивное направление и неопределённое направление (рисунки 6*а)* и 6*б)*).



а) б) в)

Рисунок 6 — Интуитивное и неопределённое расположение импеллеров в конфигурации КВАДРО 1

Для исходного положения, соответствующего рисунку 6*а),* матрица А имеет ранг 5 и НПА с таким расположением импеллеров не может быть управляемым. Псевдорешение для системы уравнений существует всегда.

Для заданного торсёра {10., 10., 10., 1., 1., 1.} необходимая тяга импеллеров с интуитивно выбираемыми направлениями осей импеллеров задаётся псевдо решением

{30.,-20. ,8,90625, -11,0937, 6,09375, -13,9062} (11)

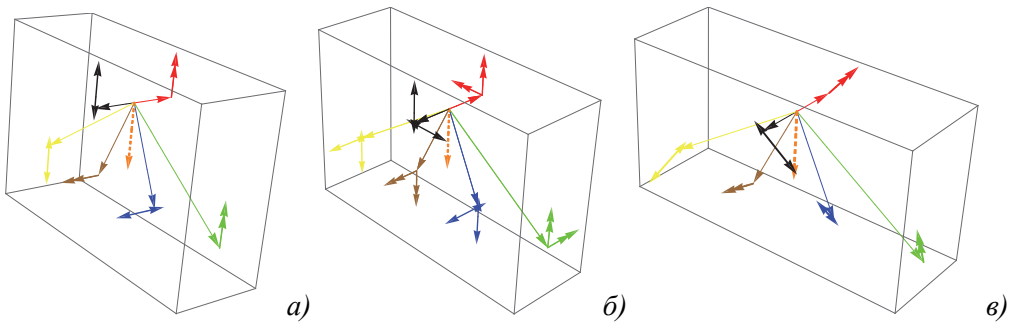
Получаемый подстановкой в уравнение генерируемый торсёр не совпадает с заданным {0.,10.,10.,1.,1.,1.}, что соответствует неуправляемости аппарата в направлении оси цилиндра центрального модуля и не противоречит экспертному анализу конфигурации. Для ориентации осей импеллеров определяемой расчётно ранг матрицы А равен шести, т.е. система с возможностью поворота осей импеллеров является управляемой Для задаваемого торсёра {10., 10., 10., 1., 1., 1.} псевдорешение, определяющее величину упоров и направления осей импеллеров, имеет вид

{Folx,Forx,Fblx,Fbrx,Fflx,Fbrx,Foly,Fory,Fbly,Fbry,Ffly,Fbry}=
={1,78,-0,80, -3,29, 0,42 , 3,29, -0,42, 6,61, 3,40 ,-3,42, -0,44, -4,56,-1,58}. (12)

Рассчитанные по псевдорешению (12) модули величин упоров {6.84, 3.49, 4.75, 0.61, 5.62, 1.64} и генерируемый псевдорешением торсёр {10., 10., 10., 1., 1., 1.}.

То есть НПА управляем, выбор управлений однозначен. На рисунке 6*в)* изображены рассчитанные направления осей винтов импеллеров.

П-образной конфигурации с условным названием КВАДРО 2 соответствует расположению пар импеллеров в трёх ортогональных плоскостях. Рассматриваются два варианта фиксированное интуитивное направление и неопределённое направление (рисунки 7*а* и 7*б*).



а) *б)* *в)*

Рисунок 7 — Интуитивное, неопределённое и рассчитанное расположение импеллеров в конфигурации КВАДРО 2

Для исходного положения, соответствующего рисунку 7, матрица А имеет ранг 5 и НПА с таким расположением импеллеров - неуправляем. Псевдорешение для системы уравнений существует всегда.

Для заданного торсёра {10., 10., 10., 1., 1., 1.} необходимая тяга импеллеров с интуитивно выбираемыми направлениями осей импеллеров задаётся псевдо решением
{-2.50,7.50,3.22,3.26,-1.74,6.78}.

Получаемый подстановкой в уравнение генерируемый торсёр не совпадает с заданным {0.,10.,10.,1.,1.,1.}, что соответствует неуправляемости аппарата в направлении оси цилиндра центрального модуля и не противоречит экспертному анализу конфигурации.

Для ориентации осей импеллеров, определяемой расчётно, ранг матрицы А равен шести, т.е. система с возможностью поворота осей импеллеров является управляемой

Для задаваемого торсёра {10., 10., 10., 1., 1., 1.} псевдорешение, определяющее величину упоров и направления осей импеллеров, имеет вид

{Folx,Forx,Fblx,Fbrx,Fflx,Fbrx,Foly,Fory,Fbly,Fbry,Ffly,Fbry}= (13)
={4,61, -5,39, -2,63 ,-1,95, 3,054, -0,70, -3.29, 6.62, 2.15, 4.69, 1.35, 2.85}

Рассчитанные по псевдорешению (13) модули величин упоров
{6.840, 3.487, 4.745, 0.611, 5.623, 1.638}
и генерируемый псевдорешением торсёр {10., 10., 10., 1., 1., 1.}.

Т.е. НПА управляем, выбор управлений однозначен. На рисунке 7*в)* изображены рассчитанные направления осей винтов импеллеров.

Псевдообратное преобразование матрицы связи управляющих воздействий и торсёра внешних возмущений позволяет формировать задающие управляющие уставки для импеллеров при фиксированном расположении генераторов управлений. Предложенный алгоритм выбора ориентации направлений торсёров может быть применён как для предварительного анализа управляемости подводного робота, так и для оперативного построения управляющих воздействий, парирующих внешние воздействия на НПА, создаваемые потоками жидкости и движением аппарата.

Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России FNRG-2022-0017 1021060307691-2-1.2.1;2.2.2 № 075-01623-22-00 «Развитие теории синтеза оптимального управления гиперизбыточных роботов подводного базирования в условиях непрогнозируемых нестационарных течений и потоков».

Литература

1. Иванов А.А., Шмаков О.А.. Реконфигурируемый гиперизбыточный модульный необитаемый подводный аппарат// Сборник тезисов 32-й Международной научно-технической конференции «ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА». – Санкт-Петербург: ООО «РА ФОРТУНА», 2021. сс. 173-174

2. Иванов А.А.. Моделирование динамики движения реконфигурируемого гиперизбыточного модульного необитаемого подводного аппарата при реконфигурации жидкой среде //Робототехника и техническая кибернетика. т.9, №4, 2021. сс 271-279

А.В. Зуев, А.А. Проценко, А.А. Тимошенко, Д.В. Копылов

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ САМОНАСТРОАИВАЮЩИХСЯ КОРРЕКТИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПОДВОДНЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ БЕСКОЛЛЕКТОРНЫЕ ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток; Институт проблем морских технологий ДВО РАН, г. Владивосток, zuev.av@dvfu.ru, protsenkoAlAn@yandex.ru, timoshenko.aal@mail.ru

Аннотация

В докладе описан метод синтеза самонастраивающихся корректирующих устройств для высокоточного управления электроприводами с бесколлекторными двигателями постоянного тока, которые используются в многозвенных манипуляторах, устанавливаемых на автономных подводных роботах. Предлагаемый метод с помощью наблюдателей с переменной структурой позволяет точно идентифицировать внешние моментные воздействия на выходных валах электроприводов манипуляторов, которые возникают при их движении в вязкой среде и негативно влияют на показатели качества управления. Определённые значения этих моментных воздействий используются для коррекции управляющих сигналов, подаваемых на входы электроприводов, с целью стабилизации их динамических свойств на номинальном уровне. В результате удается значительно снизить динамическую ошибку движения рабочего органа манипулятора по сложным пространственным траекториям при выполнении подводных технологических операций. Эффективность предложенного метода была подтверждена результатами математического моделирования.

Ключевые слова

СКУ, электропривод, подводный манипулятор, наблюдатель, бесколлекторный двигатель постоянного тока.

A.V. Zuev, A.A. Protsenko, A.A. Timoshenko, D.V. Kopylov

METHOD FOR CONSTRUCTION OF SELF-ADJUSTING CORRECTION DEVICES FOR ELECTRIC DRIVES OF UNDERWATER MANIPULATORS WITH BLDC MOTORS

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia; Institute of Marine Technology Problems, FEB RAS, Vladivostok, Russia, zuev.av@dvfu.ru, protsenkoAlAn@yandex.ru, timoshenko.aal@mail.ru

Abstract

The paper describes a method for the synthesis of self-adjusting corrective devices for controlling electric drives with BLDC motors, which are used in multi-link manipulators of underwater vehicles. The proposed approach with the help of a sliding observer makes it possible to accurately identify external torque effects on the output shafts of the manipulator electric drives, which occur when it moves in a viscous environment and negatively affect the accuracy of movements. Values of these torques are used to correct the signal controlling the electric drives in order to compensate for their negative effects and stabilize the dynamic properties of the electric drive at the nominal level, which makes it possible to increase the accuracy of the manipulator. The effectiveness of the proposed method was confirmed by simulation results.

Key words

SCD, underwater manipulator, observer, BLDC motor.

Автономные подводные роботы, оснащенные многозвенными манипуляторами, являются перспективным средством для исследования океана и выполнения различных подводных технологических операций. В настоящее время в устанавливаемых в сочленениях подводных манипуляторов

(ПМ) электроприводах чаще всего используются коллекторные двигатели постоянного тока [1]. Эти двигатели имеют ряд недостатков из-за использования щеточного механизма, который со временем изнашивается и требует обслуживания, что довольно проблематично. Поэтому всё чаще вместо коллекторных используются более долговечные бесколлекторные двигатели постоянного тока (БДПТ) [2, 3], которые, имея меньшие габариты, способны развивать больший момент на валу.

Во время работы на выходные валы электроприводов ПМ действуют внешние моменты нагрузки, обусловленные инерционными свойствами звеньев ПМ, кориолисовыми силами, взаимовлияниями между степенями подвижности ПМ, массой перемещаемого груза и динамическими воздействиями со стороны внешней среды [1, 4, 5]. Это приводит к снижению показателей качества управления перемещением рабочего органа при выполнении заданных технологических операций.

Для решения этой проблемы используются методы синтеза различных самонастраивающихся корректирующих устройств (СКУ) [1, 6], позволяющих стабилизировать динамические свойства приводов на номинальном уровне, однако их использование требует точного определения величин действующих на привод моментов нагрузки. Для расчета этих моментов может использоваться метод Лагранжа-Эйлера [1]. Однако он не позволяет учесть дополнительные моменты, вызванные влиянием внешней вязкой среды, изменением массы перемещаемого груза и размещением дополнительного оборудования на ПМ. Для оценки этих моментов могут быть использованы диагностические наблюдатели (ДН) [6]. В настоящее время уже существуют СКУ с использованием ДН для обнаружения внешних воздействий на электроприводы манипулятора [6, 7], но они предназначены для использования с коллекторными двигателями и не могут быть использованы с БДПТ.

Таким образом, целью данной работы является создание нового метода построения СКУ для электроприводов ПМ на основе БДПТ, которые используют ДН для определения величин внешних моментных воздействий на электроприводы, с последующей их компенсацией.

Описание БДПТ

Рассмотрим ПМ имеющий *n* степеней свободы. Каждая степень свободы управляется электроприводом, который включает БДПТ, редуктор, датчики, измеряющие угол поворота выходного вала редуктора $\Theta_r(t)$ и угловую скорость ротора двигателя $\omega_m(t)$, а также контроллер [2], который переключает напряжения обмоток в зависимости от положения ротора. В данной работе для управления двигателем используется трехфазный инвертор (см. рис. 1). Моментное воздействие $P(t)$, обусловленное взаимовлияниями в степенях подвижности ПМ, можно представить в следующем виде:

$$P(t) = \left(H(t) + \widehat{H}(t)\right)\ddot{q}(t) + \left(h(t) + \hat{h}(t)\right)\dot{q}(t) + \left(M_{\text{вн}}(t) + \widehat{M}_{\text{вн}}(t)\right), \quad (1)$$

где $H(t)$ – компонента, характеризующая инерционные свойства соответствующей степени подвижности ПМ; $h(t)$– компонента кориолисовых и скоростных сил; $M_{\text{вн}}(t)$ – моментное воздействие, учитывающее эффекты взаимовлияния между всеми степенями подвижности ПМ в процессе его движения; $\ddot{q}(t)$ и $\dot{q}(t)$– обобщенные ускорения и скорости ПМ; $\widehat{H}(t)$, $\hat{h}(t)$ и $\widehat{M}_{\text{вн}}(t)$– неизвестные нелинейные функции, обусловленные отклонением динамических параметров звеньев ПМ от своих номинальных значений, изменением массы груза и влиянием внешней вязкой среды. Предполагается, что известны возможные диапазоны изменения этих функций.

Известно, что для любых кинематических схем ПМ с известными номинальными значениями параметров звеньев и массы перемещаемого груза могут быть получены точные аналитические выражения для компонент $H(t)$, $h(t)$ и $M_{\text{вн}}(t)$ [1]. Однако в процессе работы ПМ зачастую перемещают объекты с неизвестной массой, на звенья ПМ может дополнительно устанавливаться различное навесное оборудование, а также на звенья ПМ оказывает дополнительное влияние вязкая окружающая среда. Всё это приводит к появлению ненулевых неизвестных компонент $\widehat{H}(t)$, $\hat{h}(t)$ и $\widehat{M}_{\text{вн}}(t)$,

негативно влияющих на точность работы ПМ. С учетом этого модель электропривода в матричном виде можно представить как:

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + Bu(t) + W(t) + Dd(t), \qquad (2)$$

$$y(t) = Cx,$$

где $x(t) = [I_a(t) \quad I_b(t) \quad I_c(t) \quad \omega_m(t) \quad \Theta_r(t)]^T$; $u(t) = [u_a(t) \quad u_b(t) \quad u_c(t)]^T$;

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_f}{L_f} & 0 & 0 & \frac{-k_e F(\Theta_e(t))}{L_f} & 0 \\ 0 & -\frac{R_f}{L_f} & 0 & \frac{-k_e F\left(\Theta_e(t) - \frac{2\pi}{3}\right)}{L_f} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_f}{L_f} & \frac{-k_e F\left(\Theta_e(t) - \frac{4\pi}{3}\right)}{L_f} & 0 \\ \frac{k_e F(\Theta_e(t))}{J_\Sigma + H^*(t)} & \frac{k_e F\left(\Theta_e(t) - \frac{2\pi}{3}\right)}{J_\Sigma + H^*(t)} & \frac{k_e F\left(\Theta_e(t) - \frac{4\pi}{3}\right)}{J_\Sigma + H^*(t)} & -\frac{k_f + h^*(t)}{J_\Sigma + H^*(t)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{i_r} & 0 \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_f} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; W(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{M^*_{\text{вн}}(t) + M_{\text{стр}}(t)}{J_\Sigma + H^*(t)} \\ 0 \end{bmatrix}; D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^T; y(t) = [\omega_m(t) \quad \Theta_r(t)]^T;$$

$u_a(t)$, $u_b(t), u_c(t)$ – напряжения на фазах двигателя; $I_a(t), I_b(t), I_c(t)$ – токи фаз двигателя; R_f – сопротивление одной фазы двигателя; L_f – индуктивность одной фазы двигателя; J_Σ – суммарный момент инерции ротора двигателя и подвижных частей редуктора; k_f – коэффициент вязкого трения; k_e – коэффициент противо-ЭДС; p – количество полюсов двигателя; i_r – передаточное отношение редуктора; $F(\Theta_e)$ – функция, возвращающая трапецеидальную форму сигнала (см. рис. 2); $\Theta_e(t) = i_r \frac{p}{2} \Theta_r(t)$; $M_{\text{стр}}(t) = M_{\text{тр}} sign(\omega_m(t))$; $M_{\text{тр}}$ – величина момента сухого трения; $H^*(t) = H(t)/i_r^2$, $h^*(t) = h(t)/i_r^2$, $M^*_{\text{вн}}(t) = M_{\text{вн}}(t)/i_r$; функция $d(t)$, характеризующая влияние неизвестных внешних воздействий на электропривод может быть выражена как:

$$d(t) = -\frac{I_a(t) k_e F(\Theta_e(t)) \hat{H}^*(t) + I_b(t) k_e F\left(\Theta_e(t) - \frac{2\pi}{3}\right) \hat{H}^*(t)}{\left(J_\Sigma + H^*(t)\right)\left(J_\Sigma + H^*(t) + \hat{H}^*(t)\right)} -$$

$$-\frac{I_c(t) k_e F\left(\Theta_e(t) - \frac{4\pi}{3}\right) \hat{H}^*(t)}{\left(J_\Sigma + H^*(t)\right)\left(J_\Sigma + H^*(t) + \hat{H}^*(t)\right)} - \frac{\left(H^*(t)\hat{h}^*(t) + J_\Sigma \hat{h}^*(t) - \hat{H}^*(t)h^*(t) - \hat{H}^*(t)k_f\right)\omega_m(t)}{\left(J_\Sigma + H^*(t)\right)\left(J_\Sigma + H^*(t) + \hat{H}^*(t)\right)} - \qquad (3)$$

$$-\frac{\left(J_\Sigma + H^*(t)\right)\hat{M}^*_{\text{вн}}(t) - \left(M^*_{\text{вн}}(t) + M_{\text{стр}}(t)\right)\hat{H}^*(t)}{\left(J_\Sigma + H^*(t)\right)\left(J_\Sigma + H^*(t) + \hat{H}^*(t)\right)},$$

где $\hat{H}^*(t) = \hat{H}(t)/i_r^2$, $\hat{h}^*(t) = \hat{h}(t)/i_r^2$, $\hat{M}^*_{\text{вн}}(t) = \hat{M}_{\text{вн}}(t)/i_r$.

Уравнение (3) можно преобразовать, выделив внешний момент $\widetilde{M}_{\text{вн}}(t)$, действующий на вал электродвигателя при появлении любых ненулевых составляющих $\widehat{H}(t)$, $\hat{h}(t)$, $\widehat{M}_{\text{вн}}(t)$:

$$d(t) = \frac{\widetilde{M}_{\text{вн}}(t)}{J_{\Sigma} + H^{*}(t)}.$$

Чтобы обеспечить неизменную точность выполнения операций, функцию $\widetilde{M}_{\text{вн}}(t)$ необходимо своевременно идентифицировать с помощью ДН, а её воздействие на динамику электроприводов ПМ компенсировать.

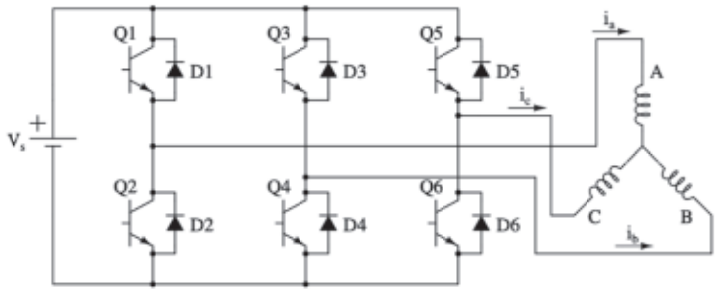


Рисунок 1 — Трёхфазный инвертор напряжения

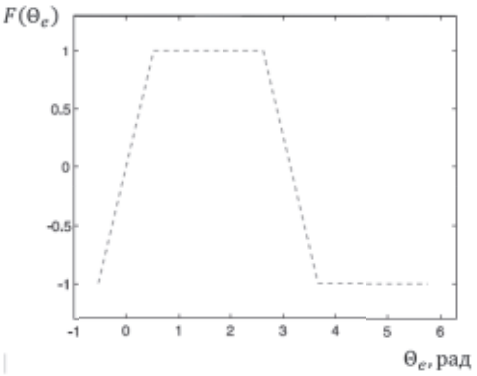


Рисунок 2 — Трапецеидальная функция

Описание диагностического наблюдателя

В настоящее время одним из перспективных разновидностей ДН для идентификации неизвестных параметров и внешних возмущений являются наблюдатели с переменной структурой (НПС). Описанные в работах [8, 9] методы построения таких наблюдателей предполагают наложения на систему (1) ряда существенных ограничений и построения ДН полного порядка, что усложняет процедуру точной идентификации функции $\widetilde{M}_{\text{вн}}(t)$. Поэтому для решения этой задачи был использован НПС, построенный на основе редуцированной модели системы (2). Подробное описание процедуры синтеза таких наблюдателей приведено в работе [10]. В общем виде такие модели будут описываться уравнениями [10]

$$\dot{x}_{*}(t) = A_{*}x_{*}(t) + B_{*}u(t) + J_{*}y(t) + W_{*}(t) + \Phi D d(t), \quad y_{*}(t) = C_{*}x_{*}(t), \tag{4}$$

где $x_{*}(t)$, $y_{*}(t)$ - состояние и выход редуцированной модели, соответственно; A_{*} – матрица динамических свойств; B_{*} – вектор при управлении $u\ (t)$; $W_{*}(t)$ - вектор внешних возмущений; J_{*}– матрица при векторе выхода; R_{*}, C_{*}– векторы-строки; k – количество переменных состояния редуцированной модели.

Полагается [10], что при отсутствии дополнительных внешних воздействий выполняются равенства $x_{*}(t) = \Phi x(t)$ и $y_{*}(t) = R_{*}y(t)$ для матриц $\Phi \in R^{k\times 2}$ и вектора R_{*}, удовлетворяющих условиям

$$\Phi A = A_{*}\Phi + J_{*}C, \quad R_{*}C_{*} = C\Phi, \quad B_{*} = \Phi B, \quad W_{*} = \Phi W. \tag{5}$$

Для того чтобы модель (4) была чувствительна к функции $d(t)$, необходимо выполнение условия $\Phi D \neq 0$. Матрицы A_{*}, B_{*}, J_{*}, W_{*}, C_{*}, R_{*} и Φ могут быть найдены на основании соотношений (5) и известного алгоритма [10]: $R_{*} = [1 \quad 0], C_{*} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1]$,

$$A_* = \begin{bmatrix} -\frac{R_f}{L_f} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_f}{L_f} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_f}{L_f} & 0 \\ \frac{k_e F(\Theta_e(t))}{J_\Sigma + H^*(t)} & \frac{k_e F\left(\Theta_e(t)-\frac{2\pi}{3}\right)}{J_\Sigma + H^*(t)} & \frac{k_e F\left(\Theta_e(t)-\frac{4\pi}{3}\right)}{J_\Sigma + H^*(t)} & 0 \end{bmatrix},$$

$$J = \begin{bmatrix} \frac{-k_e F(\Theta_e(t))}{L_f} & 0 \\ \frac{-k_e F\left(\Theta_e(t)-\frac{2\pi}{3}\right)}{L_f} & 0 \\ \frac{-k_e F\left(\Theta_e(t)-\frac{4\pi}{3}\right)}{L_f} & 0 \\ -\frac{k_f + h^*(t)}{J_\Sigma + H(t)} & 0 \end{bmatrix}, \quad B_* = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_f} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \Phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$W_*(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{M^*_{\text{вн}}(t) + M_{\text{стр}}(t)}{J_\Sigma + H^*(t)} \end{bmatrix}.$$

НПС, построенный на основе модели (4) будет иметь вид:

$$\dot{x}_*(t) = A_* x_*(t) + B_* u_*(t) + W_*(t) + Jy(t) + K_* e_y(t) + Vv(t), \#(6)$$

$$y_*(t) = C_* x_*(t), \qquad e_y(t) = R_* y(t) - y_*(t),$$

где K_* – матрица-столбец коэффициентов обратной связи наблюдателя; $e_y(t)$ – невязка, формируемая НПС; $V = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1]^T$ – матрица-столбец, указывающая на определяемую в системе неизвестную величину; функция v [8] имеет вид $v(t) = g\frac{e_y(t)}{|e_y(t)|+\delta}$, g – положительная константа, δ – малый положительный скаляр. В результате значение функции $\widetilde{M}_{\text{вн}}(t)$ можно определить как [8]:

$$\widetilde{M}_{\text{вн}}(t) = v(t)\left(J_\Sigma + H^*(t)\right). \qquad (7)$$

Далее полученное значение $\widetilde{M}_{\text{вн}}(t)$ будет использовано в СКУ для компенсации влияния дополнительного момента на работу ПМ.

Синтез СКУ

При создании СКУ для электроприводов ПМ целесообразно использовать метод синтеза [1], который с помощью специального закона изменения управляющего сигнала $U(t)$, подающегося на вход инвертора, позволяет придать приводам желаемые динамические свойства, стабилизируя их параметры, в том числе и при возникновении ненулевой функции $\widetilde{M}_{\text{вн}}(t)$. Далее будет показан вывод такого закона изменения $U(t)$.

Переписав четвёртое уравнение системы (2) можно получить:

$$k_a I_a(t) + k_b I_b(t) + k_c I_c(t) = \left(J_\Sigma + H^*(t)\right)\ddot{\Theta}_m(t) + \\ +\left(k_f + h^*(t)\right)\dot{\Theta}_m(t) + M^*_{\text{вн}}(t) + \widetilde{M}_{\text{вн}}(t) + M_{\text{стр}}(t), \tag{8}$$

где $k_a = k_e F\left(\Theta_e(t)\right)$; $k_b = k_e F\left(\Theta_e(t) - \frac{2\pi}{3}\right)$; $k_c = k_e F\left(\Theta_e(t) - \frac{4\pi}{3}\right)$; $\Theta_m(t) = \frac{2}{p}\Theta_e(t)$.

Продифференцировав обе части (8), получим:

$$k_a \dot{I}_a(t) + k_b \dot{I}_b(t) + k_c \dot{I}_c(t) = \dot{H}^*(t)\ddot{\Theta}_m(t) + \left(J_\Sigma + H^*(t)\right)\dddot{\Theta}_m(t) + \\ + \left(k_f + h^*(t)\right)\ddot{\Theta}_m(t) + \dot{h}^*(t)\dot{\Theta}_m(t) + \dot{M}^*_{\text{вн}}(t) + \dot{\widetilde{M}}_{\text{вн}}(t) + \dot{M}_{\text{стр}}(t). \tag{9}$$

Умножив первые три уравнения системы (2) на k_a, k_b и k_c соответственно и сложив полученные выражения, можно получить:

$$L_f\left(k_a \dot{I}_a(t) + k_b \dot{I}_b(t) + k_c \dot{I}_c(t)\right) + R_f\left(k_a I_a(t) + k_b I_b(t) + k_c I_c(t)\right) + \\ +\dot{\Theta}_m(t)\left(k_a^2 + k_b^2 + k_c^2\right) = u_a(t)k_a + u_b(t)k_b + u_c(t)k_c. \tag{10}$$

Подставив правую часть (9) в (10), можно получить одно дифференциальное уравнение, описывающее динамику электропривода:

$$L_f(\dddot{\Theta}_m(t)\left(J_\Sigma + H^*(t)\right) + \ddot{\Theta}_m(t)\left(k_f + 2h^*(t)\right) + \dot{h}^*(t)\dot{\Theta}_m(t) + \\ +\dot{M}^*_{\text{вн}}(t) + \dot{\widetilde{M}}_{\text{вн}}(t) + \dot{M}_{\text{стр}}(t)) + R_f((J_\Sigma + H^*(t))\ddot{\Theta}_m(t) + \\ + \left(k_f + h^*(t)\right)\dot{\Theta}_m(t) + M^*_{\text{вн}}(t) + \widetilde{M}_{\text{вн}}(t) + M_{\text{стр}}(t)) + \dot{\Theta}_m(t)\left(k_a^2 + k_b^2 + k_c^2\right) = u_s. \tag{11}$$

где $u_s(t) = k_a u_a(t) + k_b u_b(t) + k_c u_c(t)$.

Далее необходимо выразить из (11) старшую производную $\dddot{\Theta}_m(t)$:

$$\dddot{\Theta}_m(t) = -\ddot{\Theta}_m(t)\frac{2h_i^*(t)L_f + k_f L_f + R\left(J_\Sigma + H_i^*(t)\right)}{L_f\left(J_\Sigma + H^*(t)\right)} - \\ -\dot{\Theta}_m(t)\frac{L_f \dot{h_i}^*(t) + R_f\left(k_f + h_i^*(t)\right) + k_a^2 + k_b^2 + k_c^2}{L_f\left(J_\Sigma + H_i^*(t)\right)} - \\ -\frac{L_f\left(\dot{M}^*_{\text{вн}i}(t) + \dot{\widetilde{M}}_{\text{вн}i}(t) + \dot{M}_{\text{стр}}(t)\right) + R_f\left(M^*_{\text{вн}i}(t) + \widetilde{M}_{\text{вн}i}(t) + M_{\text{стр}}(t)\right)}{L_f\left(J_\Sigma + H_i^*(t)\right)} + \frac{u_s}{L_f\left(J_\Sigma + H_i^*(t)\right)}. \tag{12}$$

Исключив из (12) все переменные и неизвестные параметры, к которым относятся: вязкое трение, сухое трение и внешний момент, можно получить дифференциальное уравнение, описывающее желаемую динамику электропривода:

$$\dddot{\Theta}_m(t) = -\ddot{\Theta}_m(t)\frac{R}{L_f} - \dot{\Theta}_m(t)\frac{k_a^2 + k_b^2 + k_c^2}{L_f J_\Sigma} + \frac{\overline{u}_s}{L_f J_\Sigma}, \tag{13}$$

где $\bar{u}_s(t) = k_a\bar{u}_a(t) + k_b\bar{u}_b(t) + k_c\bar{u}_c(t)$; $\bar{u}_a$, $\bar{u}_b$, $\bar{u}_c$ – напряжения на обмотках для электропривода с номинальными параметрами. Далее, если приравнять правые части выражений (12) и (13) и выразить величину $u_s(t)$ можно получить:

$$u_s(t) = \frac{J_\Sigma + H^*(t)}{J_\Sigma}\bar{u}_s(t) + L_f\left(2h^*(t) + k_f\right)\ddot{\Theta}_m(t) + (L_f\dot{h}^*(t) +$$

$$+R_f\left(h^* + k_f\right) + (k_a^2 + k_b^2 + k_c^2)(1 - \tfrac{J_\Sigma + H^*(t)}{J_\Sigma}))\dot{\Theta}_m(t) + \qquad (14)$$

$$+L_f\left(\dot{M}^*_{\text{вн}}(t) + \dot{\widetilde{M}}_{\text{вн}}(t) + \dot{M}_{\text{стр}}(t)\right) + R_f\left(M^*_{\text{вн}}(t) + \widetilde{M}_{\text{вн}}(t) + M_{\text{стр}}(t)\right).$$

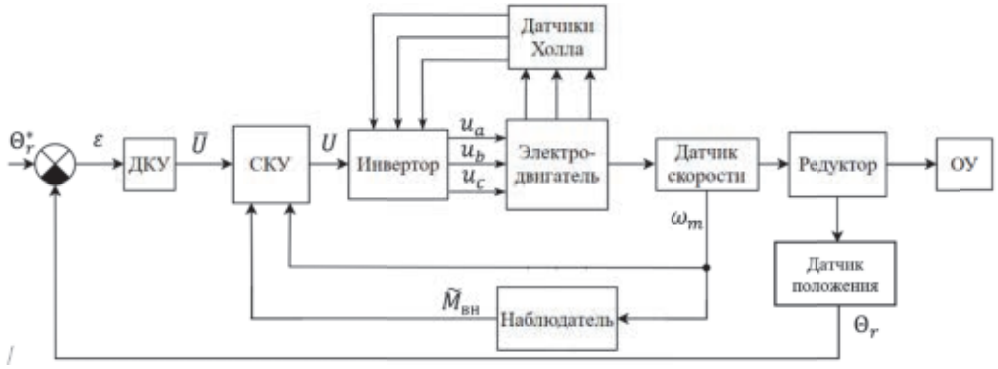
С учётом того, что $u_s(t) = k_a u_a(t) + k_b u_b(t) + k_c u_c(t) = k_a F_a(\Theta_e)U(t) + k_b F_b(\Theta_e)U(t) + k_c F_c(\Theta_e)U(t)$ и $\bar{u}_s(t) = k_a\bar{u}_a(t) + k_b\bar{u}_b(t) + k_c\bar{u}_c(t) = k_a F_a(\Theta_e)\bar{U}(t) + k_b F_b(\Theta_e)\bar{U}(t) + k_c F_c(t\Theta_e)\bar{U}(t)$, где $\bar{U}(t)$ – управляющий сигнал для привода с номинальными параметрами, и выражения (14), искомый закон управления может быть найден как:

$$U(t) = \bar{U}(t)\frac{u_s(t)}{\bar{u}_s(t)} = \bar{U}(t)(\frac{J_\Sigma + H^*(t)}{J_\Sigma}\bar{u}_s(t) + L_f\left(2h^*(t) + k_f\right)\ddot{\Theta}_m(t) + (L_f\dot{h}^*(t) +$$

$$+R_f\left(h^*(t) + k_f\right) + (k_a^2 + k_b^2 + k_c^2)(1 - \tfrac{J_\Sigma + H^*(t)}{J_\Sigma}))\dot{\Theta}_m(t) + \qquad (15)$$

$$+L_f\left(\dot{M}^*_{\text{вн}}(t) + \dot{\widetilde{M}}_{\text{вн}}(t) + \dot{M}_{\text{стр}}(t)\right) + R_f\left(M^*_{\text{вн}}(t) + \widetilde{M}_{\text{вн}}(t) + M_{\text{стр}}(t)\right))/\bar{u}_s(t).$$

Полученный закон управления (15) позволяет полностью компенсировать негативные последствия появления момента $\widetilde{M}_{\text{вн}}(t)$ и стабилизировать параметры электропривода на номинальном уровне. Структурная схема работы электропривода с предлагаемым СКУ показана на рисунке 3.



ДКУ – дополнительное корректирующее устройство (ПИД-регулятор); *ОУ* – объект управления

Рисунок 3 — Структурная схема электропривода ПМ

Результаты моделирования

Для исследования работоспособности синтезированного СКУ было проведено моделирование работы трехстепенного манипулятора с кинематической схемой типа PUMA [1]. Траектория, по которой перемещается рабочий орган манипулятора показана на рисунке 4.

При моделировании были использованы следующие параметры ПМ [1]: $l_1 = 0.5$ м, $l_2 = 0.5$ м, $l_3 = 0.4$ м, $l_i^* = \frac{l_i}{2}$, $l_{A1} = 0.1$ м, $l_{A2} = 0.05$ м, $l_{A3} = 0.1$ м, $m_1 = 30$ кг, $m_2 = 3$ кг, $m_3 = 3$кг, $m_г = 0.5$ кг, $J_{S_1} = 0.32$ кг $\cdot$ м^2, $J_{S_2} = 0.0047$ кг $\cdot$ м^2, $J_{N_2} = 0.12$ кг $\cdot$ м^2, $J_{S_3} = 0.004$ кг $\cdot$ м^2, $J_{N_3} = 0.067$ кг $\cdot$ м^2.

Для моделирования электропривода использованы параметры: $R_f = 0.2495$ Ом, $L_f = 0.00313$ Гн, $J_\Sigma = 3.5 \cdot 10^{-5}$кг $\cdot$ м^2, $k_f = 1.4 \cdot 10^{-5}$, $M_{\text{тр}} = 0.02$ Н $\cdot$ м, $k_e = 0.585185, p = 8, i_r = 160$.

Появление дополнительных внешних моментов, действующих на электроприводы ПМ, имитировалось введением величин $\widehat{H}(t) = 0.5H(t)$; $\hat{h}(t) = 0.5h(t)$; $\widehat{M}_{вн}(t) = 0.8M_{вн}(t)$. В качестве ДКУ использованы ПИД-регуляторы с коэффициентами: $k_p = 1500, k_i = 11, k_d = 30$.

На рисунке 5 приведены законы изменения динамических ошибок ε движения рабочего органа манипулятора по заданной траектории: без использования в СКУ (кривая 1); с использованием СКУ, но без учёта влияния дополнительного момента нагрузки $\widetilde{M}_{\text{вн}}(t)$ (кривая 2); с использованием СКУ и диагностических наблюдателей, определяющих неизвестные воздействия при движении манипулятора в вязкой среде (кривая 3). При этом величина динамической ошибки ε без использования СКУ достигает значения в 9.4 мм, а с использованием СКУ – не превышает значения 8.5 мм. При использовании СКУ вместе с ДН значение ошибки снижается на 39 % и составляет около 5.8 мм.

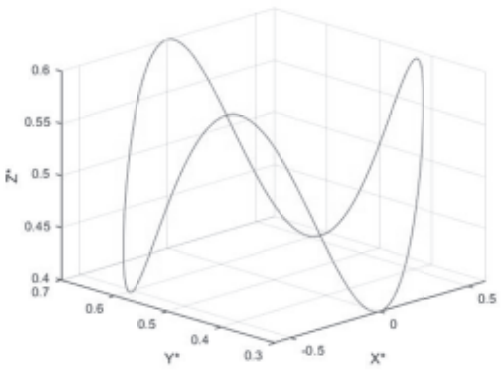


Рисунок 4 — Заданная траектория движения рабочего органа ПМ

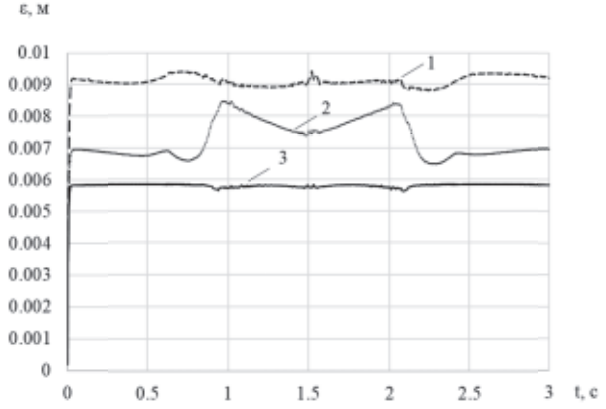


Рисунок 5 — Величины динамических ошибок движения рабочего органа ПМ по заданной траектории

Разработан метод построения СКУ для управления электроприводами ПМ, оснащенных БДПТ, который позволяет с помощью наблюдателей с переменной структуры точно идентифицировать внешние моментные воздействия на выходных валах этих электроприводов, возникающих при движении многозвенного манипулятора в вязкой среде. Определённые значения этих воздействий используются СКУ для коррекции управляющих сигналов электроприводов с целью стабилизации динамических свойств электроприводов на номинальном уровне, что позволяет повысить точность работы ПМ. Эффективность предложенной системы была подтверждена результатами моделирования.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 22-29-01303.

Литература

1. Филаретов В.Ф. Самонастраивающиеся системы управления приводами манипуляторов // Владивосток: Изд-во ДВГТУ. – 2000. – 304 с.

2. Shane W. Colton design and prototyping methods for brushless motors and motor control // Massachusetts Institute of Technology. – 2010. – P. 6-30.

3. Hernández-Guzmán V.M., Orrante-Sakanassi J. PID control of robot manipulators actuated by BLDC motors // International Journal of Control. – 2021. – P. 267-276.

4. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю. Система автоматической стабилизации подводного аппарата в режиме зависания при работающем многозвенном манипуляторе // XII Всероссийское совещание по проблемам управления. – 2014. – С. 3570-3582.

5. Куафе Ф. Взаимодействие робота с внешней средой // М.: Мир. – 1985. – 285 с.

6. Filaretov V.F., Zhirabok A.N., Zuev A., Protcenko A. The development of the faults accommodation system for actuators of multilink manipulators // Proc. of the 23rd DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation. – 2012. – P. 575-578.

7. Зуев А.В., Жирабок А.Н., Филаретов В.Ф., Проценко А.А. Идентификация дефектов в нестационарных системах на основе скользящих наблюдателей // Мехатроника, автоматизация, управление. – Т. 22. – № 12. – 2021. – С. 625-633.

8. Edwards C., Spurgeon S., Patton R. Sliding mode observers for fault detection and isolation // Automatica. – Vol. 36. –2000. – P. 541-553.

9. He J., Zhang C. Fault Reconstruction Based on Sliding Mode Observer for Nonlinear Systems // Mathematical Problems in Engineering. – 2012. – P. 1-22.

10.Жирабок А.Н., Зуев А.В., Шумский А.Е. Методы диагностирования линейных систем на основе скользящих наблюдателей // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2019. – № 6. – С. 73-89.

В.В. Чернышев[1,2], В.В. Арыканцев[1,3], Я.В. Калинин[2,3],
А.Х. Насари Задеган[1], Н.Г. Шаронов[1]

ОТРАБОТКА МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ШАГАЮЩИХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЕРЕДВИГАЮЩИХСЯ ПО ДНУ

[1]Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, vad.chernyshev@mail.ru;
[2]Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия, Волгоград;
[3]Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, Москва

Аннотация

В условия морского дна, отличающегося сложным рельефом и низкой несущей способностью грунтов, шагающие машины и роботы обладают более высокими тяговыми свойствами и проходимостью в сравнении с традиционными колесными и гусеничными машинами. С другой стороны, шагающие машины отличаются более сложным управлением. В докладе обсуждаются результаты подводных испытаний шестиногого шагающего аппарата МАК-1 с движителями циклового типа. Аппарат разработан для исследования шагающего способа передвижения в подводных условиях. Испытания проводились на Белом море и озере Байкал. Часть подводных экспериментов проводилась в подледных условиях. Основная задача подводных испытаний – отработка методов управления движением подводных шагающих роботов с учетом специфических особенностей подводных условий. Также исследовались возможности циклового шагающего движителя аппарата по самоадаптации и самоуправлению в условиях неорганизованной поверхности морского дна. По результатам испытаний предложен ряд возможных решений по управлению движением подводного шагающего робота в условиях неполного и неоднозначного представления о рабочем пространстве и о текущей ситуации. Результаты работы могут быть востребованы при разработке робототехнических систем, предназначенных для различного вида подводно-технических работ и для новых промышленных технологий освоения ресурсов морского дна.

Ключевые слова

Подводные аппараты, машины, передвигающиеся по дну, робототехнический комплекс, мобильный робот, подводно-технические работы, информационно-измерительная и управляющая система, сенсоры; шагающий движитель, подводные испытания.

V.V. Chernyshev[1,2], V.V. Arykantsev[1,3], Ya.V. Kalinin[2,3],
A.H. Nasari Zadegan[1], N.G. Sharonov[1]

DEVELOPMENT OF MOTION CONTROL METHODS FOR WALKING ROBOTIC SYSTEMS MOVING ALONG THE BOTTOM

[1]Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia, vad.chernyshev@mail.ru; [2]All-Russian Research Institute of Irrigated Agriculture, Volgograd, Russia; [3]The Federal State Unitary Enterprise Dukhov Automatics Research Institute, Moscow, Russia

Abstract

In the conditions of the seabed, which is characterized by difficult terrain and low bearing capacity of soils, walking machines and robots have higher traction properties and maneuverability compared to traditional wheeled and tracked vehicles. On the other hand, walking machines are more difficult to control. The report discusses the results of underwater tests of the 6-legged walking vehicle MAK-1 with cyclic type of movers. The device is designed to research the walking mode of movement in underwater conditions. Tests were carried out on the White Sea and Lake Baikal. Some of the underwater experiments were carried out under ice. The main task of underwater testing is to develop methods for controlling the movement of un-

derwater walking robots, taking into account the specific features of underwater conditions. The possibilities of the cyclic walking movers of the device for self-adaptation and self-control in the conditions of an unorganized seabed surface were also studied. Based on the test results, a number of possible solutions for controlling the movement of an underwater walking robot in conditions of an incomplete and ambiguous understanding of the working space and the current situation are proposed. The results of the work can be in demand in the development of robotic systems designed for various types of underwater technical work and for new industrial technologies for the development of seabed resources.

Key words

Underwater units, bottom-moved machines, robotic system, mobile robot, subsea technical works, information measuring and control system, sensors, walking mover, subsea tests.

Необитаемые роботизированные подводные аппараты находят все большее применение при проведении подводно-технических работ и исследовании морей и океанов [1–3]. Большинство подводных роботов относятся к аппаратам плавающего типа. Вместе с тем, в ряде случаев, удобнее использовать роботы, передвигающиеся по дну. Например, при проведении грунтовых работ на дне, подводном бурении, разработке подводных месторождений твердых полезных ископаемых и др. Существующие робототехнические системы передвигающиеся по дну (подводные бульдозеры, кабелеукладчики, донные добычные самоходные устройства и др.) имеют, как правило, гусеничный или колесный движитель [4]. Вместе с тем в условиях водонасыщенных грунтов и сложного рельефа морского дна, традиционные типы движителей зачастую становятся неэффективными [5, 6]. Для подводных грунтов соотношение коэффициентов сцепления и коэффициентов сопротивления движению таково, что даже гусеничный движитель не позволяет реализовать значительных тяговых усилий. Поэтому даже гусеничные машины могут работать в подводных условиях только на сравнительно ровных и достаточно плотных грунтах с небольшими уклонами дна. Причем и здесь они могут двигаться лишь на пределе сцепления. Маневренность подводных гусеничных машин так же ограничена – поворот с малыми радиусами реализуется по сцеплению не на всех грунтах.

Шагающие машины в сравнении с гусеничными обладают лучшей грунтовой и профильной проходимостью [7, 8]. Также они могут обеспечить более высокие тягово-сцепные свойства. Для шагающих машин, в отличие от колесных и гусеничных, грунт не является препятствием для передвижения (сила тяги равна силе сцепления), а лишь требует необходимых затрат мощности на его прессование [9]. Кроме того, на слабонесущих грунтах из-за большой глубины следовой колеи аналог коэффициента сцепления для шагающих машин может быть >>1 [10]. Коэффициент сцепления у гусеничных машин, для сравнения, даже на хороших грунтах составляет не более 0,8–1. С другой стороны, шагающие машины существенно сложнее в управлении, т.к. требуется согласованное управление всеми ногами в каждом цикле (шаге) движения.

В докладе обсуждаются результаты подводных испытаний 6-ти ногого шагающего аппарата МАК-1 с движителями циклового типа. Аппарат специально разработан для исследования шагающего способа передвижения в подводных условиях. Испытания проводились на Белом море и озере Байкал. Часть подводных экспериментов проводилась в подледных условиях. Цель подводных испытаний – отработка методов управления движением подводных шагающих роботов с движителями циклового типа с учетом особенностей подводных и подледных условий.

Управление движением подводных шагающих аппаратов

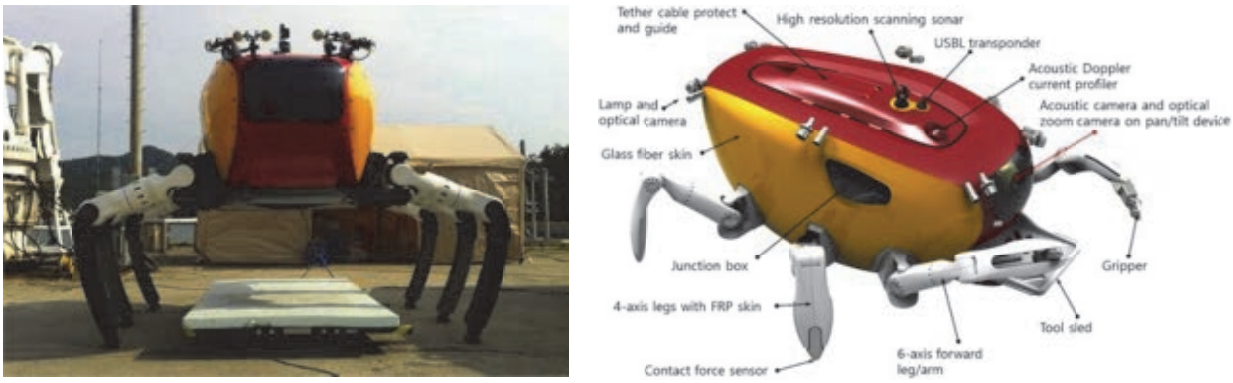
К наиболее совершенным зарубежным подводным шагающим аппаратам можно отнести шагающие роботы Ariel Underwater и Crabster CR200. Шагающий робот Ariel Underwater (рис. 1), разработанный iRobot Corporation, предназначен для обнаружения и выноса на берег донных противодесантных мин [3]. Робот имеет сравнительно небольшие размеры и может перемещать мины с массой до

6 кг. Ariel Underwater может работать на малых глубинах и в зоне прибоя. За образец при разработке движителя робота был взят способ передвижения краба. Каждая из его 6-ти ног «инсектоморфного» типа обладает 2-мя управляемыми степенями подвижности, что позволяет роботу адаптироваться к поверхности дна и перебираться через небольшие препятствия. Максимальная скорость передвижения робота – менее 1 км/ч. Датчики положения корпуса и системы управления ног ориентированы на быструю реакцию на изменяющиеся условия. Используется распределенная модель управления походкой, которая рассчитывает буксование стоп и повороты. Подводные испытания показали, что нтеллектуальная система управления робота пока может осуществлять только функции реакций с медленным возвращением к устойчивой походке после ее нарушения или отказа и требует доработки.

Рисунок 1 — Подводный шагающий робот Ariel Underwater (США)

Шагающий робот Crabster CR200 (рис. 2 а), разработанный KIOST (Korean Institute of Ocean Science and Technology), тоже похож на краба [4]. Робот является альтернативой подводным плавающим аппаратам, которые плохо справляются с сильными придонными течениями. Аппарат обладает обтекаемой формой, снижающей сопротивление воды. Рекорд скорости робота Crabster CR200 – 0,5 узлов (около 0,9 км/ч). Робот при габаритах 2,4х2,4х2 м весит около 600 кг. Глубина погружения – до 200 м. Шагающий движитель робота адаптивного типа – ноги могут требуемым образом перемещаться в пространстве и приспосабливаться к неорганизованной опорной поверхности. Движитель состоит из 6-ти механизмов шагания (ног) «инсектоморфного» типа. Стопы снабжены датчиками касания. Средние и задние ноги имеют по 4 управляемых привода, передние конечности имеют по 7 управляемых степеней подвижности и могут выполнять функции манипуляторов (рис. 2 б). Питание и управление осуществляется с поверхности по кабелю. Робот снабжен высокочувствительным сонаром, акустической камерой, гидроакустической системой и несколькими оптическими видеокамерами. Управление осуществляется командой из 4-х человек. Управление роботом осуществляется командой из 4-х человек. Первый – пилот, он отвечает за передвижение робота по дну. Второй – помощник пилота, ответственный за работу прожекторов, камер и манипуляторов. Третий, навигатор, разрабатывает маршрут и следит, чтобы аппарат двигался согласно выбранному направлению. Четвертый – инженер, контролирует функционирование систем робота, отслеживает показания 2 гидролокаторов и датчиков.

Crabster участвовал в спасательных операциях в Желтом море при крушении парома Sewol. Работа в месте крушения на глубине около 45 м была затруднена плохой видимостью – менее 0,2 м и сильным течением – до 15 км/ч. Несмотря на сложные условия Crabster, управляемый со стабильной платформы над местом крушения, успешно использовал акустическую камеру и сонар для съемки морского дна. Вместе с тем, испытания показали, что задача управления походкой при движении по неорганизованной поверхности пока полностью не решена. Оператор не может эффективно управлять всеми ногами одновременно. Движение робота осуществлялось на базе специально разработанных алгоритмов статической походки [11]. Каждый цикл (шаг) движения осуществлялся после установки стоп на опорной поверхности. В случае буксования стоп статически устойчивая походка нарушалась и требовалось время для ее восстановления.



а) б)

Рисунок 2 — Подводный робот Crabster CR200 (Южная Корея) (а) и его конструктивная схема (б)

Проблема организации согласованного управления ногами «инсектоморфного» типа с большим числом управляемых степеней подвижности характерна для большинства шагающих роботов с адаптивными движителями. Интеллектуальные системы управления мобильных роботов пока еще несовершенны и не могут быть реализованы в аппаратах небольшой стоимости. Другим недостатком роботов с «инсектоморфными» ногами является большой объём энергозатрат, связанных с удержанием веса машины. Их грузоподъемность ограничена мощностью приводов обеспечивающих удержание. Тяговые возможности таких роботов также ограничены – для реализации тягового усилия одновременно могут быть задействованы лишь часть сравнительно маломощных приводов ног.

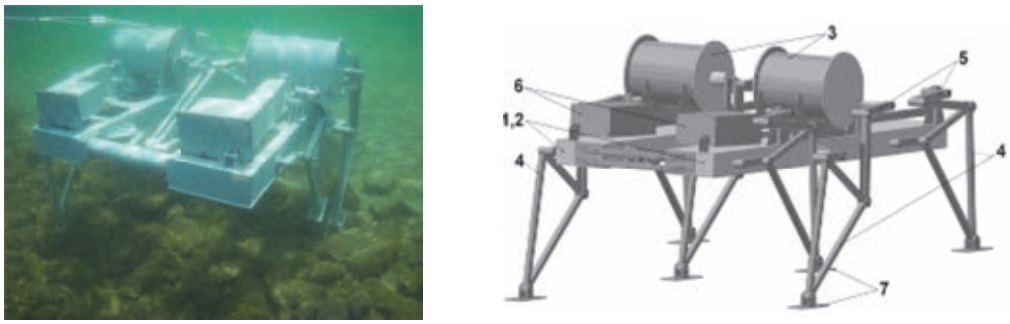
Задача управления шагающими роботами может быть упрощена при использовании движителей циклового типа. Использование цикловых движителей позволяет не заботиться о сохранении походки и устойчивости и исключает необходимость сложной адаптивной системы управления. В результате шагающие машины имеют минимальное число управляемых приводов, становятся проще и существенно дешевле аналогов с адаптивным управлением. К аппаратам такого типа относится разработанный в Волгоградском государственном техническом университете подводный шагающий аппарат (модульно аппаратный комплекс) МАК-1 [12]. Аппарат использовался для отработки методов управления движением шагающих роботов передвигающихся по дну.

Отработка методов управления движением подводного шагающего робот МАК-1

Конструктивно аппарат МАК–1 включает в себя 2 шагающих модуля, соединенных сменной рамой (рис. 3). Шагающие модули выполнены в виде несущих балок, на которых установлены механизмы шагания и бортовой силовой привод. Бортовой привод – электрический, на базе асинхронных электродвигателей с частотным регулированием частоты вращения. Электропитание осуществляется по кабелю (с берега или судна сопровождения) от малогабаритного бензогенератора инверторного типа. Управление также осуществляется по кабелю по видеоинформации, поступающей с бортовых цветных видеокамер с инфракрасной подсветкой. Поворот аппарата осуществляется либо за счет разных скоростей бортов либо за счет разной длины шага движителей правого и левого борта. Масса аппарата – около 200 кг, скорость передвижения – до 3–5 км/ч.

Шагающие опоры имеют по 3 последовательно расположенных кинематически связанных механизмов шагания. Механизмы шагания (ноги) циклового типа (рис.4а). Крайние ноги работают синфазно, а средняя в противофазе. В каждый момент времени хотя бы одна из ног борта находится в опорной фазе. Это позволяет не заботиться об устойчивости. В результате шагающий движитель робота МАК-1 имеет всего лишь 2 управляемые степени свободы. Конечности шестиногого робота Crabster CR200, для сравнения, насчитывают 30 управляемых приводов. Для полной реализации возможностей циклового движителя по профильной проходимости и адаптивности, в механизмах шагания аппарата МАК-1 реализована возможность корректировки программных движений ног [13]. Она достигнута путем введения в механизм дополнительного управляемого поворотного звена с линей-

ным электроприводом. Управление сводится к дискретному (аналогично переключению передач) изменению углового положения кривошипа, что приводит к смещению точки подвеса коромысла механизма и трансформации траектории маршевого режима (рис.4б) в траекторию режимов с увеличенной высотой и длиной шага (рис.4в, г). Точки на траектории расположены через равные промежутки времени – через $1/24$ периода цикла. Подводные эксперименты показали, что таким образом можно в достаточно широких пределах менять длину и высоту шага.



а) б)

Рисунок 3 — Подводный шагающий робот МАК-1 (а) и его конструктивная схема (б): 1 – шагающие модули; 2 – несущие балки; 3 – бортовой электропривод в водозащищенных боксах; 4 – механизмы шагания (ноги); 5, 6 – механизм смещения точек подвеса ног и его линейный электропривод, соответственно; 7 – сменные стопы

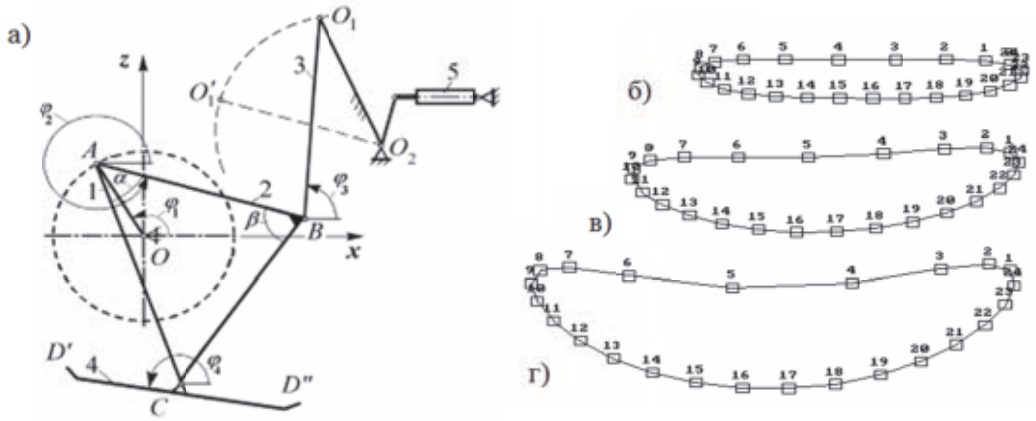


Рисунок 4 — Схема механизма шагания аппарата МАК-1 (а) и трансформация относительной траектории его опорной точки *C* при смещении точки подвеса коромысла (б, в, г): 1 – ведущий кривошип; 2 – опорное звено (нога); 3 – коромысло; 4 – стопа; 5 – линейный электропривод механизма смещения точки подвеса коромысла

При разработке МАК-1 стремились реализовать следующий подход при управлении движением. Оператор находится вне рабочего пространства (на берегу или лодке) и контролирует работу автономно работающего аппарата по информации поступающей по кабелю с бортовых видеосенсоров. Он задает скорость и может менять направление движения путем варьирования скоростей правого и левого борта (аналогично управлению гусеничных машин). Также он может менять, в зависимости от окружающей обстановки, длину и высоту шага (аналогично переключению передач в традиционных транспортных средствах). Задачу согласованного управления движением ног предполагается решать без участия оператора на низшем уровне управления (бортовым компьютером). При этом не ставится задача выделения алгоритмами обработки изображений полезной информации в сигналах бортовых видеокамер с целью определения характеристик рабочего пространства. Внешние условия задаются как функции углов и угловых скоростей шарнирно закрепленных стоп, по положению ведущих кривошипов и по току тяговых электродвигателей. При таком подходе система управления на низшем уровне, в общем случае, не позволяет обнаруживать и достоверно определять тип и расположение препятствий – управление будет осуществляться в условиях неполного и неоднозначного представ-

ления о текущей ситуации. Поэтому возможны сбои в управлении, при которых управление передается оператору машины.

В рамках предложенной концепции управления в аппарате МАК-1 реализована система пассивного самоуправления шарниро закрепленных стоп. Разработана методика синтеза траектории опорной точки механизма шагания, обеспечивающая, за счет кинематики механизма шагания и трения в шарнире стопы, подъем носка стопы в фазе переноса [14]. Система работает как при прямом, так и при реверсивном (задним ходом) движении (рис. 5,6). В последнем случае носок и пятка стопы меняются местами. Самоадаптация существенно повышает возможности шагающего аппарата по приспособляемости к неровностям дна.

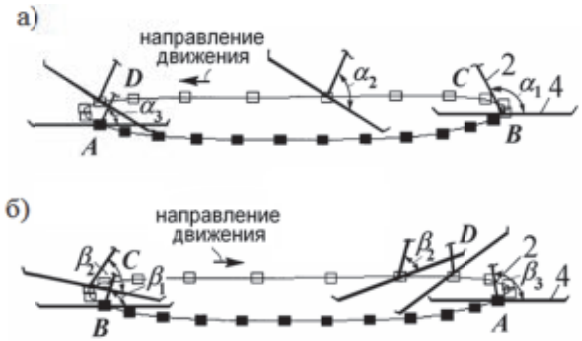


Рисунок 5 —Траектория опорной точки механизма шагания с характерными положениями стопы при прямом (а) и реверсивном (б) движении: 2 – опорное звено; 4 – лыжеобразная стопа

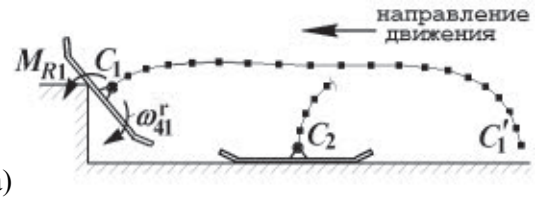
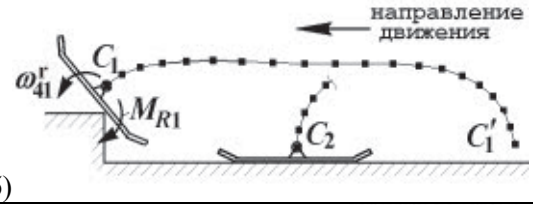
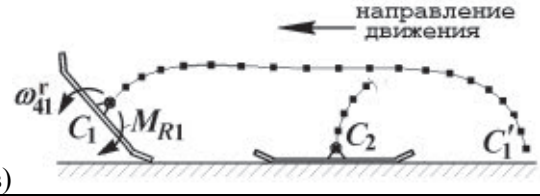
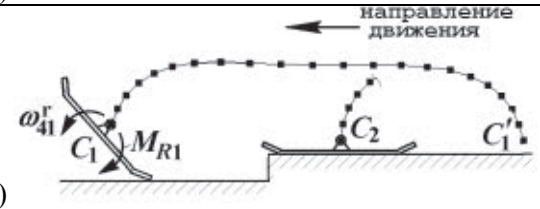
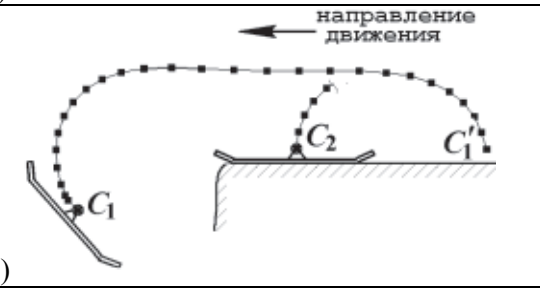
а) б)

Рисунок 6 – Экспериментальная отработка системы пассивного самоуправления стопами в фазе переноса: движение влево (а); реверсивное движение вправо (б)

В ходе подводных испытаний робота МАК-1 была изучена возможность использования информации о положении шарнирно закрепленной стопы при встрече с неизвестным препятствием для принятия правильных решений по управлению. Внутренние информационные датчики МАК-1 позволяют однозначно определять угловые скорости звеньев механизмов шагания, а также положение и скорость узловых точек механизмов, включая опорные точки, в системе отсчета, жестко связанной с корпусом подводного аппарата. Стопы 4 (рис. 4а), шарнирно прикрепленные к опорным звеньям 2, также выполняют строго определенное «программное» движение. В фазе переноса угловая скорость стопы равна угловой скорости опорного звена. При входе в опорную фазу, когда пятка стопы касается опорной поверхности, угловая скорость стопы определяется угловой скоростью опорного звена и вертикальной составляющей абсолютной скорости точки опорной точки механизма шагания – точки *C*. При этом пятка стопы *D*" будет скользить по грунту. В опорной фазе, после установки стопы на опорной поверхности, ее угловая скорость станет равной нулю. Любое отклонение поведения стопы от «программного» при движении шагающего робота, например, при встрече с препятствием, позволяет определить некоторую информа-

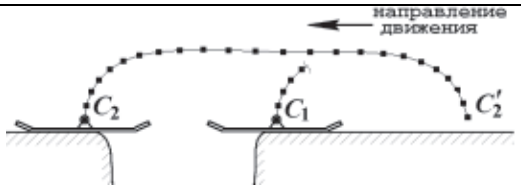
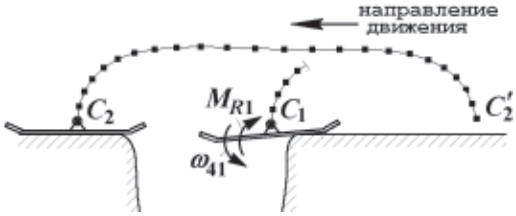
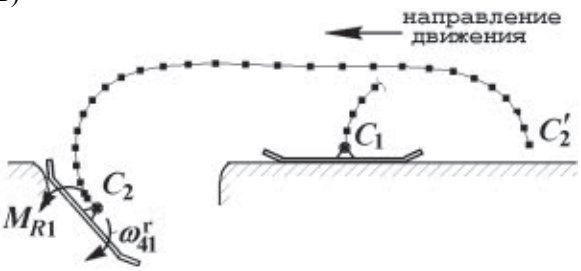
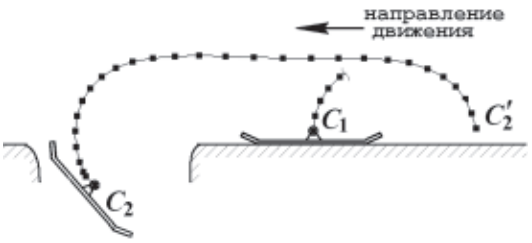
цию о рабочем пространстве и текущей ситуации. Рассмотрим, например, ситуации, представленные в таблице 1.

Таблица 1 — Примеры ситуаций, возникающих при автономном движении шагающего робота

Возможные ситуации	Характеристика ситуации	Возможные решения по управлению
а) 	Препятствие «высокое»	Экстренная остановка, шаг назад, переход на режим с повышенной высотой шага, повторная попытка преодоления препятствия в автономном режиме на малой скорости или передача управления оператору
б) 	Препятствие «невысокое»	Продолжение автономного движения в маршевом режиме
в) 	Препятствия нет	Продолжение автономного движения в маршевом режиме
г) 	Препятствие «неглубокое»	Продолжение автономного движения в маршевом режиме
д) 	Препятствие «глубокое»	Экстренная остановка, шаг назад, переход на режим с повышенной длиной шага, повторная попытка преодоления препятствия в автономном режиме на малой скорости или передача управления оператору

Преодоление препятствия зависит от исходного положения ног на земле. Поэтому успешное преодоление препятствий зависит от алгоритма поведения ног во время прохождения. Для этого необходимо построить модель процесса. Однако в представленном случае это сложно из-за большинства возможных ситуаций. Среди других решений более уместен метод ситуационного контроля, где каждому классу возможных ситуаций соответствует свое собственное управляющее решение. После объединения различных нечетких условий, определяющих текущую ситуацию, и введения ряда лингвистических переменных (препятствие высокое, низкое, глубокое, неглубокое, широкое, неширокое и т.д.) были сформированы правила поведения робота в виде нечеткого решения типа «Если А, то В». Типичные возможные ситуации положения шагающего робота и его ног во время преодоления препятствий показаны в таблице 1, стрелки показывают направление движения робота. Иногда преодоление одного и того же препятствия может иметь разные последствия, это можно увидеть, например, в схемах таблицы 2.

Таблица 2 — Различные ситуации при преодолении одного и того же препятствия

Возможные ситуации	Характеристика ситуации	Возможные решения по управлению
а) 	Препятствия нет	Продолжение автономного движения в маршевом режиме
б) 	Препятствие «неширокое»	Блокировка демпфера 1-й стопы и продолжение автономного движения в маршевом режиме
в) 	Препятствие «глубокое» и «неширокое»	Экстренная остановка, переход на режим с повышенной длиной шага, повторная попытка преодоления препятствия в автономном режиме
г) 	Препятствие «глубокое» и «широкое»	Экстренная остановка, шаг назад, переход на режим с повышенной длиной шага, повторная попытка преодоления препятствия в автономном режиме на малой скорости или передача управления оператору

Таким образом, в условиях дефицита сенсорной информации из-за дистанционного управления и специфики глубоководной среды, в соответствии с характером самоадаптации стопы к неорганизованной опорной поверхности и относительным движением механизмов ходьбы, характер которых полностью определяется датчиками внутренней информации робота, можно получить некоторую нечеткую информацию о внешнем рабочем пространстве и текущей ситуации. Несмотря на то, что информация является неполной и неоднозначной, ее можно использовать для принятия правильных управленческих решений при отсутствии внешних управляющих воздействий. Управление движением ног передается оператору машины (на верхний уровень управления) только в случае каких-либо серьезных сбоев во время движения, например, при встрече с препятствием для его преодоления. Предлагаемый подход позволяет приблизить характер управления подводным шагающим транспортным средством к управлению гусеничными транспортными средствами. Кроме того, уменьшается количество управляемых приводов в шагающем движителе.

Шестиногая схема подводного шагающего аппарата МАК-1 с побортным последовательным размещением механизмов шагания циклового типа и побортно независимыми приводами ног обеспечивает высокую маневренность аппарата и позволяет реализовать систему управления его движением подобно традиционным гусеничным машинам.

Результаты работы могут быть востребованы при разработке шагающих робототехнических систем, предназначенных для подводно-технических работ, для новых промышленных технологий освоения

ресурсов морского дна, для обеспечения антитеррористической и техногенной безопасности объектов подводной инфраструктуры и др. работ.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и Администрации Волгоградской области № 22-21-20115, https://rscf.ru/project/22-21-20115/.

Литература

1. Ляхов Д.Г. Современные задачи подводной робототехники // Подводные исследования и робототехника. – 2012. – № 1. – С. 15-23.

2. Илларионов Г.Ю. Некоторые аспекты военного применения подводных роботов за рубежом // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 3 (128). – С. 65-75.

3. Илларионов Г.Ю., Сидоренко В.В., Смирнов С.В. Автономные необитаемые подводные аппараты для поиска и уничтожения мин // Подводные исследования и робототехника. – 2006. – № 1. – С. 31-39.

4. Чернышев, В. В. Управление движением подводных шагающих аппаратов передвигающихся по дну / В. В. Чернышев, В. В. Арыканцев, А. Е. Гаврилов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 1(174). – С. 141-155.

5. Hong S., Kim H.W., Choi J.S. Transient Dynamic Analysis of Tracked Vehicles on Extremely Soft Cohesive soil // The 5th ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium. 2002. P. 100-107.

6. Chernyshev V.V., Gavrilov A.E. Traction properties of walking machines on underwater soils with a low bearing ability // Minerals of the Ocean – 7 & Deep-Sea Minerals and Mining – 4: abstracts of Int. Conf. / VNIIOkeangeologia. - St. Petersburg, 2014. C. 21-24.

7. Сравнительный анализ колесных, гусеничных и шагающих машин / Е. С. Брискин, В. В. Чернышев, А. В. Малолетов, Н. Г. Шаронов // Робототехника и техническая кибернетика. – 2013. – № 1(1). – С. 6-14.

8. Briskin E.S., Chernyshev V.V., Maloletov A.V et al. On ground and profile practicability of multilegged walking machines / Climbing and Walking Robots. CLAWAR 2001: Proc. of the 4-th Int. Conf. Karlsruhe, Germany, 2001. P.1005–1012.

9. Кемурджиан А.Л. Планетоходы. М.: Машиностроение, 1993, 400 с.

10. Чернышев, В. В. Моделирование механики контактного взаимодействия опорных элементов шагающих роботов при больших тяговых усилиях / В. В. Чернышев, А. А. Гончаров, В. В. Арыканцев // Робототехника и техническая кибернетика. – 2019. – Т. 7. – № 1. – С. 53-57.

11. Design of static gait algorithm for hexapod subsea walking robot Crabster / S.Y. Yoo, B.H. Jun, H. Shim // Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers. Vol. 38, Issue 9. 2014. P. 989–997.

12. Чернышев, В. В. Мак-1 – подводный шагающий робот / В. В. Чернышев, В. В. Арыканцев // Робототехника и техническая кибернетика. – 2015. – № 2(7). – С. 45-50.

13. Чернышев, В. В. Цикловой механизм шагания с трансформируемой траекторией опорной точки / В. В. Чернышев, В. В. Арыканцев // Теория механизмов и машин. – 2017. – Т. 15. – № 2(34). – С. 71-79.

14. Chernyshev V. V. Passive foot control in cyclic walking mechanism / V. V. Chernyshev, V. V. Arykantsev, Ya. V. Kalinin // Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2017). – 2017. – p. 5.

15. Ющенко А.С., Киселев Д.В. Ситуационный подход к организации поведения мобильного робота в условиях неопределенности // Мехатроника. 2000. № 5. С. 10-15.

Д.С. Кудрявцев, А.А. Яковлев, Петр П. Чернусь, П.П. Чернусь, Р.В. Сахабудинов, А.С. Голосий

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «АВТОНОМНЫЙ ГЛУБОКОВОДНЫЙ АППАРАТ» В РЕЖИМЕ АКТИВНОЙ КОМПЕНСАЦИИ КАЧКИ

АО «КБ Арсенал им.М.В.Фрунзе», Санкт-Петербург, kbarsenal@kbarsenal.ru

Аннотация

В докладе представлены результаты разработки гидравлической системы стабилизации автономного глубоководного аппарата. Акцент сделан на математическом моделировании системы стабилизации. Были учтены особенности и типовые нелинейности входящих в состав системы гидравлической и пневматической частей, такие как расходная характеристика гидрораспределителя золотникового типа, малые расходы утечек и сжатия в рабочих полостях активного гидроцилиндра, адиабатический характер процесса в пневмогидровытеснителе. Также учтены нелинейность коэффициента упругости троса и большие величины сил сухого трения в исполнительных гидроцилиндрах. Исследована устойчивость системы стабилизации, проведен синтез системы управления с применением стандартной методики расчета ПИД-регулятора, рассмотрены вопросы повышения инвариантности системы по отношению к входному воздействию путем введения комбинированного управления. Полученная математическая модель позволяет получить достоверные результаты численного эксперимента.

Ключевые слова

Гидропривод, устойчивость, синтез систем управления, комбинированное управление.

D.S. Kudryavtsev, A.A. Yakovlev, Petr P. Chernus, P.P. Chernus, R.V. Sakhabudinov, A.S. Golosiy

HOW TO OPERATE THE ROBOTIC SYSTEM «AUTONOMOUS DEEPDIVING VEHICLE» IN THE DYNAMIC ROLLING

ARSENAL DESIGN BUREAU JSK, St. Petersburg, Russia, kbarsenal@kbarsenal.ru

Abstract

The paper presents the results of the development of a hydraulic stabilization system of an autonomous deepdiving vehicle. The emphasis is made on mathematical modeling of the stabilization system. The features and typical non-linearities of the hydraulic and pneumatic parts included in the system were taken into consideration, such as the flow characteristics of the spool-type hydraulic valve, low leakage and compression costs in the working cavities of the active hydraulic cylinder, the adiabatic nature of the process in the pneumatic-hydraulic displacer. Also, the nonlinearity of the cable elasticity coefficient and the large values of the dry friction forces in the actuating hydraulic cylinders are taken into account. The stability of the stabilization system was studied, the synthesis of the control system was carried out using the standard method for calculating the PID controller, and the issues of increasing the invariance of the system with respect to the input action by introducing a combined control were considered. The resulting mathematical model makes it possible to obtain reliable results of a numerical experiment.

Key words

Hydraulic drive, stability, control system synthesis, combined control.

В представленной работе предлагается решение построения системы стабилизации глубоководного аппарата (далее объект 1). На рисунке 1 приведена схема такой системы стабилизации с составными частями. Здесь 1 – пневмогидроаккумулятор; 2 – пассивный гидроцилиндр; 3 – активный гидроцилиндр; 4 – вьюшка; 5 – лебедка транзитная; 6 – датчик натяжения; 7 – выключатель бесконтактный

SQ2; 8 – выключатель бесконтактный SQ1; 9 – гидроцилиндр; 10 – пневмогидроаккумулятор; 11, 12, 13, 19 – блок неподвижный; 14, 18 – блок подвижный; 15 – каретка; 16 – каретка; 17 – датчик линейных перемещений; 20, 21, 22, 23, 26, 27 – блок направляющий; 24, 28 – акселерометр; 25, 29 – канифас-блок; 30 – штырь; 31 – выключатель бесконтактный SQ3; 32 – выключатель бесконтактный SQ4; 33 – привод заштыривания; А, Б, В, Г, Д, Е, Ж, И – полость.

Для начала рассмотрим уравнение сил в активном гидроцилиндре

$$F_{\text{И}} = F_f + F_{visc} + F_{dry} + F_{\text{дин}},$$

где $F_{\text{И}} = S_{\text{П}}(P_1 - P_2)$ – индикаторное усилие на штоке активного гидроцилиндра, $S_{\text{П}}$ – эффективная площадь поршня активного гидроцилиндра, P_1 и P_2 – это давления в полостях активного гидроцилиндра; F_f – внешнее усилие на штоке (возмущающее воздействие); $F_{visc} = f_{fr}\, v_{\text{ш}}$ – сила вязких трений на штоке, f_{fr} – коэффициент вязких трений, $v_{\text{ш}}$ – скорость перемещения штока активного гидроцилиндра; F_{dry} – сила сухих трений активного гидроцилиндра; $F_{\text{дин}} = M\frac{d}{dt}v_{\text{ш}}$ – динамическая сила на штоке активного гидроцилиндра, M – общая масса подвижных частей активного и пассивного гидроцилиндров [1].

Сила сухого трения в активном гидроцилиндре в уплотнении между поршнем и стенками гидроцилиндра, штоком и гидроцилиндром вычисляются по следующей формуле

$$F_{\text{тр}} = \pi D l_1 f_{\text{ф}} P,$$

где D, l_1 – диаметр и ширина контактной поверхности колец, см, $f_{\text{ф}}$ – коэффициент трения фторопласта, P – давление рабочей среды, кГс/см^2 [2].

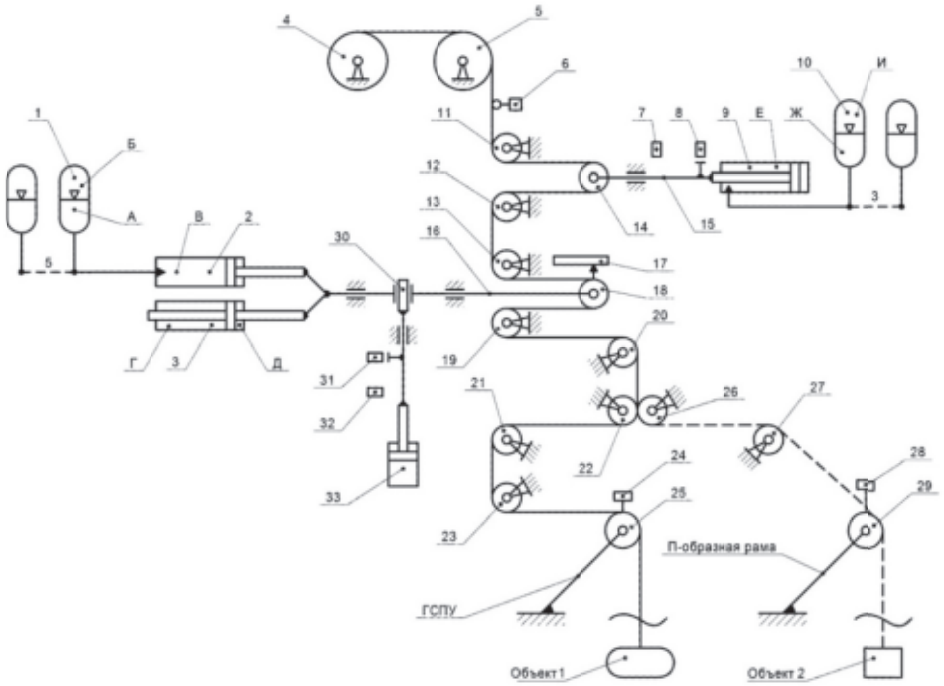


Рисунок 1 — Схема взаимодействия АДН с составными частями оборудования

Для активного гидроцилиндра амортизатора были определены следующие параметры: $D_{\text{п}} = 14$ см, $l_{\text{п}} = 1$ м, $f_{\text{ф}} = 0{,}1$. За давление рабочей среды примем средний перепад давлений между рабочими полостями гидроцилиндра, тогда $P_{\text{п}} = 70$ кГс/см^2. Тогда сила сухого трения между поршнем и стенками гидроцилиндра примет следующее значение

$$F_{\text{тр_п}} = \pi D_{\text{п}} l_{\text{п}} f_{\text{ф}} P_{\text{п}} = \pi \cdot 14 \cdot 1 \cdot 0.1 \cdot 70 = 308 \text{ Н}.$$

По этой же формуле рассчитаем силу сухого трения между штоком и гидроцилиндром. Возьмем $D_{ш}$ = 11 см, $l_{ш}$ = 1 см, $f_{ф}$ = 0,1. Поскольку в качестве активного гидроцилиндра используется гидроцилиндр двустороннего действия, имеющий два штока, для каждого из которых действует сила сухого трения и в обеих полостях активного гидроцилиндра давление рабочей среды может достигать $P_{ш}$ = 250 кГс/см^2, то значение силы сухого трения для одной стороны активного гидроцилиндра нужно увеличить в два раза:

$$F_{тр_ш} = 2 \cdot \pi D_{ш} l_{ш} f_{ф} P_{ш} = 2 \cdot \pi \cdot 11 \cdot 1 \cdot 0.1 \cdot 250 = 1728 \text{ Н}.$$

Общая сила сухого трения, которая возникает в активном гидроцилиндре будет составлять $F_{тр_гц_акт}$ = 2036 Н.

Перейдем к расчету силы сухого трения пассивного гидроцилиндра. Диаметр пассивного гидроцилиндра возьмем $D_{гц_п}$ = 14 см, ширина контактной поверхности $l_{гц_п}$ = 1 см. Давление в полости пассивного гидроцилиндра достигает $P_{гц_п}$ = 240 кГс/см^2. Поскольку пассивный гидроцилиндр имеет шток только с одной стороны, причем с той, где нет давления, значит сухое трение штока при выходе из пассивного гидроцилиндра будет пренебрежительно мало. Тогда сила сухого трения появится только при трении поршня о стенки пассивного гидроцилиндра.

$$F_{тр_гц_п} = \pi D_{гц_п} l_{гц_п} f_{ф} P_{гц_п} = \pi \cdot 14 \cdot 1 \cdot 0.1 \cdot 240 = 1056 \text{ Н}.$$

Из расчетов общая сила сухого трения получается равной

$$F_{dry} = F_{тр_гц_акт} + F_{тр_гц_п} = 2036 + 1056 = 3092 \text{ Н}.$$

Зная общую силу сухого трения в системе, силу вязкого трения и внешнее усилие, можем определить ускорение движения штока активного гидроцилиндра следующим образом [1]

$$M \frac{d}{dt} v_{ш} = F_{и} - F_f - F_{dry} - F_{visc} = S_{п}(P_1 - P_2) - F_f - F_{dry} - f_{тр} v_{ш},$$

откуда получаем ускорение движения штока активного гидроцилиндра

$$\frac{d}{dt} v_{ш} = \frac{S_{п}(P_1 - P_2) - F_f - F_{dry} - f_{тр} v_{ш}}{M}.$$

Здесь M, как говорилось выше, общая масса подвижных частей активного и пассивного гидроцилиндров. Здесь же надо учесть приведенные массы блоков, через которые проходит трос. В системе имеется семь блоков массой $m_{б} = 145$ кг каждый. Массы блоков можно учесть через моменты инерции этих блоков. Как известно, момент инерции вращающегося блока рассчитывается по формуле

$$J = \frac{1}{2} m r^2.$$

Будем считать, что растяжение троса пренебрежительно мало при похождении через все блоки, а значит, угловое ускорение всех блоков одинаково. Угловое ускорение блока связано с линейным ускорением троса следующей зависимостью

$$\varepsilon_{б} = \frac{a_{тр}}{r_{б}}.$$

Моменты инерции блоков одинаковы, откуда можно записать, что

$$J_{б} = 7 \cdot \frac{1}{2} m_{б} r_{б}^2 = \frac{7 m_{б}}{2} r_{б}^2.$$

Момент инерции активного гидроцилиндра относительно оси вращения блока

$$J_{\text{гц_акт}} = F_{\text{и}} r_{\text{б}}.$$

Запишем уравнение моментов блоков и активного гидроцилиндра

$$J_{\text{б}} \varepsilon_{\text{б}} = J_{\text{гц_акт}}.$$

Или

$$\frac{7m_{\text{б}}}{2} r_{\text{б}}^2 \varepsilon_{\text{б}} = m_{\text{и}} a r_{\text{б}} \Rightarrow \frac{7m_{\text{б}}}{2} r_{\text{б}}^2 \varepsilon_{\text{б}} = m_{\text{и}} \frac{a}{r_{\text{б}}} r_{\text{б}}^2.$$

Тогда

$$m_{\text{и}} = \frac{7m_{\text{б}}}{2} = \frac{7 \cdot 145}{2} = 507{,}5.$$

Учитывая, что масса подвижных частей активного и пассивного гидроцилиндров $m_{\text{и}}$ = 950 кг, получаем, что общая масса подвижных частей активного и пассивного гидроцилиндров с учетом приведенной массы блоков будет следующей

$$M = m_{\text{и}} + 950 = 507.5 + 950 = 1457{,}5.$$

Зная значение M можно получить ускорение движения штока активного гидроцилиндра, после чего дважды интегрируя ускорение штока получаем перемещение штока активного гидроцилиндра. Модель механической части активного гидроцилиндра представлена на рисунке 2.

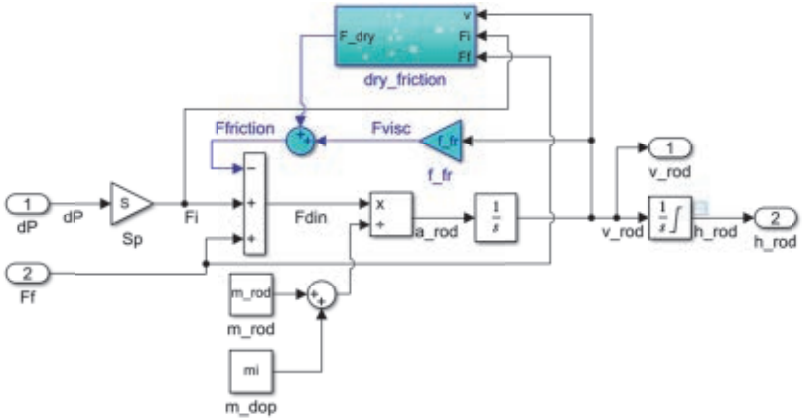


Рисунок 2 — Модель механической части активного гидроцилиндра

Рассмотрим гидравлическую часть активного гидроцилиндра. Запишем уравнения расходов в активном гидроцилиндре (1)

$$\begin{cases} Q_1 = Q_{cyl} + Q_{szh1}, \\ Q_2 = Q_{cyl} - Q_{szh2}, \end{cases} \quad (1)$$

где Q_1 – расход в первой рабочей гидролинии; Q_2 – расход во второй рабочей гидролинии; $Q_{cyl} = S \cdot v_{rod}$ – теоретический расход активного гидроцилиндра; $Q_{szhi} = \frac{V_{cyl}}{2E} \cdot \frac{dP_i}{dt}$ – расход сжатия рабочей жидкости в i-ой полости; $V_{cyl} = 0.0089$ м^3 – объем сжимаемой жидкости в активном гидроцилиндре; $E = 1300 \cdot 10^6$ Па – модуль упругости рабочей жидкости.

Модель уравнения расходов активного гидроцилиндра вместе с моделью золотникового гидрораспределителя представлены на рисунке 3.

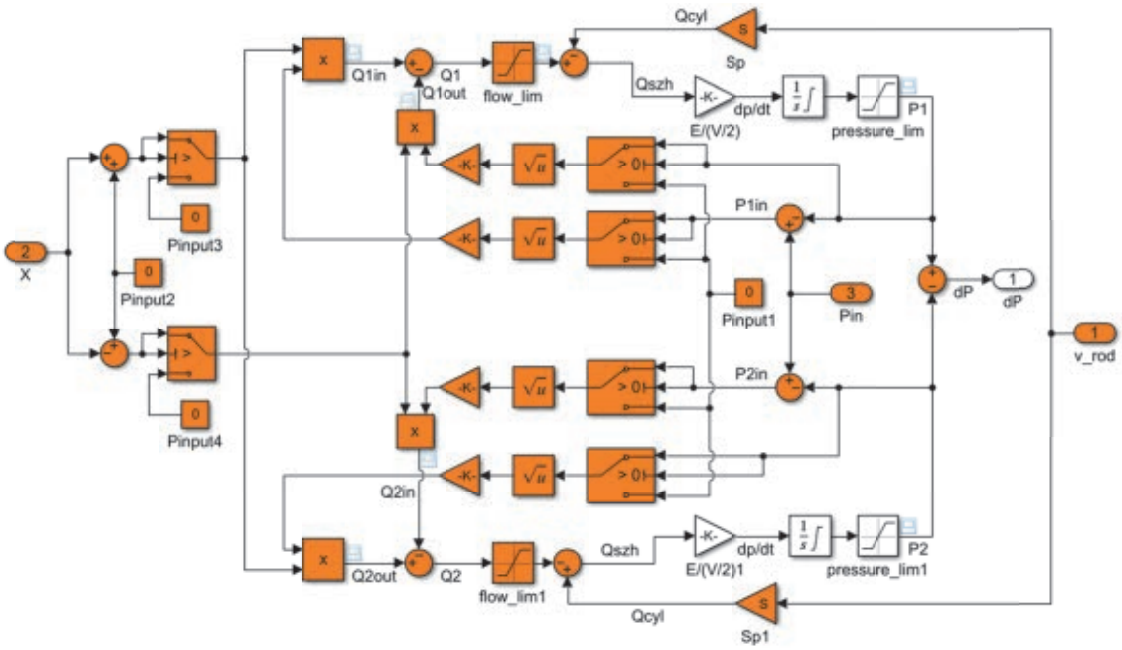


Рисунок 3 — Модель расходов гидроцилиндра и золотникового распределителя

Модель пневмогидравытеснителя представлена на рисунке 4. В активном режиме работы системы стабилизации перемещение штоков гидроцилиндров происходит достаточно быстро, поэтому пневматическая часть системы не успевает обмениваться теплотой с окружающим пространством [3]. Следовательно, данная модель создана при условии адиабатического процесса, которому соответствует следующие условие:

$$p \cdot V^{\gamma} = const.$$

где $\gamma = 1{,}4$.

В модели реализована следующая формула

$$P_{air0} \cdot \left(V_{air0} + \frac{V_{passive_cylinder}}{2}\right)^{1.4} = P_{air} \cdot \left(V_{air0} + h_{rod} \cdot S_{passive}\right)^{1.4},$$

где $V_{air0} = 0{,}2$ м^3 – объем пневмобаллонов; $V_{passive_cylinder} = S_{passive_cylinder} \cdot L_{passive_cylinder}$ – объем пассивного гидроцилиндра. Здесь $L_{passive_cylinder} = 1.5$ м, $S_{passive_cylinder} = \frac{\pi d_{passive}^2}{4} = \frac{\pi 0.1^2}{4} = 0.0079$ м^2; $h_{rod} \cdot S_{passive}$ – текущий ход гидроцилиндра, изменяющий объем воздуха; P_{air0} – давление газа в системе при среднем положении гидроцилиндра.

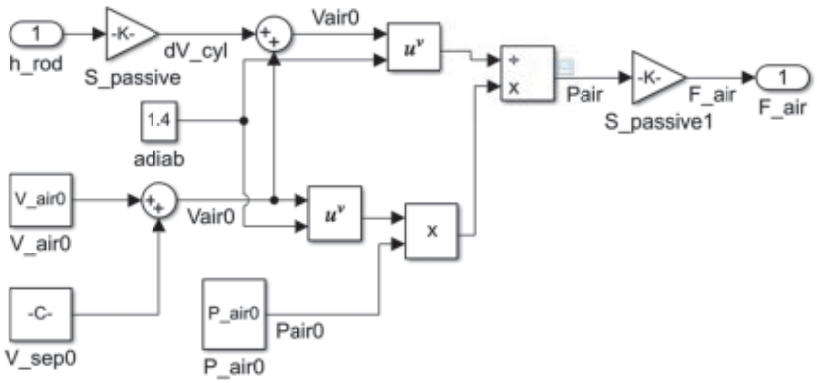


Рисунок 4 — Модель пневмогидравытеснителя

Отдельно стоит остановиться на модели троса и объекта. Уравнения, описывающие силы, возникающие в тросе, имеют вид

$$T = c \cdot \Delta L,$$

где ΔL – удлинение троса, c – коэффициент упругости троса. Вязкое трение в тросе считается незначительным для выбранного троса. Сложность с коэффициентом упругости троса заключается в том, что он зависит от прилагаемой нагрузки. График переменного относительного коэффициента упругости ($\Delta L/L_0, L_0$ – начальная длина троса) приведен на рисунке 5.

Удлинение троса определяется по следующей формуле:

$$\Delta L = dist + 2 \cdot h_{rod} + L_{\text{пред}} - x,$$

где $dist$ – возмущения, вызванные воздействием волны; $2 \cdot h_{rod}$ – отрабатываемое перемещение активного гидроцилиндра с учетом полиспаста; $L_{\text{пред}} = 0{,}726$ м – преднатяжение троса при массе объекта 8 т; x – перемещение объекта.

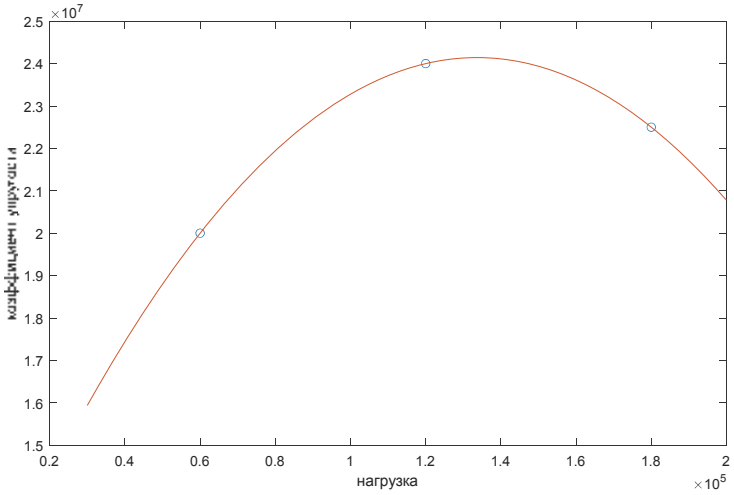


Рисунок 5 — График изменения коэффициента упругости троса

Динамические силы, возникающие при движении объекта 1, описываются следующим уравнением

$$F_{\text{объекта1}} = \rho_{\text{воды}} \cdot V_{\text{объекта1}} \cdot \left|a_{\text{привед}}\right| \cdot \left(1 + k_{\text{присоед.массы}}\right) + C_y \cdot V_{\text{объекта1}}^{\frac{2}{3}} \cdot \frac{\rho_{\text{воды}} \cdot v_{\text{привед}}^2}{2},$$

где $V_{\text{объекта1}} = 65$ м^3 – объем объекта 1; $C_y = 1.3$ – коэффициент сопротивления объекта 1; $\rho_{\text{воды}} = 1022$ кг/м^3 – плотность морской воды; $k_{\text{присоед.массы}} = 0.824$ – коэффициент присоединенной массы;

Уравнение движения объекта 1 имеет вид

$$m_{sub} \cdot a_{\text{привед}} = T - m_{sub} \cdot g - F_{\text{объекта1}}$$

где $m_{sub} = 8000$ кг – масса объекта 1; $g = 9{,}81$ м/с^2 – ускорение свободного падения; модель троса, учитывающая растяжение троса при различной нагрузке, и модель динамического поведения объекта 1, составленная по полученным уравнениям, представлены на рисунке 6.

Обратимся к вопросу устойчивости системы.

Нормальное функционирование системы предусматривает действие на нее внешних факторов, проявляющееся в виде возмущающих и задающих воздействий. Поэтому необходимо провести анализ устойчивости системы. Приведенная модель системы обладает большим числом типовых нелинейностей, но, тем не менее, с достаточной точностью приближается линеаризованной системой. В качестве основного критерия устойчивости будет применяться метод частотных характеристик, а именно ЛАЧХ – логарифмических амплитудных частотных характеристик, и ФЧХ – фазовых частотных характеристик.

Применение этого метода обусловлено следующими причинами. Во-первых, данный метод помимо ответа на вопрос об устойчивости системы, позволяет получить такие важные характеристики, как запасы устойчивости. Во-вторых, рассматриваемый метод изначально разрабатывался для определения устойчивости систем с обратной связью, коей и является рассчитываемая система.

Однако метод применим только для линейных систем, поэтому необходимо провести линеаризацию данной системы в рабочей точке. Линеаризацию модели начнем с модели активного гидроцилиндра.

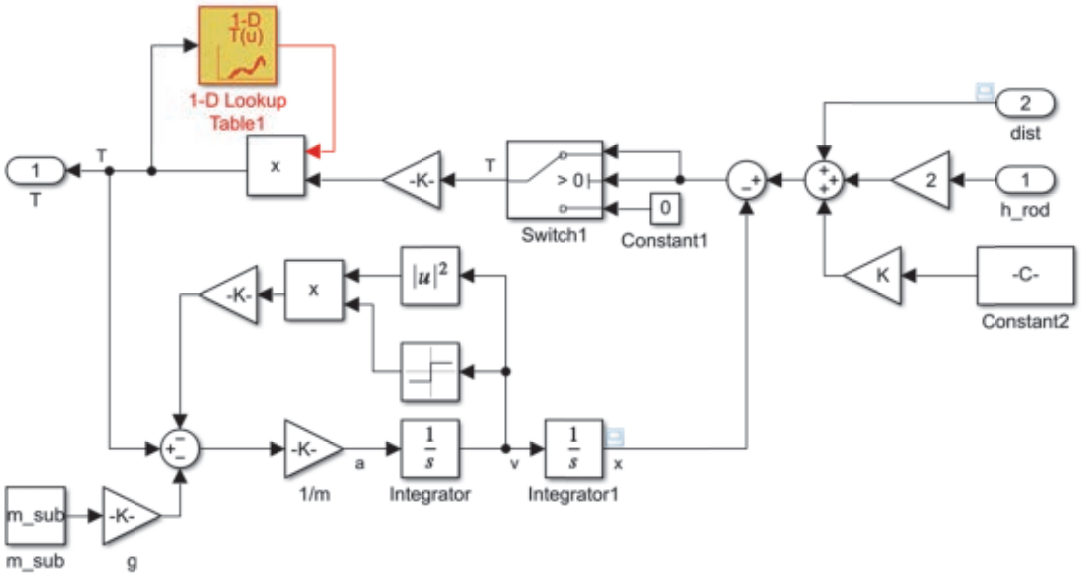


Рисунок 6 — Модель троса

Нелинейность типа сухое трение линеаризовать сложно, однако будем воспринимать эту нелинейность как внешнее возмущение. Поэтому передаточная функция механической части, охваченная вязким трением, примет вид

$$W_m(s) = \frac{\frac{1}{M}\cdot\frac{1}{s}}{1 + f_{fr}\cdot\frac{1}{M}\cdot\frac{1}{s}} = \frac{1.25}{1822s + 1},$$

где $M = m_{rod} + m_{dop}$ – полная приведенная масса каретки полиспаста (совместно с массой штоков активного и пассивного гидроцилиндров) и блоков; $f_{fr} = 0.8$ – коэффициент вязкого трения активного и пассивного гидроцилиндров.

Линеаризованное уравнение расходов силового цилиндра имеет вид:

$$Q_д = S \cdot h_{rod} + \frac{V}{2E}\frac{d\Delta P}{dt},$$

где $Q_д = Q_1 - Q_2$ – расход в полостях силового гидроцилиндра; $\Delta P = P_1 - P_2$ – разность давлений в полостях силового гидроцилиндра, V – объем рабочей жидкости в цилиндре и аппаратуре.

Передаточная функция гидравлической и механической части гидроцилиндра, приведенной на рисунке 7, примет вид:

$$W_{гц}(s) = \frac{\frac{2E}{V}\cdot\frac{1}{s}\cdot S\cdot W_m(s)}{1 + S\cdot\frac{2E}{V}\cdot\frac{1}{s}\cdot S\cdot W_m(s)} = \frac{169.5}{3.3\cdot 10^{-4}s^2 + 1.8\cdot 10^{-7}s + 1}.$$

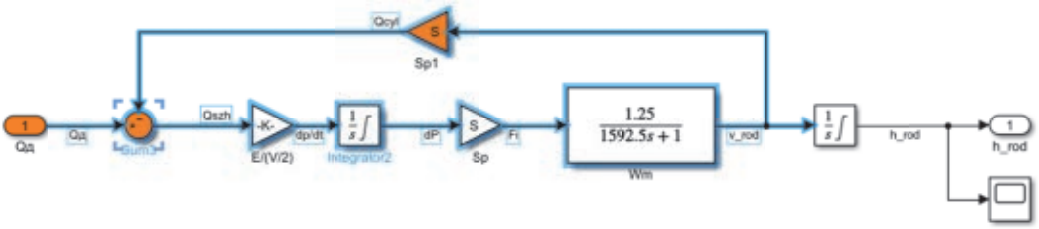


Рисунок 7 — Линеаризованная модель расходов и усилий в гидроцилиндре

Как известно, линеаризованное уравнение гидрораспределителя имеет вид:

$$Q_{\text{д}} = \left(\frac{\partial Q_{\text{д}}}{\partial x}\right)_{\substack{\text{точка} \\ \text{линеариз}}} x = K_q x,$$

где $K_q = 2\mu b\sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}$ – коэффициент передачи гидрораспределителя по управляющему воздействию.

В качестве точки линеаризации принято среднее значение перепада давления между давлением питания и давлением в полости цилиндра $\Delta P = 50 \cdot 10^5$ Па (см. рис. 8). Тогда коэффициент будет равен $K_q = 5{,}573$. Таким образом, при максимальном раскрытии гидрораспределителя на 1 мм, расход на выходе не превышает 200 л/мин.

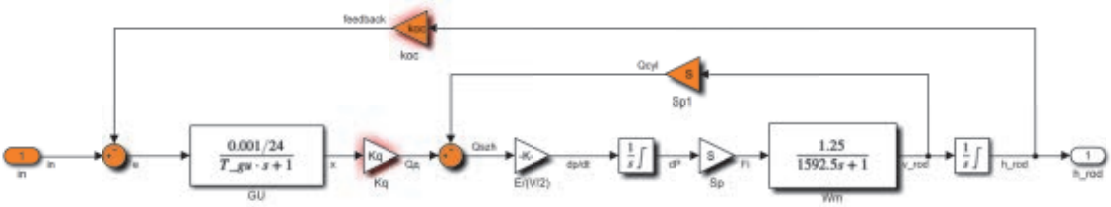


Рисунок 8 — Модель линеаризованной системы

В итоге, передаточная функция разомкнутой системы примет вид:

$$W(s) = W_{GU}(s) \cdot K_q \cdot W_{\text{гц}}(s) \cdot \frac{1}{s} \cdot k_{oc}$$

Коэффициент в обратной связи k_{oc} определяется исходя из выбранного датчика линейного перемещения. Выбранный датчик на выходе выдает сопротивление, которое измеряется. Коэффициент будет равен

$$k_{oc} = \frac{1500}{2} \cdot \frac{\text{Ом}}{\text{м}}$$

Поскольку управление осуществляется цифровым устройством, и синтез системы управления с коэффициентом обратной связи в 750 является достаточно сложным, нормализуем сигнал цифровым образом так чтобы, чтобы коэффициент составил

$$k_{oc} = \frac{24}{1.5} \cdot \frac{2}{1500} \cdot \frac{1500}{2} = \frac{24}{1.5} = 16\ \left[\frac{\text{В}}{\text{м}}\right]$$

При расчете системы управления, передаточную функцию $W_{\text{гц}}(s)$ можно заменить простым коэффициентом усиления [4], т.к. постоянные времени этого звена много меньше остальных постоянных времени. С практической точки зрения это объясняется тем, что переходный процесс в жидкости затухает значительно быстрее, чем в других элементах. Правомерность такой замены также подтверждается графиками частотных характеристик, представленными на рисунке 9, которые отличаются только в высокочастотной области [5].

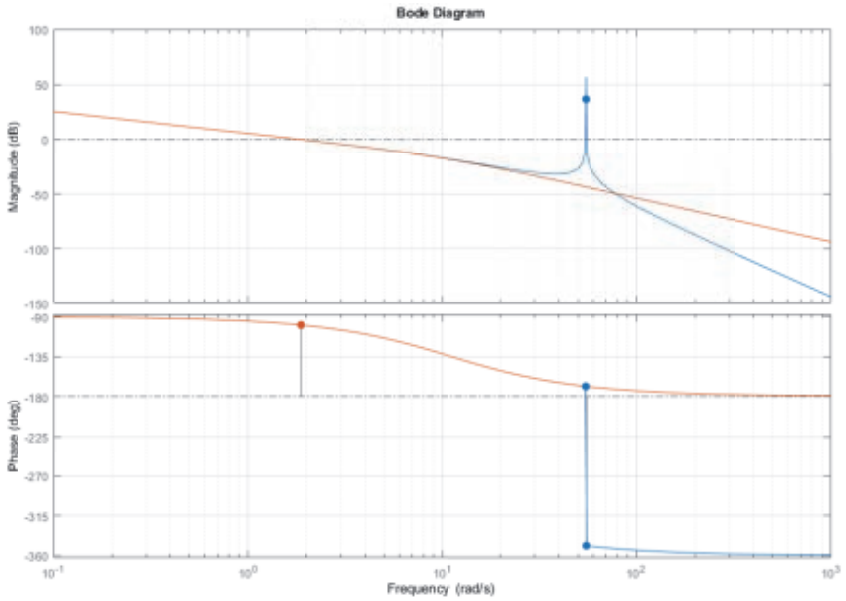


Рисунок 9 — Частотные характеристики системы с нормализованным

В качестве регулятора была выбрана вариация ПИД-регулятора, как самого часто используемого. Была найдена упрощенная модель, представляющая из себя передаточную функцию вида $\frac{k_{об}}{T_2 s(T_1 s+1)}$.

$$W(s) = \frac{0.184}{s(0.09s + 1)}$$

Поскольку передаточная функция состоит из апериодического звена и интегратора, замкнутых обратной связью, то известна постоянная времени $T_2 = 1$ с. Коэффициент усиления $k_{об} = 0{,}184$. Реакция системы амортизатора и упрощенной системы на единичное входное воздействие почти не отличаются [6].

В теории подчиненного регулирования [4] для приведенной передаточной функции объекта управления существует два способа настройки [7]. Отличительная особенность данной передаточный функции заключается в наличии в самой системе интегрирующего звена. Поэтому первый способ – это ПИ-регулятор, который позволяет скомпенсировать одну, обычно большую постоянную времени. Реализуется такой способ введением рассчитанного П-регулятора. Второй способ – это ПД-регулятор, который позволяется скомпенсировать обе постоянных времени.

Если сравнить реакции системы с П-регулятором и с ПД-регулятором на единичное входное воздействие (см. рис. 10).

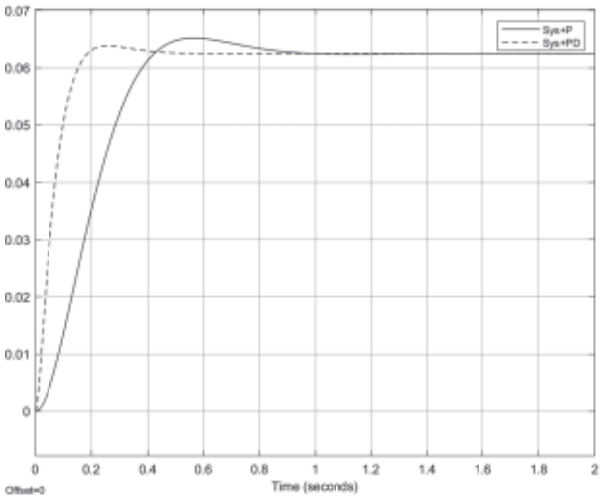


Рисунок 10 — Сравнение реакции на единичное входное воздействие систем с П-регулятором и с ПД-регулятором

Моделирование системы управления проводится при возмущающем воздействии $dist(t) = 0.8 \sin 2\pi/5.4$. Такое возмущающее воздействие выбрано потому, что является самым сложным для системы стабилизации с динамической точки зрения, т.к. амплитуда сигнала значительна, а период волны является самым маленьким. Модель системы с П-регулятором представлена на рисунке 11.

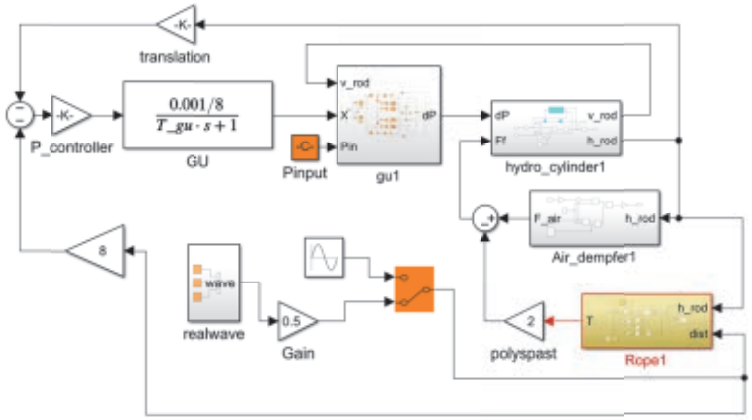


Рисунок 11 — Модель системы с П-регулятором

Результаты моделирования системы с П-регулятором приведены на рисунке 12 и график давлений в полостях активного гидроцилиндра (см. рис. 13). От применения системы с ПД-регулятором было решено отказаться, т.к. из-за введения дифференцирующей составляющей появляется нерасчетный режим работы гидрораспределителя (см. рис. 14).

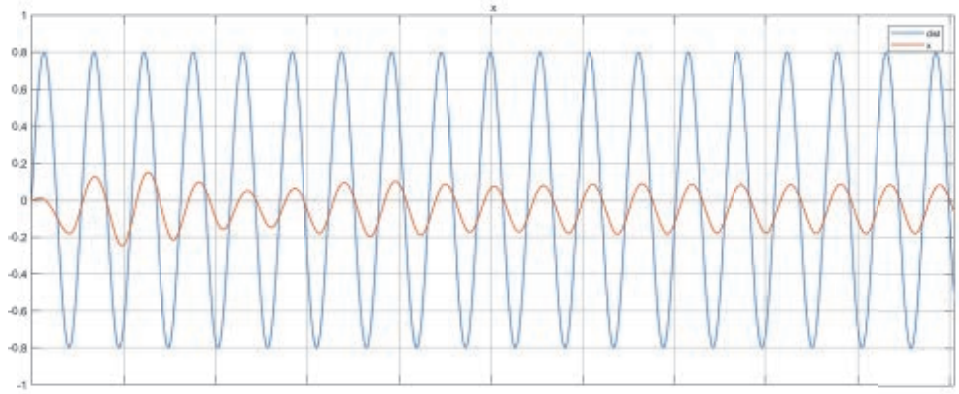


Рисунок 12 — Результаты моделирования системы с П-регулятором

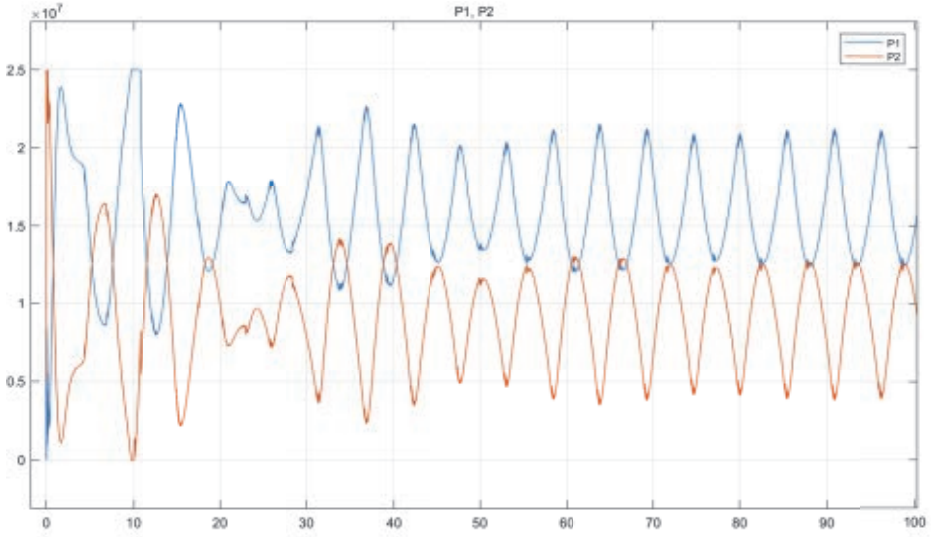


Рисунок 13 — График давлений в полостях активного гидроцилиндра

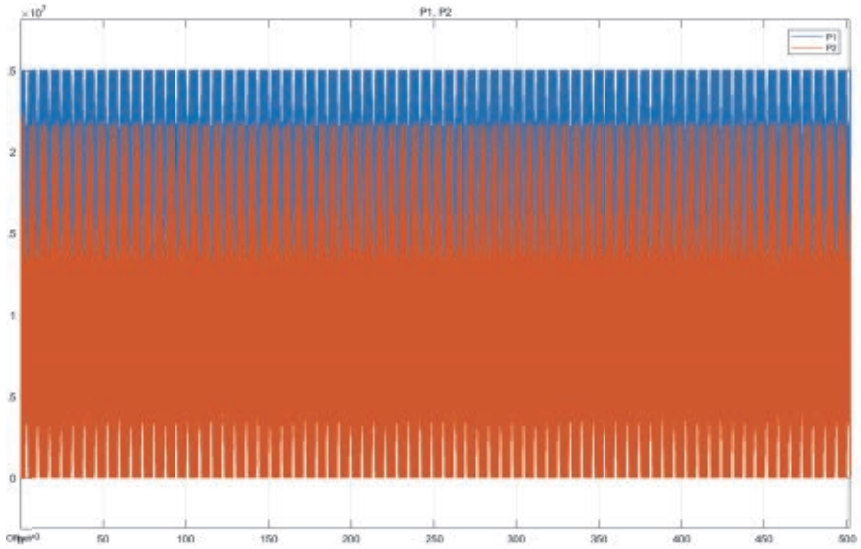


Рисунок 14 — График давлений в полостях активного гидроцилиндра с ПД-регулятором

Реакция системы на сложное гармоническое колебание приведена на рисунке 15. После завершения переходного процесса объекта 1, колебания его положения не превышают 50 см. Необходимо отметить, что хотя единственное гармоническое воздействие является самым сложным для отработки системой, т.к. в этом случае имеют место самые большие значения скорости и ускорения, но колебания объекта не превышают 15 см (см. рис. 12). Поэтому рассмотрим методы повышения инвариантности системы по отношению к входному сигналу.

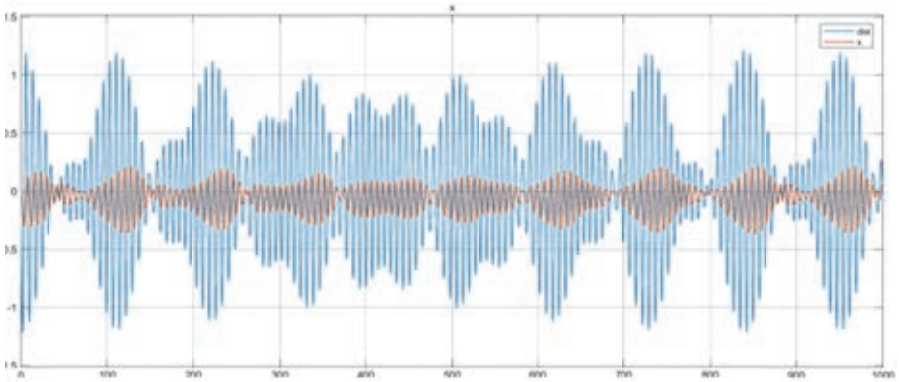


Рисунок 15 — Результаты моделирования системы с П-регулятором
при сложном гармоническом воздействии

Основным методом, используемым при построении инвариантных систем в случае измеримых возмущений, является применение так называемого комбинированного управления, когда, наряду с управлением по отклонению, используется управление по возмущающему воздействию. Идея метода приведена на рисунке 16.

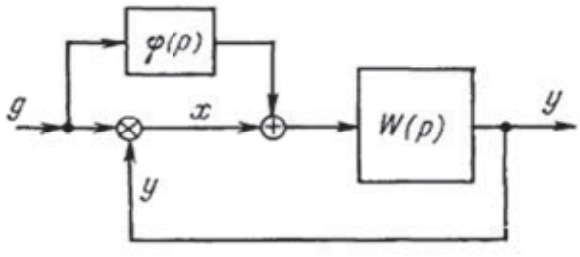


Рисунок 16 — Идея комбинированного управления

Для получения условия полной инвариантности системы управления, следует принять

$$\varphi(s) = \frac{1}{W(s)}.$$

Модель инвариантной системы представлена на рисунке 17.

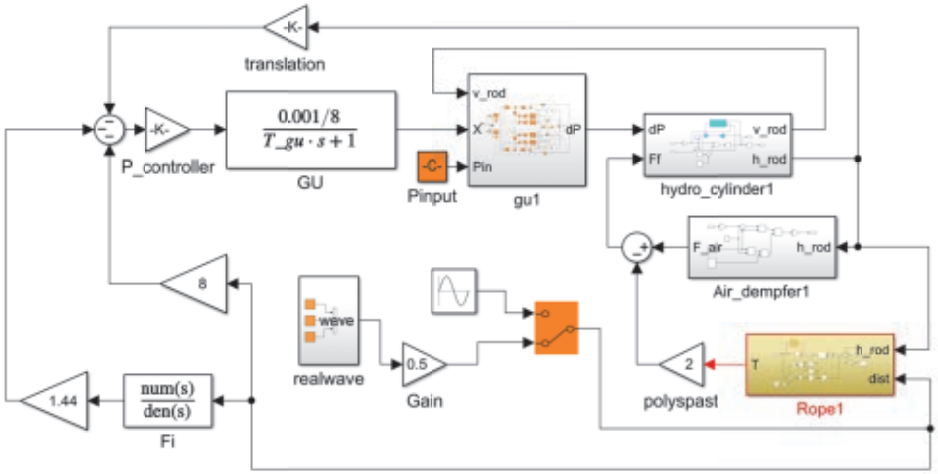


Рисунок 17 — Модель инвариантной системы

По результатам моделирования получим графики переходных процессов положения объекта 1 (см. рис. 18) и давления в полостях активного гидроцилиндра (см. рис. 19) при сложном гармоническом воздействии. Время моделирования составило 500 с.

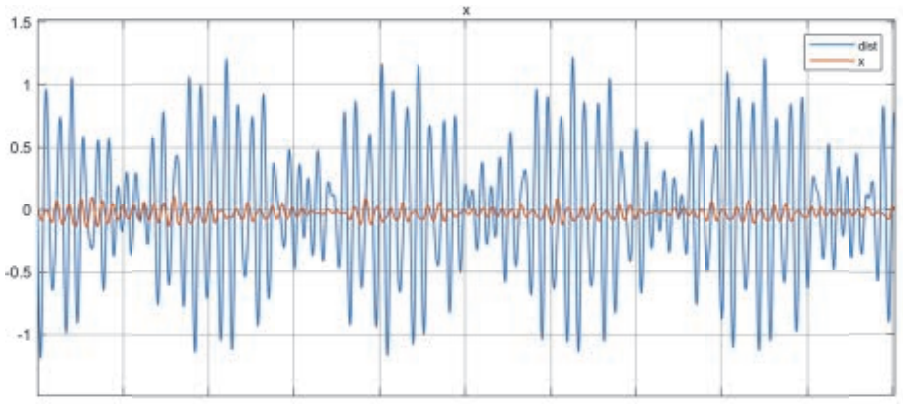


Рисунок 18 — Результаты моделирования инвариантной системы при сложном гармоническом воздействии

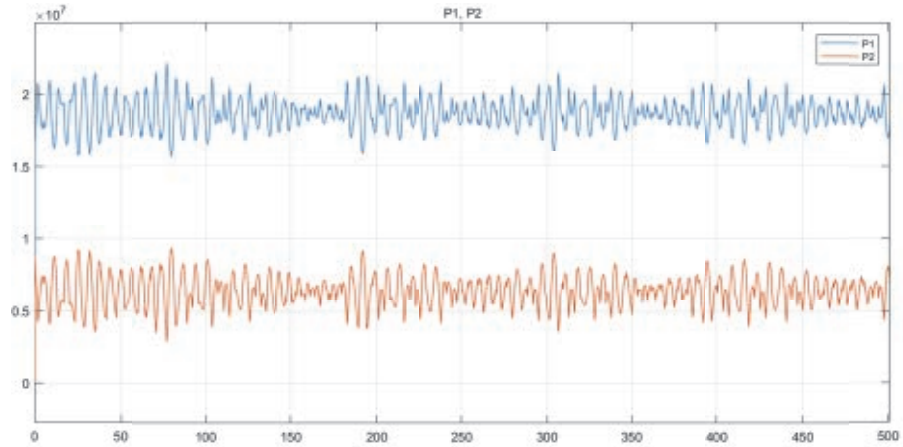


Рисунок 19 — Давление в полостях активного гидроцилиндра инвариантной сложном системы при сложном гармоническом воздействии

В заключение необходимо отметить, что при наличии в системе большого числа нелинейностей, связанных с потоком рабочей жидкости, силами сухого трения, адиабатическим процессом в пневмогидровытеснителе, а также нелинейным коэффициентом упругости троса, удалость в результате получить качественную систему стабилизации, применив при этом простые и широко распространенный методы коррекции.

Литература

1. Гамынин Н.С., Гидравлический привод систем управления / М.: Машиностроение, 1972. — 376 с.
2. Воронов Д.Ю., Гидроцилиндры: учеб.-метод. пособие / Тольятти: ТГУ, 2011. — 72 с.
3. Черный Г.Г., Газовая динамика: Учебник для университетов и втузов / М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. — 424 с.
4. Герман-Галкин С.Г., Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0 / СПб.: КОРОНА принт, 2001. — 320 с.
5. Нечаев Ю.М., Никущенко Д.В., Нечеткая формальная система управления моделированием нестационарной динамики подводных объектов / XXIII Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям, т. 1, 2020. — 174 – 176 сс.
6. Плыкина Е.В., Цифровой алгоритм управления гидроприводом с золотниковым распределителем / Техника XXI века глазами молодых ученых и специалистов, № 18, 2020. — 166-174 сс.
7. Васьков А.Г., Зюбин И.А., Кушнир Н.А., Гидропривод в системах управления затворами гидросооружений / Гидротехническое строительство, №3, 2020. — 55-58 сс.

С.С. Кавтрев, Е.Ю. Смирнова, В.А. Леонтьев, А.С. Проценюк, М.Н. Плавинский

МОДЕЛИ ПРИМЕНЕНИЯ ГРУППЫ НПА, ОРГАНИЗАЦИЯ СВЯЗИ И ВЫПОЛНЕНИЕ ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ

ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург, s.kavtrev@rtc.ru

Аннотация

При выполнении работ в подводной среде все большую роль играют робототехнические средства (РТС). Применение РТС позволяет снизить или исключить факторы риска, связанные с нахождением человека под водой, а также уменьшить стоимость работ.

С развитием подводной робототехники нарастает и степень специализации подводных роботов. Различают автономные (АНПА), телеуправляемые (ТНПА) и гибридные (ГНПА) необитаемые подводные аппараты. Автономные в свою очередь условно делят на классы по габаритно-массовым характеристикам, телеуправляемые помимо данного деления делят также по функциональному назначению на осмотровые и рабочие.

Необитаемые подводные аппараты (НПА) широко применяются для решения двух классов задач: выполнение осмотрово-поисковых миссий с применением АНПА, и выполнение отдельных технологических операций с применением ТНПА. Тем не менее, комплексные задачи решаются с применением водолазов, а НПА применяются на отдельных участках цепи технологических процессов, поэтому большой потенциал заключает в себе задача автоматизации работы на протяжении всей цепи технологических процессов, разбитых на отдельные операции, с организацией взаимодействия РТС-исполнителей каждого из входящих в общую работу процессов.

Совместное применение различных классов НПА в рамках группы роботов предоставляет широкие возможности автоматизации технологических операций, в перспективе избавит человека от необходимости непосредственного нахождения в подводной среде в зоне повышенной опасности.

Ключевые слова

АНПА, ТНПА, подводный аппарат, групповое применение.

S.S. Kavtrev, E.Y. Smirnova, V.A. Leontiev, A.S. Procenyuk, M.N. Plavinskiy

APPLICATION MODELS OF THE UUV GROUP, COMMUNICATION ISSUES AND EXECUTION OF COMMON TECHNOLOGICAL OPERATIONS

Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, St. Petersburg, Russia, s.kavtrev@rtc.ru

Abstract

When performing work in the underwater environment, uninhabited underwater vehicles (UUVs) have an increasingly important role. The use of UUVs allows you to reduce or eliminate the risk factors associated with a person being under water, as well as reduce the cost of work.

With the development of underwater robotics, the degree of specialization of underwater robots is also increasing. There are autonomous (AUV), remotely operated (ROV) and hybrid uninhabited underwater vehicles. Autonomous, in turn, are conditionally divided into classes according to their overall weight characteristics, remote-controlled, in addition to this division, are also divided according to their functional purpose into inspection and workers.

Uninhabited underwater vehicles (UUVs) are widely used to solve two classes of tasks: performing inspection and search missions using AUVs, and performing certain technological operations using ROVs. Nevertheless, complex tasks are solved with the use of divers, and UUVs are used in separate sections of the technological process chain, so the task of automating work throughout the entire technological process, di-

vided into separate operations, with the organization of interaction between the UUVs performers of each of the incoming to the overall operation of the processes.

The combined use of various classes of UUVs within a group of robots provides ample opportunities for automating technological operations, in the future, it will save a person from the need to be directly in an underwater environment in a high-risk area.

Key words

ROV, underwater vehicle, UUV, group application.

Для решения комплексных инженерных задач в подводной среде требуется слаженное взаимодействие необитаемых подводных аппаратов (НПА) различных классов, с координацией их работы на основании данных, поступающих от НПА-участников процесса в единую систему обработки информации (ЕСОИ). Под ЕСОИ понимается аппаратно-программный комплекс, принимающий и обрабатывающий данные, полученные с применяемых робототехнических средств, имеющий устройства отображения для визуального контроля проводимых работ операторами.

Рассмотрим вопросы взаимодействия группы НПА на примере задачи автоматизации процесса демонтажа и подъема крупных подводных конструкций, в которой задействованы осмотровые НПА, телеуправляемые НПА рабочего класса, средства подъема частей конструкции.

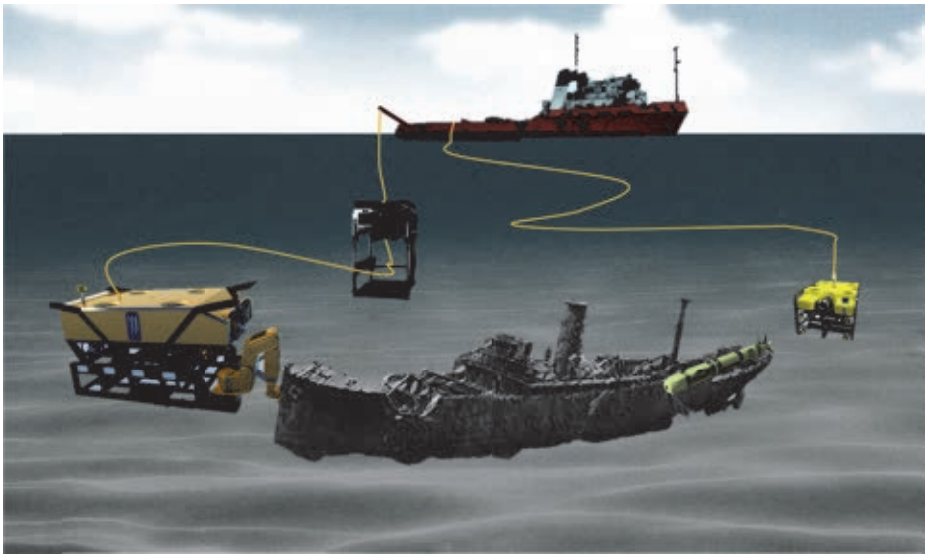


Рисунок 1 — Применение группы НПА в процессе демонтажа подводных конструкций

Осмотровые НПА определяют контуры объекта, выявляют места разъемных соединений и предпочтительные области реза исходя из конструкции объекта. Такие НПА должны быть оснащены телевизионными камерами, гидролокаторами бокового обзора (ГБО), гидролокаторами кругового или секторного обзора. Полученные данные передаются в ЕСОИ по кабелю или радиоканалу после всплытия АНПА либо по оптическому каналу передачи данных в подводном положении в зависимости от условий проведения работ. Алгоритмы обработки информации, полученной от телевизионных камер и ГБО, разработанные в ЦНИИ РТК и опыт их применения описаны в [1, 2,].

Алгоритмы системы технического зрения НПА, работающего в составе группы, включают алгоритмы обработки информации телекамер и гидролокаторов, позиционирования - относительного положения в требуемой системе координат, например, в системе координат маркеров, размещенных на подводном объекте, а также алгоритмы оперативной обработки данных бортовых гидролокаторов, обеспечивающие решение задачи поиска и обнаружения протяженных подводных объектов произвольной формы, обнаружения компактных объектов, алгоритмы распознавания и идентификации объектов, поиска заданного образа по изображению объекта из базы данных.

После проведения анализа полученной информации задействуются телеуправляемые НПА, оснащенные рабочим инструментом, выполняющие демонтаж элементов конструкции. На рисунке 2 показаны результаты натурных экспериментов по выполнению подводной резки с применением разработанного в ЦНИИ РТК ТНПА.

Рисунок 2 — Слева – ТНПА, разработанный в ЦНИИ РТК. Справа - линии разреза, выполненные с применением ТНПА.

Для каждого типа инженерных задач требуется уточненный анализ проводимых работ на предмет возможности и целесообразности исключения участия человека в подводных работах, и разработка модели применения группы НПА для каждого типа задач.

Для построения универсальной системы планирования работ выработан общий подход к реализации интеллектуального управления НПА, выраженный в планировании операций и задание этого плана в виде структурированной (разделенной на подзадачи) миссии. Алгоритмы планирования операций построены на базе иерархии миссия-сценарий-технологическая операция (ТОП) [3]. Верхний уровень плана работ – миссия, которую НПА должны выполнять в соответствии с требованиями по назначению. Планирование миссии выполняется путём задания последовательности выполнения типовых сценариев, задаваемых оператором до начала работы. Второй уровень плана работ – типовой сценарий. Это отдельная функционально завершенная часть миссии, представляющая собой последовательность выполнения технологических операций. Каждый типовой сценарий имеет свой набор параметров, которые необходимо задавать при планировании. Третий уровень – ТОП. Это набор действий по выполнению частной функциональной задачи при отработке типового сценария, с использованием оборудования НПА. Уровень ТОП позволяет описать логику функционирования системы в процессе выполнения задания без излишней детализации. ТОП представляет собой вычислительный алгоритм или процедуру управления каким-либо устройством НПА и при описании плана работ является неделимой сущностью. Определены базовые миссии НПА, сформированные из разработанного перечня типовых сценариев. С помощью типовых сценариев могут быть сформированы новые миссии, которые, в свою очередь могут выполняться в произвольной последовательности. Такой подход обеспечивает гибкость планирования при том, что отдельные элементы плана представляют собой отработанные и отлаженные процедуры.

Однако помимо преимуществ, предоставляемых возможным совместным применением подводных роботов различных типов, неизбежно возникновение проблем, связанных с организацией взаимодействия НПА.

Слаженное взаимодействие группы роботов под водой требует повышения уровня интеллектуализации бортовой системы управления НПА, задействованных в работе. Здесь под интеллектом мы будем понимать познавательную способность, включая:

– обработку информации о внешней среде с построением ее моделей;

– использование данной информации для планирования поведения в условиях заведомой неполноты информации и непредсказуемо изменяющейся внешней обстановки [4].

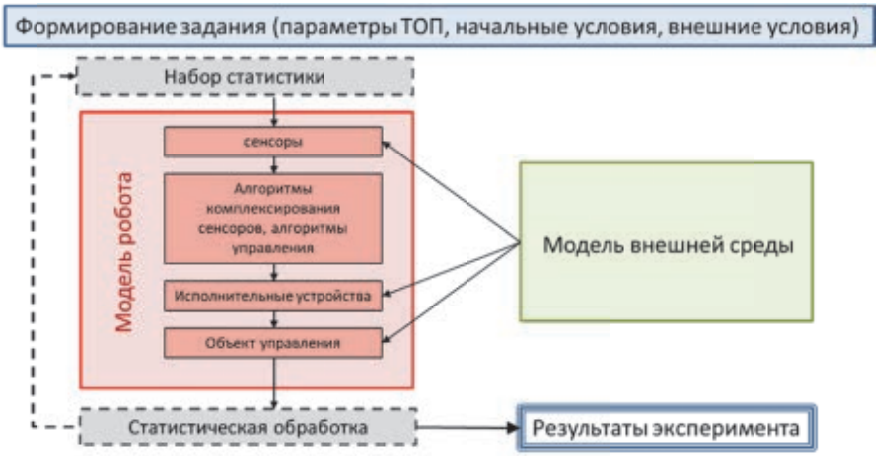


Рисунок 3 — Взаимодействие модели робота с моделью внешней среды

Полученная информация о внешней среде передается в единую систему обработки информации. Передача информации может осуществляться по кабелю ТНПА, и по оптическому каналу передачи данных АНПА. При необходимости действия АНПА корректируются посредством передачи команд по гидроакустической связи.

Поскольку группа НПА находится в условиях слабо детерминированной среды, для успешной реализации сценариев в части ориентирования на объекте, а также для предотвращения аварийных ситуаций, вызванных столкновениями НПА с элементами конструкции объекта, элементами окружающей обстановки, а также между собой, при управлении НПА должна быть обеспечена высокая точность позиционирования относительно других объектов, и для синтеза и отработки оптимальных алгоритмов управления особую важность приобретает детальная проработка динамики НПА.

Выработана концепция выполнения гидродинамических расчетов, заключающаяся в формировании иерархии математических моделей. В основе иерархии находится максимально точная гидродинамическая модель. С помощью такой модели можно получить характеристики переходных процессов, вызванных управляющими воздействиями. Полученные характеристики далее используются для описания НПА типовыми динамическими звеньями, формируется упрощенная динамическая модель [5, 6]

Конечной моделью является кибернетическая модель, абстрагированная от физического взаимодействия аппарата с водной средой и представляющая собой последовательность связанных между собой типовых динамических звеньев с известными передаточными функциями. Конечная модель обладает приемлемой скоростью счета и позволяет решить заданные целевые задачи по анализу и синтезу и отработке алгоритмов обработки информации и управления. Тем самым достигнута оптимизация требуемых вычислительных ресурсов.

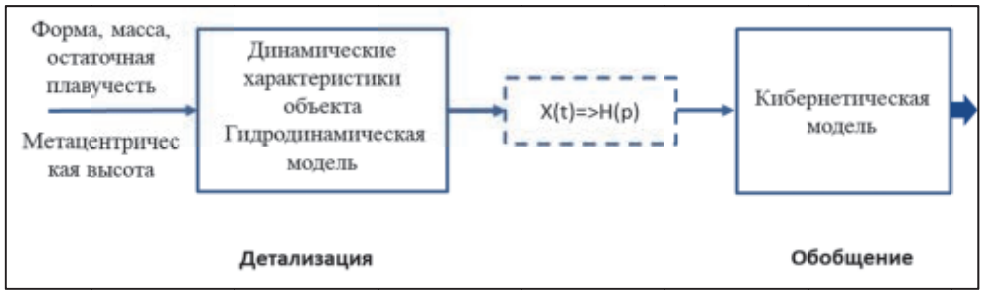


Рисунок 4 — Формирование кибернетической модели

На рисунке 4 схематично показан процесс формирования кибернетической модели, то есть переход от детального описания параметров аппарата (существенных для гидродинамической модели) к обобщенному описанию, позволяющему при проведении вычислительного эксперимента сосредоточиться на решении главных проблем анализа и синтеза алгоритмов управления.

Данная концепция подробно описана в [7], приведены результаты расчетов, полученные для разработанного в ЦНИИ РТК с целью отработки алгоритмов интеллектуальной системы управления ТНПА легкого класса.

Предложена концепция по организации подводных работ с применением группы НПА, заключающаяся в построении взаимодействия НПА различных классов. Рассмотрена возможность накопления данных в единой системе обработки информации с возможностью использования всеми НПА-участниками группы. Описан общий подход к формированию миссий для различных классов НПА с учетом функционального назначения НПА. Описаны возможные пути достижения точности управления НПА с учетом динамических характеристик.

Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России FNRG-2022-0025 1021101316168-7-2.2.2 № 075-01623-22-01 «Алгоритмы группового управления автономными необитаемыми подводными аппаратами в условиях ограниченной пропускной способности гидроакустических каналов связи».

Литература

1. Polovko S. A Computer Vision System for Determination of AUV Position in the Problem of Cooperative Docking / Polovko S., Tseluyko V., Popov A., Stepanov D. // Extreme Robotics – 2019. – Т.1. - №1. – С. 264-275, ISSN: 2658-7645.

2. Stepanov Dmitrii. Visual-Internal Sensor Fusion to Accuracy Increase of Autonomous Underwater Vehicles Positioning / Popov Alexander, Gromoshinskii Dmitrii, Shmakov Oleg // Proceedings of the 29th DAAAM International Symposium (2018), pp.0615-0623, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-20-4, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria.]

3. Смирнова Е.Ю., Спасский Б.А. Организация супервизорного управления в сценариях экстремальной робототехники. Робототехника и техническая кибернетика. - Т.8. - №4. - Санкт-Петербург: ЦНИИ РТК. - 2020. - С. 245-258.

4. Юревич Е.И. Основы Робототехники. – «БХВ-Петербург», 2018. – 304 с

5. Киселев, Л.В. О некоторых задачах динамики и управления пространственным движением АНПА / Л.В. Киселев, А.В. Инзарцев, А.В. Медведев // Подводные исследования и робототехника. – 2006. – № 2. – С. 13–26.

6. Vasilyev, Ivan. The Vision System Software to Enable Maneuvering of Underwater Vehicle / Popov Alexander, Smirnova Ekaterina, Shmakov Oleg, Tselouyko Vasily // Proceedings of the 29th DAAAM International Symposium (2018), pp.0540-0547, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-20-4, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria.]

7. Кавтрев С.С. Опыт создания гиперизбыточного необитаемого подводного аппарата / Проценюк А.С., Плавинский М.Н., Половко С.А., Смирнова Е.Ю., Щур Н.А. // Материалы XIV мультиконференции по проблемам управления МКПУ-2021, в 4 т. / Ростов-на-Дону, 2021. Том 1, С. 187-189.

И.Ю. Липко, К.В. Дементьев

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ УПРОЩЁННОЙ ФОРМЫ ПОДВОДНОГО АППАРАТА НА ЕГО УГЛОВЫЕ КООРДИНАТЫ: ПРЯМОУГОЛЬНЫЙ ПАРАЛЛЕЛЕПИПЕД И ЦИЛИНДР

ФГАОУ ВО Севастопольский государственный университет, Севастополь, ivanlipko@yandex.ru

Аннотация

Статья посвящена вопросу моделирования подводного аппарата, а именно влиянию измеряемых параметров, используемых при формировании модели, на результаты моделирования. Создание подводного аппарата, синтез системы управления тесно связаны с математической моделью. Актуальными вопросами являются адекватность модели реальному аппарату, выявление степени влияния параметров на адекватность модели. Представленная статья содержит результаты моделирования подводного аппарата при варьировании измеряемых параметров для призматической и цилиндрической форм, влияние на угловые координаты. Показаны примеры траекторий, указаны факторы влияющие на изменение траектории движения.

Ключевые слова

Подводный аппарат, форма подводного аппарата, влияние массы, влияние центра плавучести.

I.U. Lipko, K.V. Dementiev

THE INFLUENCE OF THE PARAMETERS OF THE SIMPLIFIED SHAPE OF THE UNDERWATER VEHICLE ON ITS ANGULAR COORDINATES: A RECTANGULAR PARALLELEPIPED AND A CYLINDER

Robotics and Intelligent Control Systems Laboratory, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia, ivanlipko@yandex.ru

Abstract

The article is devoted to the problem of modeling an underwater vehicle, namely the influence of the measured parameters used in the formation of the model on the simulation results. The creation of the underwater vehicle and the synthesis of the control system are closely related to the mathematical model. Relevant issues are the adequacy of the model to the real vehicle, the identification of the degree of parameters influence on the adequacy of the model. The presented article contains the results of modeling an underwater vehicle with varying measured parameters for prismatic and cylindrical shapes that affect angular coordinates. Examples of trajectories are shown, the factors influencing the change in the trajectory of movement are indicated.

Key words

Underwater vehicle, shape, influence of mass, influence of buoyance center.

Эта статья посвящена вопросу моделирования и математического описания динамики подводного аппарата (ПА). Подробно рассматривается влияние неточностей в задании параметров формы модели на переходные процессы, траектории. ПА представляются в форме прямоугольного параллелепипеда и цилиндра.

Больше всего известных научных исследований в области моделирования подводных аппаратов основаны на публикациях T. Fossen [1]. Они содержат модели в 3, 4, 6 степенях свободы, описание внешних возмущений, систем управления [2, 3]. Математическая модель является ключевым элементом при планировании пути движения, управления и навигации.

При создании моделей применяются различные методы, начиная от физических и математических представлений, заканчивая численными бассейнами и нейронными сетями. Первые обычно более интерпретируемы, но менее точны, а вторые наоборот. Чем проще модель, тем легче получить конкретные числовые значения для изучаемого ПА, но хуже соответствие реальным экспериментам. Так или иначе реалистичное моделирование с помощью математических моделей необходимо, поскольку оно гораздо дешевле, чем испытание прототипов.

Однако даже при сложной геометрии корпуса, его всё же приходится аппроксимировать простыми формами. Тогда возникает вопрос о том, на сколько плоха или хороша будет модель. Причём это можно увидеть, даже не проводя эксперимент с настоящим аппаратом.

Основная мотивация исследования – это выяснить влияние измеряемых параметров модели на поведение аппарата. Если имеется реальный аппарат, для которого строится математическая модель, то следует знать, где проявить высокую точность измерений, а где можно сэкономить. Где можно воспользоваться модельными данными из САПР, а где необходимо точное измерение или проведение натурных экспериментов? Предполагается, что, зная влияние параметров на поведение, можно построить стратегию проведения экспериментов.

В этой статье рассматривается влияние параметров на угловые координаты подводного аппарата. Движение подводного аппарата производится под воздействием обобщённых сил, действующих на центр масс.

Математическая модель

При аппроксимации и некоторых упрощениях возможно получить следующее описание уравнение динамики ПА

$$M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu + g(\eta) = \tau$$

где $M = M_{RB} + M_A$, $C(\nu) = C_{RB}(\nu) + C_A(\nu)$, $D(\nu)$ – матрица демпфирования, M_{RB} – матрица масс твёрдого тела, $C_{RB}(\nu)$ – Кориолисова и центростремительная матрица твёрдого тела, M_A – матрица дополненных масс, $C_A(\nu)$ – матрица дополненных масс к Кориолисовой силе, $\dot{\eta} = \nu = \begin{bmatrix}\nu_1\\ \nu_2\end{bmatrix} = [u \quad v \quad w \quad p \quad q \quad r]^T$ – вектор обобщённых координат.

Матрица M_{RB} постоянная, симметричная и положительно определённая ($M_{RB} > 0$). В большинстве случаев она записывается в следующей форме

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} mI_3 & -mS(r_C^b) \\ mS(r_C^b) & I_{O_b} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{6\times 6},$$

где m – масса ПА, I_3 – единичная матрица, I_{O_b} тензор инерции. Помимо этих параметров в матрице M_{RB} участвуют коэффициенты, учитывающие площади проекций: $C_p^{XY} = A_p^{XY}/A^{XY}$, $C_p^{YZ} = A_p^{YZ}/A^{YZ}$ и $C_p^{XZ} = A_p^{XZ}/A^{XZ}$ где A_p^{ij} – площади проекций реального объекта (считаются экспериментально), A^{ij} – площади проекций аппроксимирующей формы.

Элементы матрицы I_{O_b} можно вычислить аналитически для призмы и цилиндра, зная геометрические размеры аппарата. Очевидно, что возможно допустить неточности при измерении. Другими измеряемыми величинами являются масса m и расстояние от центра тяжести r_C^b. Гораздо сложнее дела обстоят с коэффициентами заполнения формы, используемые для определения элементов матрицы демпфирования и сопротивление корпуса о жидкость. Получить последние путём только измерения ПА в натуре сложно. Обычно для этого производят 3D-моделирование в САПР и оттуда получают величины площадей проекций.

Мы будем рассматривать такие аппроксимирующие формы аппаратов как цилиндр и прямоугольная призма. От выбора формы зависит расчёт элементов матрицы инерции I_{O_b}. Например, для цилиндрической формы

$$I_{xx} = \frac{mR^2}{2},$$

$$I_{yy} = \frac{m}{12}(L^2 + 3R^2),$$

$$I_{zz} = \frac{m}{12}(L^2 + 3R^2),$$

и для призмы

$$I_{xx} = \frac{m}{12}(W^2 + H^2),$$

$$I_{yy} = \frac{m}{12}(L^2 + H^2),$$

$$I_{zz} = \frac{m}{12}(W^2 + L^2).$$

где L, W, H, R – длина, ширина, высота, радиус. Аппроксимируя ПА цилиндром, мы считаем радиус по следующей форме, что позволяет сохранять баланс объёмов между формой цилиндра и призмы:

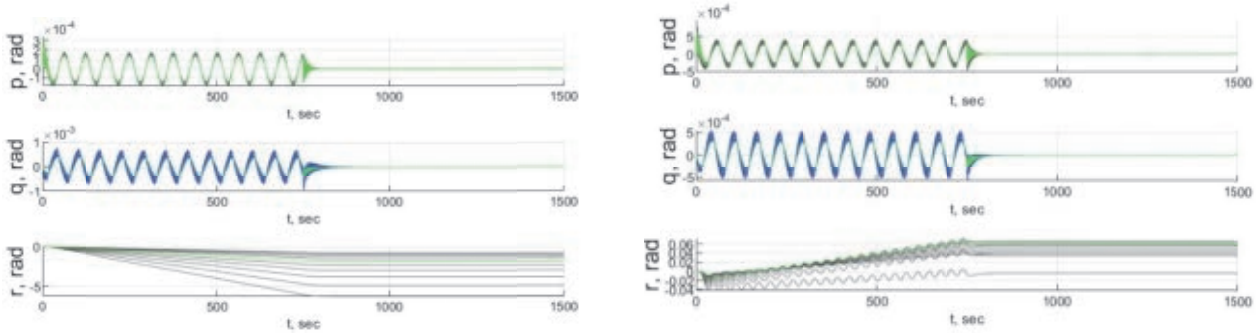
$$R = \sqrt{W \cdot H/\pi},$$

где W, H – длина, ширина, высота, радиус.

Результаты симуляции

Симуляция проводится для известной модели SF-30k [4]. Рассматриваются переходные процессы, траектории движения, отклонения от номинального движения. Начальное состояние аппарата $\eta_1 = [0 \quad 0 \quad -5]^T$, $\eta_2 = [0 \quad 0 \quad 0]^T$, что соответствует погруженному аппарату на глубину 5 метров, находящемуся в покое. В качестве управления на ПА воздействует сила, приложенная к центру масс. В следующих экспериментах задаётся управление, реализующее круговое движение в течении 750 сек модельного времени, а затем движение по прямой.

Рассматривается зависимость величин углов крена, дифферента и курса при изменении массы аппарата. Девиация возникает в углах r для всех форм. Но для параллелепипеда отклонения меньше, чем для цилиндрической формы. Изменения в углах q и p есть несущественные, менее 10^{-3} рад. Отклонение же в траекториях движения существенные: до 30 см от номинальной траектории.



а) б)

Рисунок 1 – Переходные процессы при вариации массы аппарата до 50%

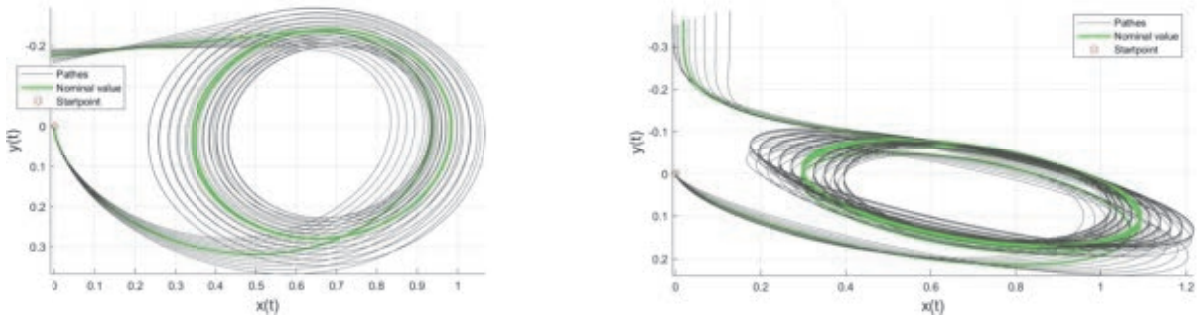


Рисунок 2 — Пучки траекторий подводного аппарата при вариации массы аппарата до 50%

Далее показаны результаты при варьировании линейных размеров аппарата. Отклонения наблюдаются в углах r независимо от формы. Изменения в углах q и p есть несущественные, менее 10^{-5} рад.

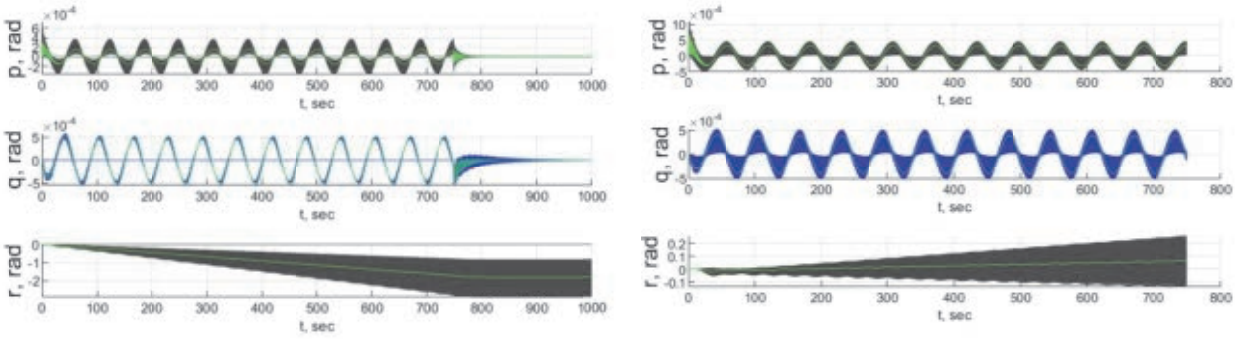


Рисунок 3 — Переходные процессы при варьировании линейных размеров

При варьировании расположения центра плавучести наблюдается влияние во всех углах независимо от формы. Стоит обратить внимание на степень сдвига траекторий в сторону от номинальной.

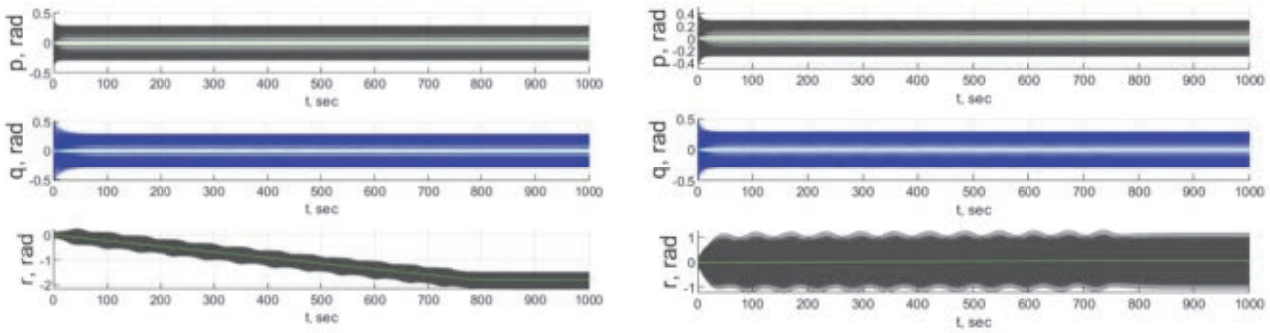


Рисунок 4 — Переходные процессы при варьировании расположения центра плавучести

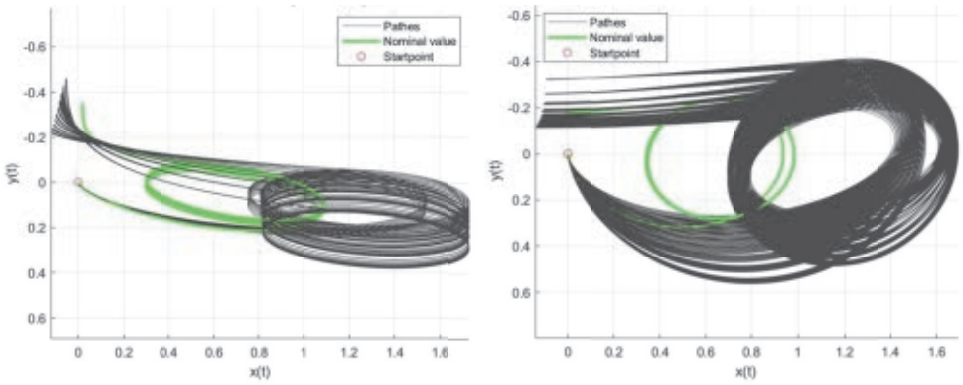


Рисунок 5 — Пучки траекторий при варьировании расположения центра плавучести

Важно отметить, что используемая модель для формы параллелепипеда плохо отражает угловые изменения курсового угла. В некоторых экспериментах оказывается, что на некоторых участках траектории тело ПА движется боком или задом наперёд. Этот неочевидный факт следует учитывать при моделировании. С другой стороны, это говорит о необходимости уточнения и модификации модели, учитывающей моменты и точки приложения силы.

Предполагаем, что полученные результаты, их систематизация может быть полезна при сравнении результатов натурного эксперимента с моделированием. Ведь понимание того, как влияют параметры математической модели, могут указать на неточности в измерениях параметров модели. Например,

траектория модели уходит в сторону – значит необходимо уточнить координаты центра плавучести, сильный разброс параметров, значит нужно начать с уточнения массы, далее размеры и т.п.

В результате моделирования показано, что обе формы чувствительны к вариации параметров. При этом подводный аппарат цилиндрической формы обладает худшими гидродинамическими качествами в сравнении с прямоугольной (того же объема и длины), имея большее сопротивление при движении. В методе расчета динамики модели через площади проекций важно точно рассчитать площади для всех форм. Неточности в выборе центра плавучести одинаково влияют на обе рассматриваемые формы негативно, вызывая непредсказуемость отклонений при движении.

Результаты симулирования показывают, что при дальнейшем моделировании системы управления подводным аппаратом, следует применять несколько моделей подводного аппарата, отличающихся величинами параметров. Тогда по пучкам траекторий, будет возможно судить о качестве систем управления. Это будет весьма полезным при синтезе управляющих регуляторов, которые следовало бы создавать робастными к изменениям параметров и погрешностям в их измерении.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской федерации, Соглашение Минобрнауки РФ № 075-03-2021-092/5 от 29.09.2021, FEFM-2021-0014 №121111600136-3, а также Программа «Приоритет 2030».

Литература

1. Fossen T.I. Guidance and Control of Ocean Vehicles. John Wiley & Sons Ltd, 1994. ISBN. 0-471-94113-1.

2. Antonelli G. Underwater robots, 4th edition. Springer Tracts in Advanced Robotics, 2018. 374 p.

3. Kramar V. Investigation of changes and development of mathematical model for a drilling vessel. Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium, 2015. pp. 49-55.

4. O.A. Eidsvik, “Identification of hydrodynamic parameters for ROVs: master thesis”, Trondheim, 185 p., 2015.

Д.И. Николаев

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ КОМПЛЕКСОВ СВЯЗИ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ ПРИ ИХ ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРНОЙ ИЗБЫТОЧНОСТИ

НИЦ ТТ ВМФ, Санкт-Петербург, nikolaev.d.i@yandex.ru

Аннотация

В работе рассматривается способ оценки надежности комплексов связи автономных необитаемых подводных аппаратов при их переменной структурной избыточности. Разработанная методика оценки надежности основана на имитационной модели процесса функционирования комплекса связи. С помощью метода статистического моделирования, используя разработанную имитационную модель, находятся необходимые параметры надежности. Полученная методика позволяет находить зависимость вероятности приема сообщения от времени эксплуатации комплекса связи при заданных условиях эксплуатации, а также оценивать структурную важность его элементов. В ходе работы разработан ряд рекомендаций, направленных на повышение времени работоспособности комплекса связи, за счет управления его структурной избыточностью. Результаты работы позволят получать характеристики надежности комплексов связи различных автономных необитаемых подводных аппаратов, оценивать структурную важность их элементов, а также управлять их структурной избыточностью для увеличения времени работоспособности.

Ключевые слова

Надежность, комплекс связи, подводный аппарат, структурная избыточность, канал связи, износ.

D.I. Nikolaev

RELIABILITY ASSESSMENT OF COMMUNICATION COMPLEXES OF AUTONOMOUS UNMANNED UNDERWATER VEHICLES WITH THEIR VARIABLE STRUCTURAL REDUNDENESS

Research Center of the Naval Telecommunication Technology, St. Petersburg, nikolaev.d.i@yandex.ru

Annotation

The paper considers a method for assessing the reliability of communication systems for autonomous uninhabited underwater vehicles with their variable structural redundancy. The developed methodology for assessing reliability is based on a simulation model of the process of functioning of the communication complex. Using the method of statistical modeling, using the developed simulation model, the necessary reliability parameters are found. The obtained technique allows one to find the dependence of the probability of receiving a message on the time of operation of the communication complex under given operating conditions, as well as to evaluate the structural importance of its elements. In the course of the work, a number of recommendations were developed aimed at increasing the uptime of the communication complex by managing its structural redundancy. The results of the work will allow obtaining the reliability characteristics of communication complexes of various autonomous uninhabited underwater vehicles, evaluating the structural importance of their elements, as well as managing their structural redundancy to increase the uptime.

Key words

Reliability, communication complex, underwater vehicle, structural redundancy, communication channel, wear.

Эффективность практического использования любой сложной технической системы может быть сведена к минимуму, если она будет работать ненадежно. Для того, чтобы автономный необитаемый подводный аппарат был способен выполнять свои основные целевые задачи, необходим комплекс

связи, имеющий надежность согласно установленным требованиям. Поэтому актуальной задачей является исследование способов оценки надежности таких систем, а также разработка рекомендаций, направленных на ее повышение.

Объект исследования – комплекс связи (КС) автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), который рассматривается как совокупность взаимосвязанных средств связи, энергообеспечения, контроля, предназначенная для работы в $N_К$ каналах связи [1].

Анализ существующих методик по оценке надежности сложных систем [2-7] показал, что они не способны корректно оценить время работоспособности КС АНПА в условия переменной структурной избыточности, а также при динамически изменяющихся вероятностях правильного приема сообщений в каналах связи. Под переменной структурной избыточностью понимается недоступность для эксплуатации определенных элементов комплекса связи в некоторые моменты времени. Например, при движении в подводном положении часть антенных устройств оказывается недоступной.

Цель работы – оценка надежности КС АНПА в условиях его переменной структурной избыточности.

Перед разработкой методики оценки надежности функционирования КС, то есть способности в течение времени сохранять работоспособность, было определено понятие отказа КС. Под отказом КС понимается состояние, в котором он не способен обеспечить требуемую вероятность правильного приема сообщения.

Разрабатываемая методика оценки надежности основана на имитационной модели процесса функционирования комплекса. С помощью метода статистического моделирования, используя разработанную имитационную модель, находятся необходимые параметры надежности.

Метод статистического моделирования (или метод Монте-Карло) применяется для исследования поведения вероятностных систем в условиях, когда неизвестны в полной мере внутренние взаимодействия в этих системах. Этот метод заключается в воспроизведении исследуемого физического процесса при помощи вероятностной математической модели и вычислении характеристик этого процесса. Метод основан на многократных испытаниях построенной имитационной модели с последующей статистической обработкой полученных данных с целью определения числовых характеристик рассматриваемого процесса в виде статистических оценок его параметров.

На рисунке 1 представлен алгоритм работы разработанной методики.

Алгоритм включает следующие шаги:

1. Ввод исходных данных. На этом этапе происходит ввод данных. Полученные данные проверяются на их корректность:

– длина массивов статистических данных о каналах связи и возможности эксплуатации элементов КС должна соответствовать времени исследования с заданным временным шагом;

– введенные данные о топологии каналов связи не должны противоречить друг другу;

– не должно быть элементов, не оказывающих влияние на работоспособность КС.

2. Запуск процесса статистического моделирования. Моделирование состоит из *NumExp* имитационных моделирований процесса функционирования КС. Число испытаний задается во входных параметрах.

3. После выполнения моделирования работы КС в течение заданного времени в рамках одного испытания происходит добавление полученных данных в общий статистический массив.

4. После выполнения всех необходимых испытаний происходит статистическая обработка массива данных. В результате находится оценка необходимых параметров надежности КС.

На рисунке 2 представлен процесс имитационного моделирования работы КС в течение заданного времени в рамках одного испытания.

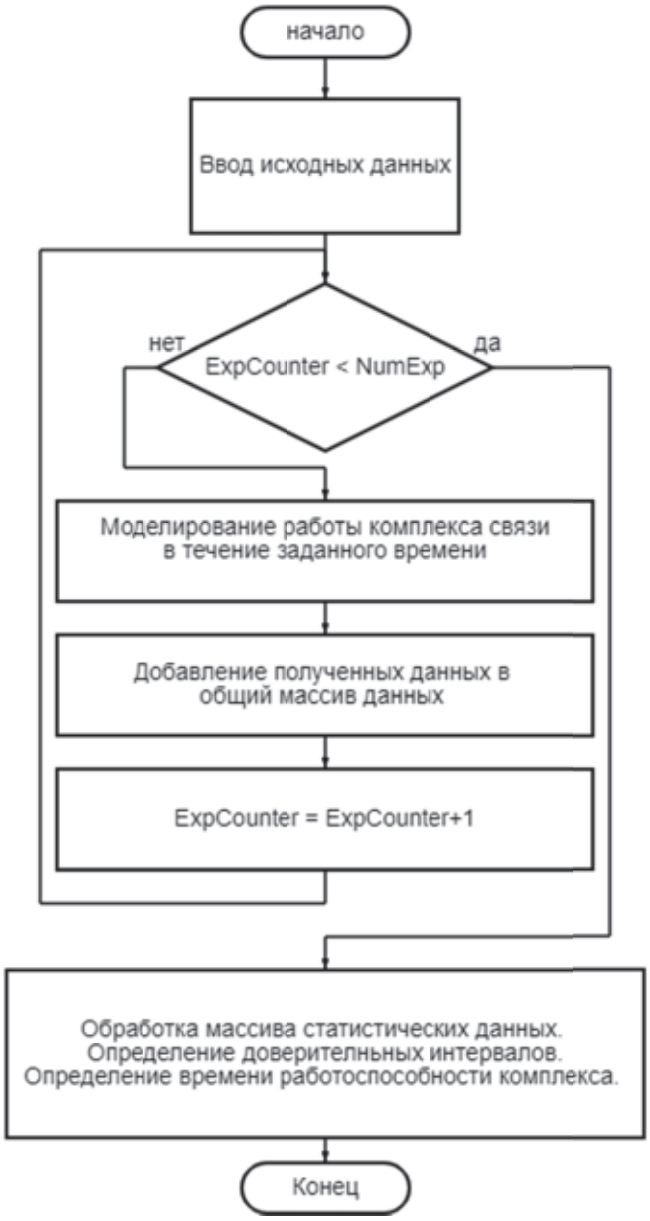


Рисунок 1 — Алгоритм работы имитационной модели

Алгоритм включает следующие шаги:

1. В соответствии с заданными характеристиками элементов КС, а также вероятностей производственного, конструктивного, эксплуатационного отказов, для данного испытания находятся времена отказов элементов КС.

2. Запуск процесса моделирования работы КС в течение заданного времени в рамках одного испытания. Выполнение пунктов 3–7 в течение всего времени наблюдения с заданным временным шагом.

3. Увеличение наработки работающих элементов на один временной шаг.

4. Сравнение текущих наработок элементов КС с их временем отказа. При совпадении наработки элемента с его временем отказа происходит событие «Отказ».

5. Получение вероятностей правильного приема сообщений в каналах связи для текущего момента времени.

6. Используя данные о работоспособности элементов КС, информацию о доступности использования элементов в текущий момент времени, определяются работоспособные каналы в текущий момент времени.

7. Используя информацию о работоспособности каналов связи, данные о текущих вероятностях правильного приема сообщений в каналах связи, определяется текущая вероятность правильного приема сообщения КС.

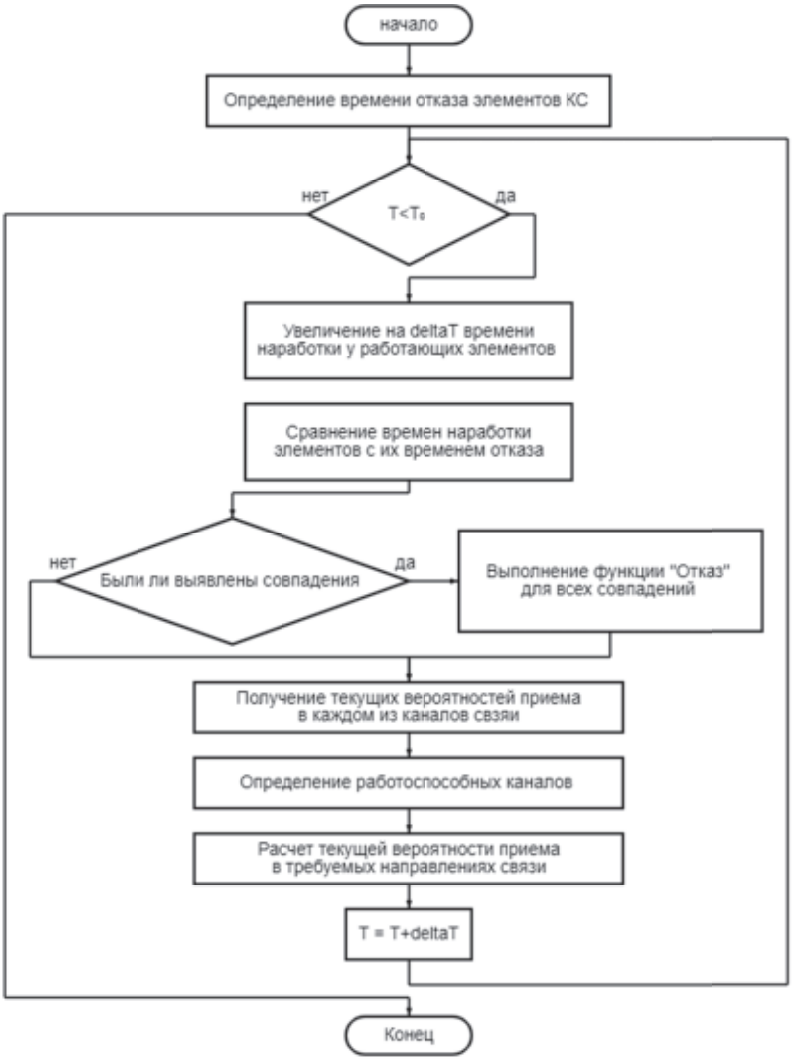


Рисунок 2 — Алгоритм моделирования работы комплекса связи в течение заданного времени

Результатом выполнения алгоритма является зависимость вероятности приема сообщения комплексом связи в течение заданного времени наблюдения, а также оценка структурной важности элементов КС.

Получив инструмент для оценки надежности комплексов связи, возможно приступить к исследованию способов ее повышения.

Вероятность отказа элемента зависит от многих факторов (конструктивных, производственных, эксплуатационных), но в большей степени определяется деградационными факторами, то есть естественным изнашиванием в процессе работы. Снижение времени работы элементов КС продлевает его срок службы. Поэтому актуальной является задача снижения времени эксплуатации элементов КС с целью продления времени их эксплуатации.

Введем коэффициент изношенности i-ого элемента КС:

$$d_i = \frac{T_{тек_i}}{T_{0_i}}, \qquad (1)$$

где $T_{тек_i}$ – текущий время эксплуатации i-ого элемента КС, T_{0_i} – средняя наработка на отказ (время

гарантированной работы)i-ого элемента КС согласно технической документации.

Введем показатель изношенности k-ого канала связи, состоящего из $N_{Э_k}$:

$$K_{изн_k} = \max_{x_i \in X_k} d_{x_i}, \quad (2)$$

где X_k– множество элементов k-ого канала связи

Если отключить часть избыточных каналов связи, то есть перевести оборудование, которое их обеспечивает, в состояние покоя, то общее время работоспособности КС АНПА увеличится. Происходит перераспределение избыточной вероятности приема в продолжительность работоспособности КС. Выбор, какие каналы являются избыточными, осуществляется, исходя из максимального значения коэффициента изношенности элемента соответствующего канала связи. То есть больший приоритет на отключение имеет тот канал, в составе которого имеется наиболее изношенный элемент. Данная методика позволяет снизить время работы элементов КС и, как следствие, продлить время работоспособности КС в целом.

На рисунке 3 представлен алгоритм определения минимально числа работающих элементов КС, необходимых для обеспечения требуемой вероятности правильного приема сообщения КС.

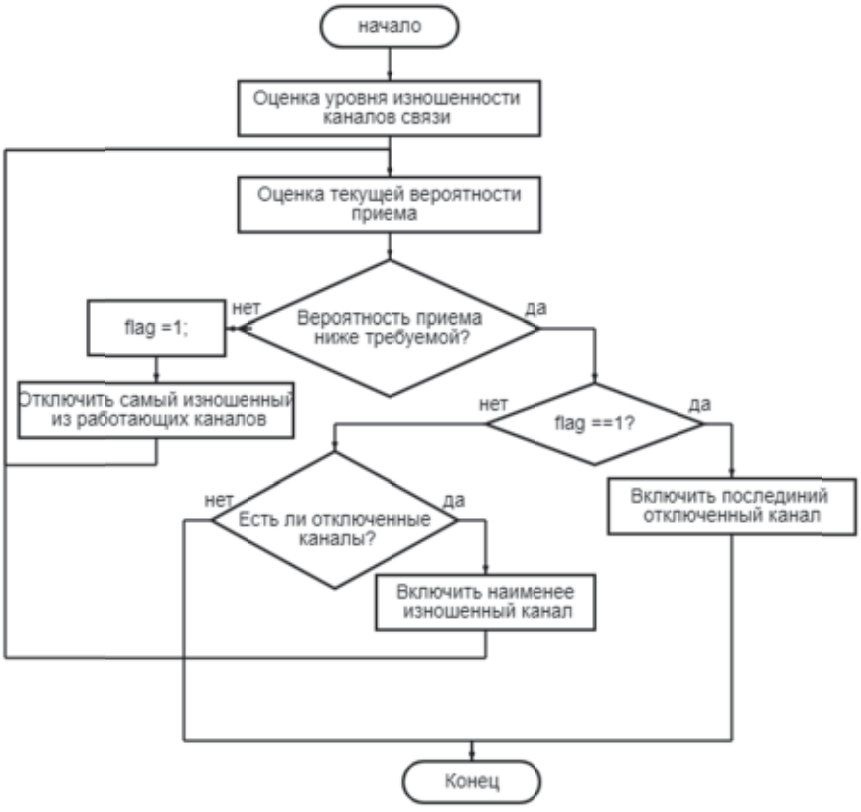


Рисунок 3 — Алгоритм работы методики

Алгоритм включает следующие шаги:

1. Оценка уровня изношенности каналов связи. Используя данные о текущем времени эксплуатации элементов КС, согласно (1), вычисляются коэффициенты изношенности элементов каналов связи. Исходя из полученных коэффициентов, вычисляются коэффициенты изношенности каналов связи, согласно (2). Полученные коэффициенты сортируются в порядке убывания. Таким образом, формируется приоритетность каналов на отключение. Неработоспособные каналы в данном алгоритме не участвуют.

2. Оценка текущей вероятности приема сообщения КС с использованием текущей вероятности правильного приема сообщения в каналах связи, данных о возможности использования элементов КС

в текущий момент времени, а также информации о временно отключенных, избыточных каналах.

3. Сравнение текущей вероятности правильного приема сообщения КС с требуемым. Если условие работоспособности КС выполняется, то отключается самый изношенный канал и переход алгоритма в пункт 2. Если условие не выполняется, то осуществляется проверка наличия отключенных в течение выполнения текущего алгоритма каналов. Если такие каналы были, то включается последний отключенный канал и алгоритм заканчивается. Если при выполнение текущего алгоритма каналы не отключались, то проверяется наличие отключенных ранее каналов. При их наличии происходит включение наименее изношенного канала связи и переход в пункт 2. Если отключенных каналов связи нет, то алгоритм заканчивается.

Таким образом, предложенный алгоритм позволит минимизировать время использования элементов КС и, как следствие, продлит срок их эксплуатации.

Проведем сравнение между собой двух способов функционирования КС:

- одновременно на работают все каналы (Способ 1) ;
- каналы связи работают согласно предложенной методике (Способ 2).

Структурная схема рассматриваемого КС представлена на рисунке 4.

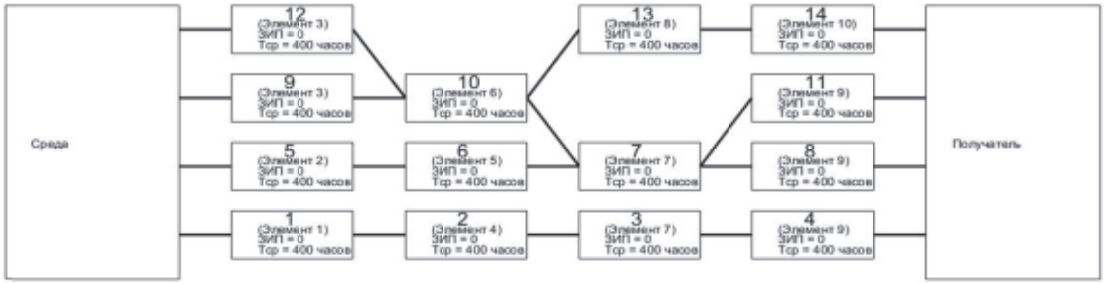


Рисунок 4 — Структурная схема рассматриваемого КС

Каждый рассматриваемый элемент подчиняется экспоненциальному закону распределения наработки до отказа со среднем временем наработки на отказ 400 ч. КГ ЗИП для всех элементов – 0,5. Вероятности конструктивного, производственного и эксплуатационного отказов приняты равными 0. Информация о топологии КС представлена в таблице 1.

Таблица 1 — Ввод информации о топологии КС

	Вводимая информация	**Вводимое значение**
а	Количество элементов КС	14
б	Количество каналов связи	4
в	Информация о структуре каналов связи	Информация о структуре первого канала 1 2 3 4 Информация о структуре второго канала 5 6 7 8 Информация о структуре третьего канала 9 10 7 11 Информация о структуре четвертого канала 12 10 13 14

Для рассматриваемого случая отсутствует динамика изменения вероятностей правильного приема сообщений в каналах связи. Она принята равной 0,85 во всех каналах.

Интервал наблюдения: 400 ч.

Число испытаний: 1000.

Граничное значение вероятности правильного приема сообщения КС: 0,8.

Для Способа 1 в течение всего времени наблюдения все элементы КС доступны для использования. Для Способа 2 динамика изменения структурной избыточности подчинена разработанной методике.

Сравнение стандартного режима работы каналов с режимом, согласно предлагаемой методике, представлено на рисунке 5.

Из полученных результатов видно, что предлагаемая методика позволяет повысить время работоспособности КС с 158 ч. до 234 ч. (на 32%). Произошло перераспределение избыточной вероятности приема в продолжительность работоспособности КС.

Эффективность данного метода определяется числом структурно независимых каналов связи.

Таким образом, в ходе работы была разработана методика, позволяющая оценить надежность КС АНПА при его переменной структурной избыточности. Дан ряд рекомендаций, позволяющих повысить временя работоспособности КС АНПА за счет управления его структурной избыточностью.

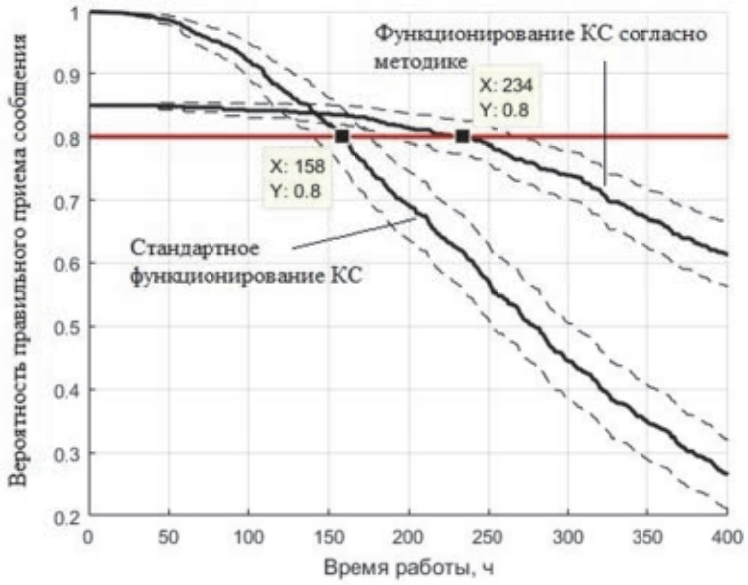


Рисунок 5 — Сравнение стандартного режима работы каналов с режимом, согласно предлагаемой методике

Литература

1. Катанович А.А., Ершов В.Н.Комплексы и системы связи ВМФ. – СПб.: Судостроение, 2014. – 256 с.

2. Буренин В.В. Надежность технических систем объектов наземных комплексов: учеб. пособие //– М.: МАДИ, 2017. – 88 с.,

3. Викторова В.С., Степанянц А.С. Модели и методы расчета надежности технических систем /. - Изд. 2-е, испр. - Москва : URSS : Ленанд, cop. 2016.,

4. Андреев А.В. Теоретические основы надежности технических систем /учебное пособие/ А,В. Андреев, В. В. Яковлев, Т.Ю. Короткая. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. — 164 с

5. Северцев Н. А. Теория надежности сложных систем в отработке и эксплуатации : Учебное пособие / Н. А. Северцев. – 2-е изд., пер. и доп. – Москва : Издательство Юрайт, 2019. – 435 с.

6. Строгонов А., Жданов В., Полесский С. Обзор программных комплексов по расчету надёжности сложных технических систем // Компоненты и технологии. - 2007. - № 5. - С. 183 - 190.

7. Конесев С. Г. Методы оценки показателей надежности сложных компонентов и систем / С. Г. Конесев, Р. Т. Хазиева // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1-1. – С. 57.

Д.К. Серов

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ

ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург, d.serov@rtc.ru

Аннотация

Проведено исследование различных алгоритмов управления движением автономного необитаемого подводного аппарата при выполнении операций вертикальной парковки и стыковки. Разработана упрощенная модель подводного аппарата, совершающего движение в вертикальной плоскости. Описан принцип работы рассмотренных адаптивных методов управления нелинейными динамическими системами. Разработаны и реализованы адаптивные алгоритмы подстройки коэффициентов стандартного ПИД-регулятора. Изучено влияние внешних возмущающих воздействий, вызванных нестационарностью водной среды, дискретности управления и погрешностей измерения глубины на качество управления глубиной подводного аппарата. Проведены вычислительные эксперименты, по результатам которых выявлены достоинства и недостатки различных адаптивных подходов к управлению при наличии возмущающих факторов. Доказана эффективность адаптивных регуляторов по сравнению со стандартными ПИД- и LQR-регуляторами.

Ключевые слова

Автономный необитаемый подводный аппарат; алгоритмы управления; вертикальная парковка; возмущающие воздействия; адаптивное управление.

D.K. Serov

STUDY OF UNMANNED UNDERWATE VEHICLE MOTION CONTROL ALGORITHMS IN THE VERTICAL PLANE

Russian State Scientific Centre for Robotics and Technical Cybernetics, St. Peterburg, Russia, d.serov@rtc.ru

Abstract

A study of autonomous unmanned underwater vehicle motion control algorithms during vertical parking and docking is carried out. A simplified underwater vehicle vertical plane motion model is developed. The operation principle of the considered adaptive control methods for nonlinear dynamic systems is described. Adaptive algorithms for adjusting the coefficients of a standard PID controller are developed and accomplished. The influence of external disturbances caused by the nonstationarity of the aquatic environment, control discreteness and depth measurement errors on the quality of underwater vehicle depth control is studied. Computational experiments are performed. According to the experiment's results, pros and cons of various adaptive control algorithms in the presence of disturbances are carried out. The effectiveness of adaptive controllers compared to standard PID and LQR controllers is proven.

Key words

Autonomous underwater vehicle; control algorithms; vertical parking; disturbances; adaptive control.

В настоящее время автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) активно применяются для решения исследовательских и производственных задач [1]. Ключевой задачей при проектировании АНПА является настройка энергоэффективной системы автоматического управления, позволяющей подводному аппарату с требуемой точностью и скоростью следовать заданной траектории или достигать заданного значения как линейных, так и угловых координат.

Управление подводным аппаратом осложняется такими факторами как нестационарность водной среды, сложность создания адекватной математической модели динамики АНПА, а также возможными аппаратными ограничениями и погрешностями датчиков. Данные факторы особенно критичны при вертикальной парковке подводного аппарата, когда ошибки в управлении могут повести за собой прерывание процесса парковки [2].

Для управления сложными динамическими объектами, к которым относят АНПА, существуют различные подходы к управлению. К ним относят как использование линейных регуляторов, так и робастных и адаптивных регуляторов, предназначенных для управления в условиях нестационарной среды.

В данной работе исследованы различные подходы к управлению движением подводного аппарата в вертикальной плоскости при наличии возмущающих факторов, таких как:

- внешние возмущающие воздействия;
- наличие временных задержек в канале управления и дискретности выдачи управляющих воздействий;
- погрешности измерительных датчиков.

Разработка математической модели АНПА

Эффективность управления глубиной подводного аппарата различными регуляторами исследовалась на примере упрощенной модели подводного аппарата, совершающего плоское движение.

Предполагается, что управление движением аппарата осуществляется при помощи вертикальных подруливающих устройств (ВПУ). Для определения текущей глубины на аппарате используется датчик давления.

Для упрощения математических расчетов наличием угла атаки, а также возможным влиянием течения принято пренебречь.

Для реализации модели составлена расчетная схема АНПА, представленная на рисунке 1.

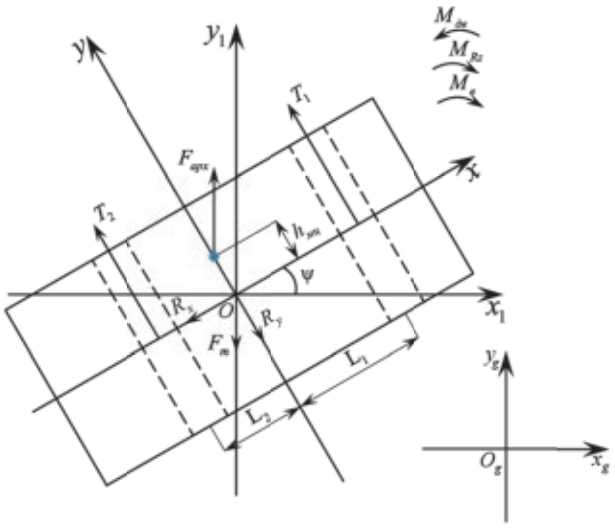


Рисунок 1 — Расчетная схема АНПА

где T_1 и T_2 – силы тяги движителей; $F_т$ – сила тяжести; $F_{арх}$ – сила Архимеда, R_x и R_y – проекции силы сопротивления жидкости; ψ – угол дифферента; $h_{мц}$ – метацентрическая высота; L_1 и L_2 – смещения до шахт движителей относительно центра тяжести; $M_{дв}$ – момент, создаваемый движителями; $M_в$ – метацентрический восстанавливающий момент; M_{Rz} – момент гидродинамического сопротивления жидкости; $O_gX_gY_g$ – глобальная система координат (СК); OXY, OX_1Y_1 – подвижные СК, жестко связанные с телом.

С учетом линейного и углового перемещения подвижной системы координат (СК) OXY относительно глобальной СК $O_gX_gY_g$ для проекции сил и скоростей движения тела на оси локальной систе-

мы координат справедливы уравнения Кирхгофа для динамики абсолютно твердого тела в жидкой среде [3].

$$\begin{cases} \dfrac{\vec{d}}{dt}\vec{P} + \vec{\Omega} \times \vec{P} = \vec{F} \\ \dfrac{d}{dt}\vec{L} + \vec{\Omega} \times \vec{L} + \vec{V} \times \vec{P} = \vec{M} \end{cases} \quad (1)$$

где $\vec{P} = (m_x v_x, m_y v_y, m_z v_z)$ – вектор импульса тела при проекции на оси локальной СК; $\Omega = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ – вектор угловой скорости подвижной СК относительно глобальной; $\vec{F} = (F_x, F_y, F_z)$ – вектор внешних сил, действующие на тело при проекции на оси подвижной СК; $\vec{L} = (I_x\omega_x, I_y\omega_y, I_z\omega_z)$ – вектор момента импульса тела; $\vec{V} = (v_x, v_y, v_z)$ – вектор линейной скорости тела при проекции на оси подвижной СК.

С учетом плоского движения тела, а также упрощенного математического описания сил гидродинамического сопротивления может быть получена следующая система уравнений для описания движения подводного аппарата

$$\begin{cases} m_x \cdot \dfrac{dv_x}{dt} = T_x + P_{\text{ост}} \cdot sin(\psi) - C_x v_x |v_x| + \omega_z m_y v_y; \\ m_y \cdot \dfrac{dv_y}{dt} = T_1 + T_2 + P_{\text{ост}} \cdot \cos(\psi) - C_y v_y |v_y| - \omega_z m_x v_x; \\ I_z \cdot \dfrac{d\omega_z}{dt} = T_1 L_1 - T_2 L_2 - F_{\text{арх}} h_{\text{мц}} \cos(\psi) - C_{\omega z}\omega_z |\omega_z| - v_x v_y (m_y - m_x); \\ v_{xg} = v_x \cdot \cos(\psi) - v_y \cdot \sin(\psi); \\ v_{yg} = v_x \cdot \sin(\psi) + v_y \cdot \cos(\psi); \\ y_g = \int_0^t v_{yg}\, dt; \\ x_g = \int_0^t v_{xg}\, dt. \end{cases} \quad (2)$$

где m_x, m_y – массы тела при движении вдоль соответствующих осей, учитывающие эффект присоединенных масс; $C_x, C_y, C_{\omega z}$ – коэффициенты гидродинамического сопротивления тела; I_z – момент инерции тела при повороте вокруг оси Z; v_{xg}, v_{yg} – скорости движения тела при проекции на оси глобальной системы координат; y_g, x_g – координаты тела в глобальной системе координат.

Описание принципа управления

В данной работе реализован параллельный подход [4] к управлению гиперизбыточным подводным роботом (ГПР) в вертикальной плоскости, схематически изображенный на рисунке 2.

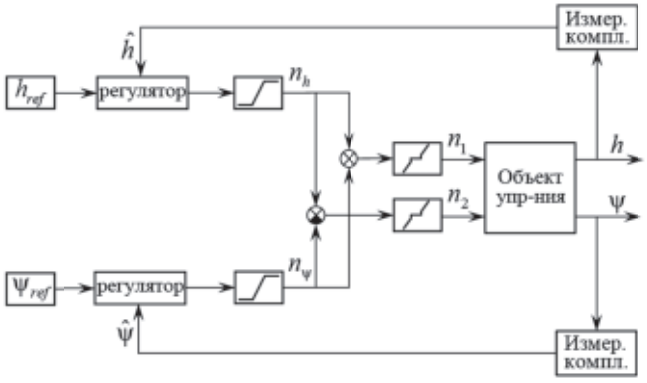


Рисунок 2 — Параллельный подход к управлению ГПР

где h_{ref}, ψ_{ref} – заданные значения глубины и дифферента; n_h, n_ψ – управляющие воздействия, формируемые регуляторами; n_1, n_2 – частоты вращения кормового и носового движителей; h, ψ – фактические значения глубины и дифферента; $\hat{h}, \hat{\psi}$ – измеренные значения глубины и дифферента.

Ключевым достоинством данного подхода к управлению является возможность проводить независимую настройку регуляторов в контурах управления глубиной и дифферентом с учетом зоны нечувствительности, а также возможных ограничений на максимальную частоту вращения движителей. При этом предполагается, что зависимость между частотой вращения вертикальных подруливающих движителей и тягой на движителях носит квадратичный характер вида

$$\begin{cases} T_1 = n_1 \cdot |n_1| \cdot K \\ T_2 = n_2 \cdot |n_2| \cdot K \end{cases} \quad (3)$$

где K – коэффициент, определяемый на основе экспериментальных данных.

В данной работе исследование различных регуляторов проводится только для управления глубиной. Для учета возможного влияния контура управления дифферентом на управление глубиной, предполагается, что заданный дифферент изменяется по синусоидальному закону с амплитудой 5° и периодом 20 с. Для управления дифферентом при исследовании как адаптивных, так и неадаптивных методов управления, используется стандартный ПД-регулятор.

Описание рассматриваемых регуляторов

В данной работе рассмотрены адаптивные, а также робастные и стандартные (линейные) подходы к управлению. Их эффективность исследована как при наличии возмущающих факторов, вызванных как нестационарным характером водной среды, так и возможными ограничениями, накладываемыми на бортовую аппаратуру.

Список рассматриваемых регуляторов, а также их классификация приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Рассматриваемые регуляторы

Неадаптивные регуляторы	Адаптивные регуляторы
ПИД	Нечеткий ПИД
LQR	MRAC-ПИД
	ADRC
	NMPC с наблюдателем возмущающих воздействий

Так, в работе рассмотрено управление глубиной подводного аппарата при использовании стандартного линейного ПИД-регулятора, настроенного при отсутствии возмущающих воздействий, робастно-настроенного ПИД-регулятора, а также LQR-регулятора, использующего линеаризованную по Тейлору модель контура управления глубиной.

Также рассмотрен NMPC-регулятор [5], являющийся модификацией LQR-регулятора для нелинейных систем. В отличие от LQR-регулятора, NMPC, который может использовать для минимизации такой же квадратичный функционал, решает задачу оптимизации на каждом шаге на число тактов t_p, называемой временем прогноза, и применяет только первый такт управления. Данные особенности позволяют задавать регулятору ограничения на управление, а также на каждом такте управления изменять модель системы при наличии возмущающих воздействий. Таким образом, NMPC-регулятор в отличие от LQR-регулятора при наличии наблюдателя возмущающих воздействий способен адаптироваться к изменяющимся параметрам внешней среды [6].

Для обеспечения адаптивности ПИД-регулятора в работе представлены его модификации: ПИД-регулятор на нечеткой логике и ПИД-регулятор на основе эталонной модели.

Суть управления ПИД-регулятором на нечеткой логике заключается в разработке функций фаззификаций, при помощи которых составляющие вектора состояний могут быть преобразованы в нечет-

кие переменные, а также правил, по которым полученные нечеткие переменные могут быть преобразованы в нечеткие коэффициенты ПИД-регулятора. Далее по одному из методов осуществляется дефаззификация нечетких коэффициентов в обычные коэффициенты ПИД-регулятора. В данной работе, в отличие от аналогичных работ [7], [8] реализована не полная настройка ПИД-регулятора, а подстройка пропорционального коэффициента при помощи нечеткой логики, схематически представленная на рисунке 3.

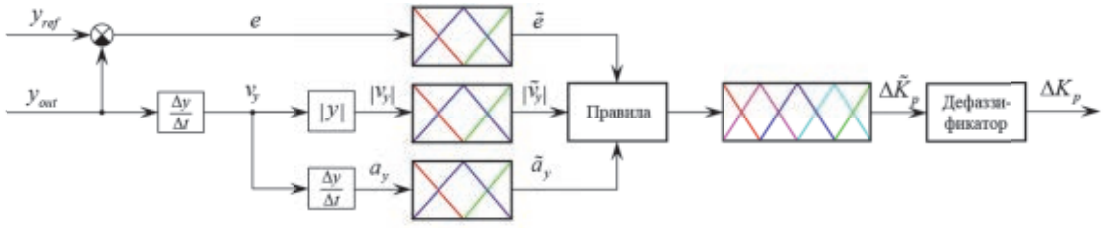


Рисунок 3 — Схема адаптивной подстройки пропорционального коэффициента ПИД-регулятора на нечеткой логике

Адаптация с использованием MRAC-ПИД регулятора реализована аналогичным образом, предполагающим только подстройку пропорционального коэффициента, настроенного при отсутствии возмущающих воздействий регулятора. Для подстройки коэффициента используется эталонная модель, позволяющая получить эталонный переходный процесс по глубине при прямой связи с заданной глубиной. На каждом такте управления измеренное значение глубины сравнивается с глубиной эталонной модели, и определяется ошибка эталонной модели e_m, на основании которой модифицируются коэффициенты ПИД-регулятора. При этом скорость модификации зависит от коэффициента γ, называемого коэффициент адаптации. Для подстройки пропорционального коэффициента ПИД-регулятора реализован нормализованный MIT-подход [9], схематически представленный на рисунке 4.

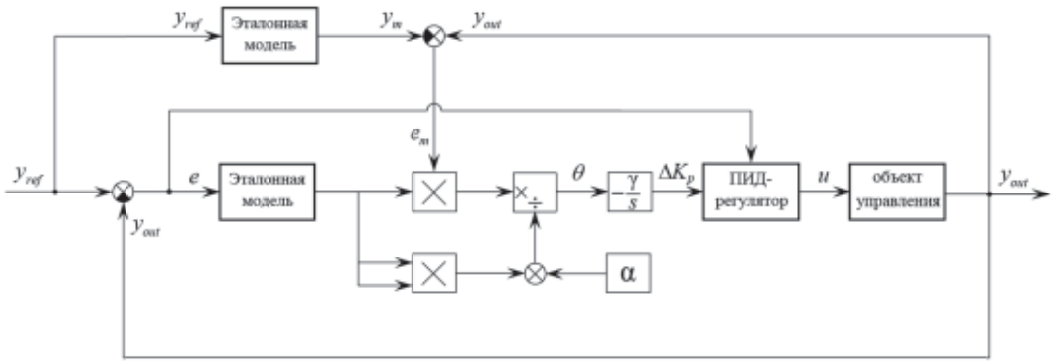


Рисунок 4 — Схема адаптивной подстройки пропорционального коэффициента ПИД-регулятора на основе эталонной модели

Также рассмотрены ADRC-регулятор [10], предполагающий математическое описание динамики объекта 2 порядка в виде

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = f(x_1, x_2, w, t) + b_0 u, \\ y = x_1. \end{cases} \quad (4)$$

где $x = (x_1, x_2) -$ вектор состояния системы; $f(x_1, x_2, w, t) -$ обобщенное возмущающее воздействие; $w -$ внешнее возмущающее воздействие; $b_0 -$ коэффициент, определяемый динамикой объекта; $u -$ управляющее воздействие; $y -$ управляемая величина.

ADRC-регулятор осуществляет адаптивное управление путем компенсации обобщенного возмущающего воздействия при наличии соответствующего наблюдателя, например, наблюдателя Люенбергера [11]. Таким образом, закон управления приводится к виду

$$u = \frac{-\hat{f} + u'}{b_0} \tag{5}$$

где $\hat{f}$ – наблюдаемое обобщенное возмущающее воздействие, u' – простой линейный закон управления (например, ПД-регулятор).

Схематически процесс управления линейным ADRC-регулятором представлен на рисунке 5.

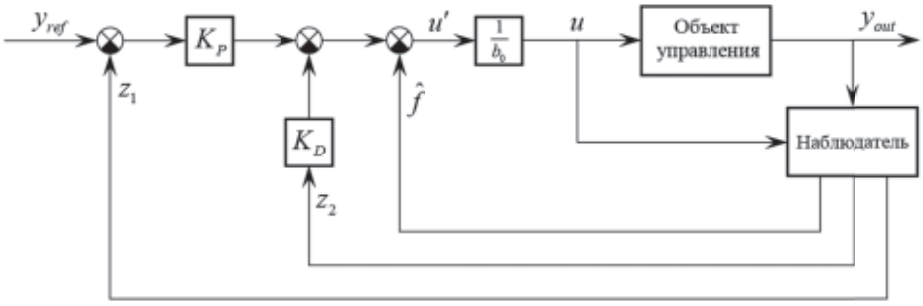


Рисунок 5— Схема управления линейным ADRC-регулятором

Проведение вычислительных экспериментов

Для исследования эффективности управления рассмотренных регуляторов в условиях влияния возмущающих факторов составлена модель в среде моделирования MATLAB/Simulink. Эксперимент заключался в подаче на вход системы управления постоянного воздействия, соответствующему желаемому значению глубины. Исследование эффективности регулятора заключалось в анализе показателей качества переходного процесса по глубине при наличии тех или иных возмущающих факторов.

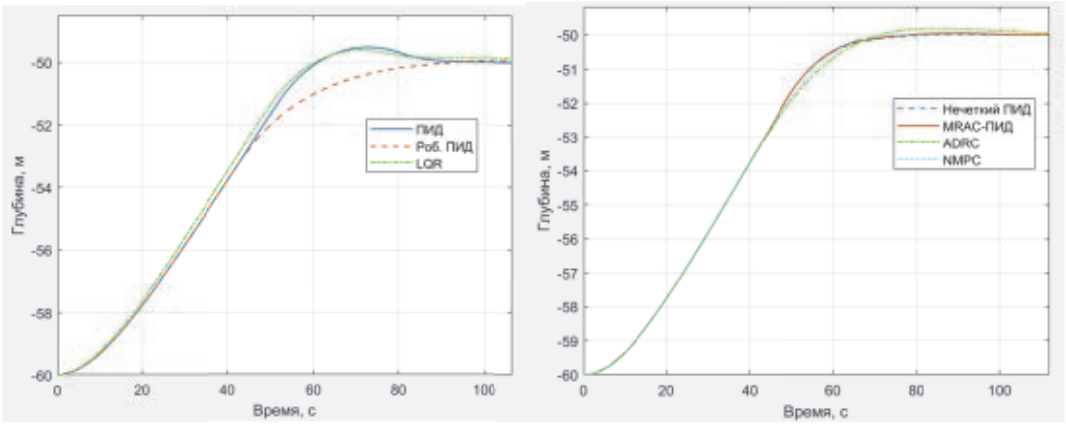


Рисунок 6 — Графики переходного процесса по глубине при $f_y = 30$ Н при управлении неадаптивными (слева) и адаптивными (справа) регуляторами

Для сравнения рассматриваемых регуляторов в условиях нестационарной внешней среды предполагается, что на ось OY действует дополнительная сила f_y, которая может быть обусловлена как изменением остаточной плавучести вследствие изменения плотности воды, так и проекцией сил течения на ось OY. Также для каждого из рассматриваемых регуляторов выявлены критические значения дискретности управления при наличии задержки в один такт, при которых происходит значительное ухудшение показателей качества переходного процесса: появление перерегулирования и колебательности. Исследование влияния погрешностей датчиков проводилось при наличии абсолютной погрешности изме-

рений глубины $\Delta = 0{,}1$ м, вызванной погрешностями измерений датчика давления и имеющей характер нормального распределения.

Результаты экспериментов по исследованию влияния внешних возмущающих воздействий приведены на рисунках 6 и 7. Из рисунков 6 и 7 видно, что при управлении адаптивными регуляторами при наличии возмущающих воздействий перерегулирование значительно меньше, чем при управлении ПИД- и LQR-регуляторами, при этом время переходного процесса меньше, чем при управлении робастным ПИД-регулятором. При управлении ADRC-регулятором также присутствует перерегулирование, однако его величина составляет менее 5%, по сравнению с 10-15% у неадаптивных регуляторов.

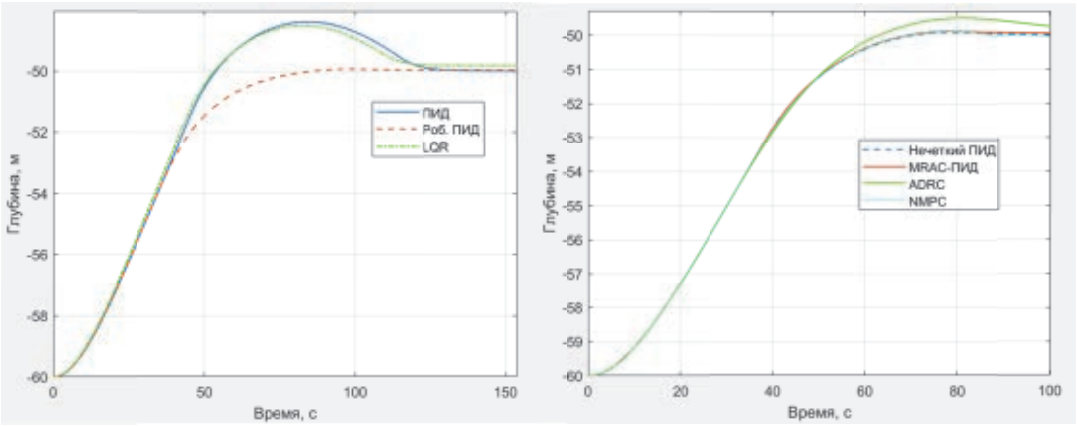


Рисунок 7 — Графики переходного процесса по глубине при $f_y = 60$ Н при управлении неадаптивными (слева) и адаптивными (справа) регуляторами

Результаты по исследованию дискретности управления, а также наличия погрешности датчиков глубины приведены в таблице 2.

Таблица 2 — Влияние дискретности управления и погрешностей измерения глубины на рассматриваемые регуляторы

	ПИД	**Роб. ПИД**	**LQR**	**NMPC**	**ADRC**	**Нечетк. ПИД**	**MRAC-ПИД**
Дискретность, $T_{кр}$	1,5 с	2,5 с	1,4 с	0,9 с	1,1 с	1,5 с	1,5 с
Влияние погрешности измерения глубины	Пренебр. мало	Пренебр. мало	Пренебр. мало	Пренебр. мало из-за фильтра Калмана	Значительно при $f_y \neq 0$ Н	Значительно при $f_y \neq 0$ Н	Пренебр. мало

Так, из адаптивных методов управления наиболее зависимым от дискретности управления является NMPC регулятор, для которого данный параметр влияет на количество тактов предсказания, что может привести к определению субоптимальных значений управляющих воздействий. ADRC-регулятор также более зависим от дискретности управления, так как при выбранных параметрах настройки не способен полностью предотвратить перерегулирование при наличии сильных возмущающих воздействий. Процесс адаптации нечеткого ПИД-регулятора и MRAC-регулятора не зависит в значительной степени от дискретности управления, поэтому их критический показатель дискретности управления совпадает со стандартным ПИД-регулятором. Робастный ПИД-регулятор, обладающий самым плавным управлением из рассмотренных регуляторов, зависит от дискретности управления меньше всего.

Погрешность измерения глубины не оказывает значительного влияния на методы, которые используют для управления только ошибку по управляющей величине, такие как ПИД-регулятор и MRAC-

ПИД, а также NMPC-регулятор, использующий для наблюдения возмущающих воздействий и фильтрации измерений фильтр Калмана. Нечеткий ПИД-регулятор при наличии погрешностей измерений теряет свойство адаптивности, так как для адаптации необходимо как измерение глубины, так и скорости и ускорения ее изменения, на которые при отсутствии фильтрации погрешность измерений оказывает наибольшее значение. ADRC-регулятор также зависим от погрешностей измерения глубины, так как наблюдатель Люенбергера не обладает свойствами фильтрации и при больших погрешностях измерений не способен с требуемой точностью определять обобщенное возмущающее воздействие.

В ходе работы проведено сравнение эффективности управления адаптивными и неадаптивными регуляторами при наличии возмущающих факторов. Выявлено, что рассмотренные адаптивные подходы к управлению работают значительно лучше стандартных подходов к управлению при наличии возмущающих воздействий, однако могут в большей степени зависеть от аппаратных ограничений бортовой аппаратуры, таких как погрешности датчиков и дискретность управления.

Нечеткий ПИД-регулятор и MRAC-ПИД-регулятор позволили получить наилучшее качество переходного процесса по глубине при наличии внешних возмущающих воздействий по сравнению с другими адаптивными методами управления. Также данные регуляторы не требуют точного математического описания объекта управления, однако опираются на априорные знания о его поведении для выбора эталонной модели или составления правил, по которым осуществляется нечеткое управление. MRAC-ПИД-регулятор в значительной степени не зависит ни от дискретности управления, ни от погрешностей датчиков, однако может зависеть от величины входного воздействия системы управления, поэтому нуждается в дополнительной проверке на робастность.

NMPC-регулятор с наблюдателем на основе фильтра Калмана позволяет осуществлять адаптивное управление глубиной подводного аппарата, однако его эффективность зависит от точности математического описания объекта, что может сделать его менее эффективным при управлении реальным аппаратом.

По результатам проведенных исследований ADRC-регулятор зависит как от дискретности управления, так и от погрешностей датчиков. Ключевым достоинством данного регулятора является простота адаптивной настройки, инвариативность к величине входного воздействия, а также возможность использовать более сложный нелинейный закон управления [10].

Дальнейшим направлением исследований является переход к более адекватной модели АНПА, а также проведение аналогичных экспериментов для других адаптивных регуляторов.

Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России FNRG-2022-0017 1021060307691-2 1.2.1;2.2.2 № 075-01623-22-00 «Развитие теории синтеза оптимального управления гиперизбыточных роботов подводного базирования в условиях непрогнозируемых нестационарных течений и потоков»

Литература

1. Бахарев С. А., Карасев В. В., Карасев А. В. Использование автономных необитаемых подводных аппаратов в процессе изучения Мирового океана // Научные труды Дальрыбвтуза. – 2022. – т. 26 – С. 63–72.

2. Широков И. Б., Иванов Г. А. Измерение дальности повышенной точности в задачах причаливания автономного необитаемого подводного аппарата // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН – 2019 – № 2 (88) – С. 24-36.

3. Caviglia G., Morro A. Kirchhoff's equations for the rigid body motion revisited // Meccanica – 2017 – Vol. 52 – pp. 1485-1489.

4. Tanakitkorn K., Wilson P., Turnock S., Philips A. Depth control for an over-actuated, hover-capable autonomous underwater vehicle with experimental verification // Mechatronics – 2017 – Vol. 47 – pp. 67-81.

5. Afram A., Janabi-Sharifi F. Theory and applications of HVAC control systems – A review of model predictive control (MPC). // Building and Environment – Vol. 72 – 2014 – pp. 343-355.

6. Fan, S., Li B., Xu W., et al. Impact of Current Disturbances on AUV Docking: Model-Based Motion Prediction and Countering Approaches // IEEE Journal of oceanic engineering — 2018. — Vol. 43, No. 4, pp. 888-904.

7. Bo H., Hai T., Jiani Q., et al. A Fuzzy-PID method to improve the depth control of AUV // 2013 IEEE International Conference of Mechatronics and Automation — 2013 — pp. 1528-1533.

8. Jianhong Z., Wei Y., Yuanxi P. Design and Simulation of a Self-adaptive Fuzzy-PID Controller for an Autonomous Underwater Vehicle. // Intelligent Robotics and Applications: 10th International Conference — 2017 — pp. 867-878.

9. Jain P., Nigam M.J. Design of a Model Reference Adaptive Controller Using Modified MIT Rule for a Second Order System // Advance in Electronic and Electric Engineering — 2013 — Vol. 3, No. 4, pp. 477-483.

10. Han J. From PID to Active Disturbance Rejection Control // IEEE Transactions on Industrial Electronics — 2009 — Vol. 56, No. 3, pp. 900-906.

11. W. Tan Linear Active Disturbance-Rejection Control: Analysis and Tuning via IMC // IEEE Transactions on Industrial Electronics — 2016 — Vol. 63, No. 4, pp. 2350-2359.

В.М. Битный-Шляхто, П.К. Шубин, М.В. Кулешова

ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГРУППЫ АВТОНОМНЫХ РОБОТОВ ПРИ СПАСАНИИ ЛЮДЕЙ В АРКТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург, v_bitny@rtc.ru, shubin@rtc.ru, kuleshova@rtc.ru

Аннотация

Коллективом авторов ЦНИИ РТК, Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского и ФГБУ ВНИИПО МЧС России разработан проект роботизированного комплекса универсальных спасательных средств для проведения поисковых, спасательных и эвакуационных операций в условиях Арктики и Крайнего Севера. Целью проекта является разработка и создание наземного роботизированного комплекса (НРК), как наращиваемой группы беспилотных универсальных спасательных средств (УСС) смешанного базирования «земля-море-воздух», амфибийного типа, имеющих высокую степень автономности, автоматизации и проходимости для поисковых, спасательных и эвакуационных операций в условиях Арктики и Крайнего Севера.

Ключевые слова

Роботизированный комплекс, универсальное спасательное средство, Арктический регион, амфибийное спасательное средство, групповое управление.

V.M. Bitny-Shliakhto, P.K. Shubin, M.V. Kuleshova

AN APPROACH TO SOLVING THE PROBLEM OF OPTIMIZING THE FUNCTIONING OF A GROUP OF AUTONOMOUS ROBOTS WHEN RESCUING PEOPLE IN ARCTIC CONDITIONS

Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, St. Petersburg, Russia, v_bitny@rtc.ru, shubin@rtc.ru, kuleshova@rtc.ru

Annotation

A team of authors from the Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics (RTC), the Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (UNN) and Federal State Budgetary Establishment All-Russian Research Institute for Fire Protection of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (FGBU VNIIPO EMERCOM of Russia) developed a project for a robotic complex of universal rescue vehicles for conducting search, rescue and evacuation operations in the Arctic and Far North. The aim of the project is to develop and create a ground-based robotic complex, as a growing group of unmanned universal rescue vehicles of mixed-based "land-sea-air", amphibious type, with a high degree of autonomy, automation and cross-country capability for search, rescue and evacuation operations in the Arctic and the Far North.

Key words

Robotic complex, universal rescue vehicle, Arctic region, amphibious rescue vehicle, group control.

В ходе реализации проекта по разработке и созданию наземного роботизированного комплекса (НРК), как наращиваемой группы беспилотных универсальных спасательных средств (УСС) смешанного базирования «земля-море-воздух», амфибийного типа, имеющих высокую степень автономности, автоматизации и проходимости для поисково-спасательных операций (ПСО) в условиях Арктики и Крайнего Севера был решен ряд ключевых научно-технических и прикладных задач [1].

Как показано в [2] основным преимуществом проекта НРК УСС является оперативность проведения ПСО, которая будет определяться, в том числе, и оптимальным функционированием группы автоном-

ных робототехнических средств при оперативном решении задачи спасания терпящих бедствие людей с поверхности льда и грунта.

С учетом этого в настоящем исследовании проведен анализ возможности реализации задач оптимального функционирования на основе существующих подходов к моделям группового, коллективного управления роботами по данным научно-технической информации и литературным источникам. В данном случае рассматривается наиболее сложная задача системы группового управления роботов (СГУР) – это управление группой роботов (ГР) в естественной, динамической среде (арктический регион) и, особенно, в условиях противодействия со стороны внешних воздействующих факторов среды (низкие температуры, штормовые условия, снежная пурга, торошение льдов и т.д.).

Как известно, в настоящее время рассматриваются три стратегии группового управления (ГУ): централизованного управления, децентрализованного и смешанного управления [3]. Стратегии централизованного управления группой объектов можно разбить на два класса – стратегию, использующую принцип единоначального управления, и стратегию, использующую принцип иерархического управления. Среди децентрализованных стратегий можно также выделить два типа – это стратегия коллективного управления и стратегия стайного управления.

Как показал сопоставительный анализ преимуществ и недостатков стратегий СГУР в нашем случае, связанном с высокими рисками и агрессивным характером внешней среды, наиболее актуальны смешанные стратегии. Например, целевые задания по подгруппам роботов устанавливаются лицом, принимающим решение или центром удалённого управления, в рамках стратегии централизованного управления ГР, а тактические задачи внутри подгрупп решаются с использованием стратегии децентрализованного управления. При этом, по аналогии с боевой ситуацией, наиболее приемлем стайный вариант ГУ в подгруппах, а система централизованного управления должна быть иерархической и иметь резервные центры управления для того, чтобы обеспечить максимальную живучесть СГУР в целом.

Модель командной работы автономных агентов рассматривается как перспективная модель различных автономных операций типа арктических. Сложности практической реализации идей командной работы автономных агентов, например, в приложениях упомянутого выше типа обусловлены многими факторами, которые являются общими практически для любого приложения в области командной работы автономных агентов. Перечислим их [3]:

– непредсказуемая динамика внешней среды, сознательное противодействие соперничающей стороны (если она имеется),

– ограниченность знаний каждого агента о состоянии внешней среды, о команде противника и о других агентах команды, что влечет необходимость распределенной оценки текущей ситуации,

– многообразие вариантов сценария достижения одной и той же цели, и вариантов распределения ролей между автономными агентами,

– зависимость множества возможных сценариев от текущего состояния и предыстории командной работы, от наличия ресурсов и от специализации агентов. Это обуславливает необходимость динамической оценки ситуации, динамического выбора продолжения сценария и распределения ролей в реальном времени,

– динамика сетевой организации команды агентов, когда коммуникационные средства, которыми располагают члены команды для поддержания взаимодействия, имеют ограниченную дистанцию достижимости, что обуславливает необходимость использования распределенной инфраструктуры для поддержки парных взаимодействия агентов и соответствующих коммуникационных протоколов.

Центральными задачами в области командной работы были и остаются задачи динамического планирования и перепланирования многошагового процесса выполнения миссии ГР, динамического распределения ролей и подзадач между ее членами в зависимости от текущей ситуации, а также задачи координации поведения агентов команды в процессе исполнения миссии. Эти задачи чрезвычайно сложны, и, несмотря на большие усилия исследователей, полученные результаты нуждаются в дальнейшем развитии.

Краткий обзор этих результатов с позиции возможного применения для целей настоящего исследования показал, что в настоящее время существует несколько теорий командной работы автономных агентов. Одна из их них, известная под названием «Теория общих намерений» предложена в фундаментальной работе [4]. Она формулирует, главным образом, базовые понятия и общие рамки, определяющие командное поведение, характер взаимодействия и информационного обмена членов команды. Вторая теория предложена в работах [5], [6]. Она известна под названием «Теория общих планов». Некоторые базовые положения, связанные с понятиями общих намерений, общих обязательств и соглашений были сформулированы и в работах [7], [8].

Теория общих намерений была фактически первой моделью, которая сформулировала проблему командной работы агентов и очертила ее рамки. Это была первая работа, которая обратила внимание специалистов на то, что в организации командной работы важную роль играет корректно построенный протокол общения агентов.

Однако, как каждая классическая работа, она имеет и ряд недостатков. Любая разумная постановка задачи командной работы должна принимать во внимание динамику плана: планы всегда развиваются во времени и в пространстве. Агенты обычно начинают с частичного плана и расширяют его вплоть до получения полного плана по мере его исполнения в динамически изменяющемся контексте. Неполной может быть также информация, полученная в результате коммуникаций с внешней средой и с другими агентами, что не дает возможности полностью определиться с планом. Принятый план может оказаться неработоспособным и должен быть пересмотрен. Однако эти аспекты, связанные с динамикой планирования командной работы, в теории общих намерений не отражены. Они более глубоко представлены в описываемой в Теории общих планов.

Теория общих планов («Shared Plans Theory», [5] [6]) строится несколько иначе, чем рассмотренная ранее теория общих намерений. Она не использует общие для команды агентов ментальные понятия «общее намерение», «общая долговременная цель». Ее базовыми понятиями являются групповой план и индивидуальные ментальные понятия агентов.

Одним из центральных понятий рассматриваемой теории является понятие функции предписание. Функция предписание ассоциируется с каждым действием и задает множество инструкций, определяющих, каким именно образом действие должно выполняться. В общем случае предписание представляется в виде иерархической структуры, узлами которой являются предписания более низкого уровня.

Теория общих планов имеет строгое математическое обоснование (к сожалению, она представлена в слишком формализованном виде, так что местами она достаточно тяжела для понимания и, в особенности, для содержательной интерпретации). Хотя сама по себе эта теория уступает по популярности теории общих намерений, тем не менее, некоторые идеи этой теории оказались весьма продуктивными и используются при разработке моделей командной работы в комбинации с теорией общих намерений.

Теория общих планов, однако, тоже обладает рядом недостатков, которые приводят к трудностям ее практического использования. В ней не конкретизируется способ построения конкретного общего плана, полагая, что эта проблема является внешней по отношению к построенной теории. С одной стороны, это задает определенную свободу выбора алгоритма построения такого плана. Но, с другой стороны, большинство известных методов не рассчитано на некоторые специфические особенности командной работы агентов, особенно, в условиях противодействия, а эти особенности оказываются зачастую ключевыми. Например, может оказаться, что некоторый агент по той или иной причине оказывается не в состоянии выполнить некоторое назначенное ему действие. Например, у него может быть исчерпан некоторый необходимый ресурс. Он может быть выведен из строя. Состояние внешней среды может измениться так, что действие в новых условиях не может быть выполнено. Возможно, что это действие может быть выполнено другим агентом, но эта возможность в теории общих планов не предусмотрена. В другой ситуации требуемое действие может оказаться невыполнимым для всех агентов. Тогда необходимо вообще выбирать новый план достижения цели, который будет включать в себя иные действия агентов команды, и эти действия должны распределяться между агентами в режиме реального времени.

То же самое касается условий согласования действий. Но возможность изменения общей схемы сценария достижения цели вообще не предусматривается рассматриваемой теорией, хотя это может потребоваться во многих случаях. Заметим, что в теории общих намерений может иметь место аналогичная ситуация. Там заранее определяется условие, при котором цель либо нерелевантна, либо недостижима, и тогда агенты отказываются от ее достижения. При этом возможность изменения самой цели и/или сценария ее достижения (это может привести к изменению вида утверждений p и/или q тоже не рассматривается. Следует также заметить, что коллективная обработка непредвиденных ситуаций не рассматривается в обеих теориях.

Недостатки теорий командной работы на практике обычно компенсируются некоторыми дополнительными средствами. Часто возникающие проблемы могут быть успешно разрешены благодаря использованию коммуникаций. Другой потенциально эффективный путь разрешения потенциальных проблем выполнения командной миссии – это обогащение (экспертных) знаний, которые используются агентами для построения плана и специальных структур их представления. Следует отметить, что теории командной работы, отличные от работ [6], [8], в доступной литературе не описаны.

Как известно агентские технологии получают все большее признание и распространение среди интеллектуальных информационных технологий. Одной из областей активного использования этих технологий является современная робототехника. Поэтому именно этим, т.е. реальной необходимостью развития достижений зарубежной и российской науки в деле разработки агентских технологий в командной работе спасательных роботов в экстремальных условиях арктической миссии, мотивировано настоящее исследование.

Проведенный анализ показал, что, на данном этапе исследований, поставленной задаче разработки предложений по оптимальному (рациональному) перераспределению функций между роботами и оперативному переконфигурированию (реконфигурированию) группы при выходе из строя одного или нескольких роботов в группе или появлении новых роботов в группе, в наибольшей степени соответствует, так называемый «оптимизационный подход» [9]. В работе [10] и в настоящем исследовании под этим термином понимается построение формальных моделей коллективов и групп роботов, причем эти модели допускают применение различного рода методов оптимизации управления.

При этом подходе состояния системы «робот–среда» задаются парами вида

$$S(t) \in \langle R(t), E(t) \rangle, \tag{1}$$

где $S(t)$ – вектор-функция, которая описывает состояние системы «робот–среда» в момент времени *t,* $R(t)$ и $E(t)$ – соответственно, вектор-функции описывающие состояния робота и среды в момент времени *t.*

Далее задаются начальные условия:

$$R^0 = R(t_0), \quad E^0 = E(t_0). \tag{2}$$

Общая же постановка задачи определяется следующим образом [9]: задача управления роботом *R* состоит в том, чтобы определить такую последовательность действий (вектор-функцию действий) ***A****(t)* на интервале времени [t_0, t_f], выполнение которых при заданных связях, начальных условиях и ограничениях обеспечивало бы экстремум функционала, определяющего цель функционирования робота в среде и оценивающего качество процесса управления [10].

$$Y = \widehat{\Phi}(R^f, E^f, t_f) + \int_{t0}^{tf} F(A(t), R(t), E(t), g(t), t)dt, \tag{3}$$

Или с учетом (1) будем иметь выражение вида

$$Y = \tilde{\Phi}(S^f, t_f) + \int_{t0}^{tf} \tilde{F}(A(t), S(t), g(t), t)dt \quad (4)$$

Первое слагаемое в правой части выражения (4) зависит от граничных состояний системы «робот–среда», которые обычно заданы. В этом случае оно является постоянной величиной и не влияет на экстремум функционала.

Здесь *g(t)* – действия прочих сил, существующих в среде. Корректно вводятся ограничения на возможные состояния системы «робот-среда» и возможные действия робота:

$$S(t) \in \{S^p(t)\} \subset \{S\}, \quad (5)$$

$$A(t) \in \{A^p(t)\} \subset \{A\}, \quad (6)$$

где $\{S^p(t)\}$ – множество допустимых состояний системы «робот–среда» в момент времени t, принадлежащее множеству $\{S\}$, $\{A^p(t)\}$ – множество допустимых действий робота в момент времени t из множества $\{A\}$.

В рамках такого «оптимизационного подхода» рассматриваются процедуры оптимизации коллективных действий в группе роботов, определяются условия устойчивости и сходимости, решаются задачи распределения целей между участниками коллектива, улучшения плана и другие. При этом, например, преодолевается недостаток теории общих планов из парадигмы многоагентных систем (МАС), связанный с отсутствием конкретизации способа построения общего плана. «Оптимизационный подход» позволяет решать целый ряд задач, среди которых есть и достаточно близкие по своей постановке к задачам настоящего исследования.

Однако в данном подходе (как и в остальных), на наш взгляд, при построении математических моделей и алгоритмов оптимизации управления присутствует один недостаток, который относится к отсутствию явного учета стохастичности, недетерминированности процессов, протекающих в данной предметной области, требующих конкретных вероятностных оценок, как это будет показано в дальнейших исследованиях. Поэтому в дальнейших публикациях будут рассмотрены модели и алгоритмы оптимального управления поведением роботов при совместном выполнении ими поставленных задач автономной арктической миссии с учетом стохастичности конкретных процессов окружающей среды. Соответственно, необходимости проведения вероятностных оценок в рамках усовершенствованного (конкретизированного) «оптимизационного подхода».

Литература

1. Создание наземного роботизированного комплекса универсальных спасательных средств для Арктики и Крайнего Севера / М.А. Шахраманьян, Е.В. Павлов, П.К. Шубин [и др.] // Экстремальная робототехника, 2021. Т. 1, № 1. С. 303–311.

2. Shubin P. Comparative assessment of rescue operation effectiveness in Arctic conditions // Arctic: History and Modernity. Works of the Annual International Scientific Conference, 18–19 April 2019 Saint-Petersburg, St. Petersburg. SPb.: POLYTECH-PRESS, 2019. С. 126–135.

3. Капустян С.Г. Методы и алгоритмы коллективного управления роботами при их групповом применении. – Ростов-на-Дону, 2008. – 310 с.

4. Городецкий В.И. Теория, модели, инфраструктуры и языки спецификации командного поведения автономных агентов. Обзор (Часть 1) // Искусственный интеллект и принятие решений. 2011. № 2. С. 19-30.

5. P. Cohen and H.XLevesque. Teamwork. Nous, 35 (1991).

6. Grosz B.: Collaborating Systems. AI Magazine, 17(2), 1996.

7. B. Grosz and S. Kraus. Collaborative Plans for Complex Group Actions. Artificial Intelligence, 86, 1996, 269-358 (1996).

8. Jennings, N.R,. Varga, L.Z,.Aamts, R.P, Fuchs, J., and.Skarek, P.: Transforming standalone expert systems into a community of cooperating agents. Int. Journal of Engineering Applications of Artificial Intelligence, 6(4), 1993, pp. 317-331 (1993).

9. Jennings, N.: Controlling Cooperative Problem Solving in Industrial Multi-Agent Systems Using Joint Intentions. In: Artificial Intelligence, vol. 75, pp. 195–240 (1995).

10.Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Методы и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. – М.: Физматлит, 2009. – 280 с.

СЕКЦИЯ «ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИКЕ»

Е.Ю. Шмалько, В.В. Серебренный

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА СИНТЕЗИРОВАННОГО ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ

ФИЦ ИУ РАН, Москва, e.shmalko@gmail.com; МГТУ им. Н.Э. Баумана, vsereb@bmstu.ru

Аннотация

При разработке систем управления, мы стремимся достичь поставленной цели управления оптимальным образом, исходя из заданного критерия качества. В работе рассматривается классическая постановка задачи оптимального управления и обсуждаются проблемы ее реализации. В статье вводится дополнительное требование к искомой функции оптимального управления, которое придаст системе, описывающей объект управления, существование дополнительного свойства устойчивости ее решений. Искомая функция управления должна обеспечивать для оптимальной траектории свойства аттрактора в окрестности. В статье предложен вычислительный подход синтезированного управления к решению дополненной задачи оптимального управления, основанный на применении таких методов машинного обучения, как символьная регрессия для синтеза системы стабилизации и эволюционные алгоритмы глобальной оптимизации для расчета оптимальных траекторий. Приведен пример практического решения поставленной задачи на модели мобильного всенаправленного робота с меканум-колесами.

Ключевые слова

Оптимальное управление, стабилизация, машинное обучение, символьная регрессия, эволюционный алгоритм оптимизации, мобильный робот.

E.Yu. Shmalko, V.V. Serebrenny

APPLICATION OF MACHINE LEARNING METHODS FOR CALCULATION OF SYNTHESIZED OPTIMAL CONTROL FOR MOBILE ROBOT

Federal Research Center «Information Science and Management» Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, e.shmalko@gmail.com; Bauman Moscow State Technical University, Russia, vsereb@bmstu.ru

Abstract

In control system design, we try to achieve the goal of control in some optimal way, according to a given criterion. The paper considers the classical formulation of the optimal control problem and discusses the challenges of its implementation. The article introduces an additional requirement for the desired optimal control function, which will give the system describing the control object the existence of an additional property of stability of its solutions. The desired control function must provide the properties of an attractor in the neighborhood for the optimal trajectory. The article proposes a computational approach of the synthesized control to solving the augmented optimal control problem based on the use of such machine learning methods as symbolic regression for the synthesis of a stabilization system and evolutionary global optimization algorithms for calculating optimal trajectories. An example of a practical solution to the stated problem is given on the model of a mobile omnidirectional robot with mecanum wheels.

Key words

Optimal control, stabilization, machine learning, symbolic regression, evolutionary optimization algorithm, mobile robot.

Рассмотрим классическую постановку задачи оптимального управления [1]

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}\left(\mathbf{x},\ \mathbf{u}\right),\ \ \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n, \\ \mathrm{x}\left(0\right) = \mathrm{x}^0,\ \ \mathrm{x}\left(t_f\right) = \mathrm{x}^f, \\ J = \int_0^{t_f} \mathbf{f}_0\left(\mathrm{x},\ \mathrm{u}\right) dt \to \min, \\ \mathbf{u} = \ \mathbf{v}\left(t\right),\ \mathrm{u} \in \mathrm{U} \subseteq \mathbb{R}^m,\ m \leq\ n, \end{cases} \tag{1}$$

где $\mathbf{x}$ – вектор состояния объекта, $\mathbf{u}$ – вектор управления. Пару $(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ называют допустимым процессом управления (1), если она удовлетворяет заданным ограничениям: краевым, фазовым и ограничениям на управление. Задача состоит в минимизации функционала J на множестве допустимых процессов. Терминальное время t_f не задано, но ограничено $t_f \leq\ t^+$.

Оптимальное управление, получаемое в результате решения задачи (1) является разомкнутым программным управлением и для его прикладной реализации строится оптимальная траектория и вводится дополнительный контур регулирования для обеспечения стабилизации движения объекта относительно полученной оптимальной траектории.

С математической точки зрения введение контура стабилизации обеспечивает системе дифференциальных уравнений, описывающих динамику объекта, существование дополнительного свойства, которое обеспечивает устойчивость решений вблизи оптимального решения в случае некоторых неопределенностей или возмущений. Необходимо сформулировать задачу поиска оптимального управления так, чтобы все возможные траектории находились в некоторой заданной области от оптимальной траектории и достигали конечного состояния. Введем дополнительные условия в задачу оптимального управления.

Для решения задачи оптимального управления (1) необходимо найти функцию управления в виде

$$\mathrm{u} = \mathbf{g}\left(\mathbf{x}, t\right) \in \mathrm{U}, \tag{2}$$

так что если эту функцию $\mathbf{g}(\mathbf{x}, t)$ подставить в правую часть математической модели объекта, то результирующая система уравнений

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathrm{f}\left(\mathrm{x},\ \mathbf{g}\left(\mathbf{x}, t\right)\right), \tag{3}$$

должна иметь следующие свойства:

– во-первых, частное решение $\mathbf{x}(t, \mathbf{x}^0)$ системы (6) из начального состояния $\mathbf{x}^0$ достигает заданного терминального состояния $\mathbf{x}\left(t_f, \mathbf{x}^0\right) = \mathbf{x}^f$, $t_f \leq\ t^+$ с оптимальным значением функционала качества;

– во-вторых, для других частных решений $\mathbf{x}(t, \mathbf{x}^*)$ из других начальных состояний $\mathbf{x}^* \neq \mathbf{x}^0$ выполняется следующее условие: для некоторого $\Delta > 0$ и $t' < t^+$ существует окрестность

$$\|\mathbf{x}(t', \mathbf{x}^*) - \mathbf{x}(t', \mathbf{x}^0)\| \leq \Delta, \tag{4}$$

тогда $\forall\ \delta t$, $0 \leq \delta t < t^* - t'$ частное решение не покинет этой окрестности

$$\|\mathbf{x}(t' + \delta t,\ \mathbf{x}^*) - \mathbf{x}(t' + \delta t,\ \mathbf{x}^0)\| \leq \Delta; \tag{5}$$

– в-третьих, вблизи терминального состояния Δ-окрестность сжимается, что обеспечивает попадание частного решения $\mathbf{x}(t, \mathbf{x}^*)$ в терминальное состояние $\mathbf{x}^f$ с некоторой заданной точностью

$$\|\mathbf{x}(t,\ \mathbf{x}^*) - \mathbf{x}(t,\ \mathbf{x}^0)\| \leq \varepsilon, \tag{6}$$

где ε - заданное значение точности попадания в терминальное состояние.

Обеспечить выполнение дополнительных условий задачи оптимального управления (2)-(6) можно либо за счет решения задачи общего синтеза оптимального управления [2], либо за счет введения системы стабилизации и расчета оптимального управления для стабилизированного объекта.

Решение задачи общего синтеза управления для некоторой области начальных условий приводит к тому, что каждое частное решение из этой области начальных условий будет оптимальным. В этом случае каждое частное решение имеет окрестность, в которой находятся другие оптимальные решения. Окрестность будет открытой, но также сжиматься вблизи терминального состояния. Однако, задача общего синтеза управления является сложной математической задачей, для которой пока нет универсального ни аналитического, ни численного метода решения.

Задача синтеза системы стабилизации значительно проще общей задачи синтеза и существует большое количество подходов к ее решению. В зависимости от вида объекта управления и знаний разработчика об объекте могут применяться как параметрические подходы, когда структура регулятора задана с точностью до параметров, например, ПИД-регуляторы [3], нейросетевые контроллеры [4], регуляторы на основе нечеткой логики [5] и др., или же общие аналитические подходы, позволяющие реализовать структурно-параметрический синтез регуляторов, среди которых наиболее популярны методы, основанные на решении уравнения Риккати [6] для линейных систем, а также более современные подходы бэкстэппинга [7] и аналитическое проектирование агрегированных регуляторов [8].

Однако заметим, что введение системы стабилизации изменяет динамику объекта, а значит оптимальное управление и оптимальная траектория должны рассчитываться для объекта уже с учетом системы стабилизации. В итоге получается, что изначальная задача оптимального управления является сложной, и часто возможность ее решения крайне зависима от типа объекта и функционала, а в случае усложнения объекта за счет введения системы стабилизации сложность задачи значительно увеличивается и применение классических подходов на основе принципа максимума Понтрягина или прямого метода с использованием градиентных оптимизационных алгоритмов оказывается трудоемким или невозможным. В этой связи в последние годы хорошо себя зарекомендовали современные вычислительные методы машинного обучения. В настоящей работе применен один из таких подходов, использующий методы символьной регрессии для синтеза системы стабилизации и эволюционные алгоритмы глобальной оптимизации для расчета оптимальных траекторий.

Метод синтезированного управления [9], состоит из двух этапов, которые обеспечивают получение задачи оптимального управления (1) с введенными дополнительными требованиями (2)-(6). Первоначально решается задача синтеза управления с целью обеспечения устойчивости объекта управления относительно некоторой точки в пространстве состояний. Следует отметить, что при решении задачи синтеза системы стабилизации может использоваться функционал, отличный от исходной задачи оптимального управления, поэтому различные методы решения задачи синтеза управления приведут к различным математическим моделям замкнутой системы управления и к различным решениям задачи оптимального управления. На втором этапе решается задача оптимального управления, при этом в качестве управления используются координаты точек устойчивости объекта управления. Требование наличия окрестности со свойствами притяжения для оптимального решения требует выбора такого положения точек устойчивости в пространстве состояний, чтобы частные решения из некоторой области начальных состояний, притягиваясь к этим точкам устойчивости, находились вблизи друг друга, двигаясь к терминальному состоянию.

Пример расчета синтезированного оптимального управления для мобильного робота

Синтезированный подход к оптимальному управлению применяется в данной работе к мобильному роботу на mecanum колесах (см. рис. 1), конструкция которых позволяет роботу двигаться под любым углом к направлению его оси без поворота.

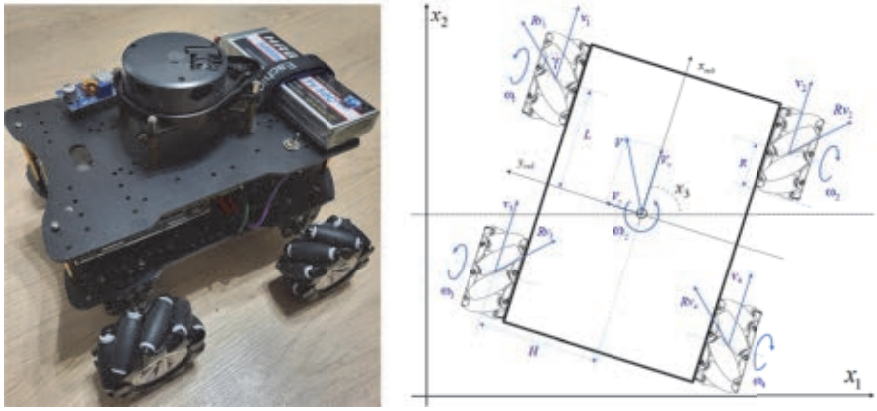


Рисунок 1 — Мобильный робот на mecanum колесах

Рассмотрим задачу оптимального управления, в которой два одинаковых меканум-робота должны поменяться местами за минимальное время в некотором заданном пространстве с препятствиями, избежав столкновений как с препятствиями, так и друг с другом.

Математическая модель объекта управления описывается следующей системой дифференциальных уравнений

$$\dot{x_1} = 0.25((u_1 + u_4)(\cos(x_3) + \sin(x_3)) + (u_2 + u_3)(\cos(x_3) - \sin(x_3))),$$

$$\dot{x_2} = 0.25\left((u_1 + u_4)\big(\sin(x_3) - \cos(x_3)\big) + (u_2 + u_3)\big(\cos(x_3) + \sin(x_3)\big)\right), \quad (7)$$

$$\dot{x_3} = \frac{0.25(-u_1 + u_2 - u_3 + u_4)}{L_0 + H_0},$$

$$\dot{x_4} = 0.25\left((u_5 + u_8)\big(\cos(x_6) + \sin(x_6)\big) + (u_6 + u_7)\big(\cos(x_6) - \sin(x_6)\big)\right),$$

$$\dot{x_5} = 0.25\left((u_5 + u_8)\big(\sin(x_6) - \cos(x_6)\big) + (u_6 + u_7)\big(\cos(x_6) + \sin(x_6)\big)\right),$$

$$\dot{x_6} = \frac{0.25(-u_5 + u_6 - u_7 + u_8)}{L_0 + H_0},$$

где x_1, x_2, x_3 – фазовые координаты первого робота, x_4, x_5, x_6 – фазовые координаты второго робота, u_1, u_2, u_3, u_4 – компоненты вектора управления для первого робота, u_5, u_6, u_7, u_8 – компоненты вектора управления для второго робота, L_0, H_0 – геометрические параметры роботов, $L_0 = 2$, $H_0 = 1$.

Особенностью рассматриваемой математической модели (7) является избыточное управление, $m = 8$ компонент вектора управления и $n = 6$ компонент вектора состояния, $m > n$.

Управление имеет ограничения

$$-10 = u_i^- \le u_i \le u_i^+ = 10, \quad i = 1, \dots, 8, \quad (8)$$

где u_i^- и u_i^+ – минимальное и максимальное значения управлений.

Зададим начальное положение объектов

$$\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}^0 = [0; 0; 0; 10; 10; 0]^T, \quad (9)$$

и целевое терминальное положение

$$\mathbf{x}(t_f) = \mathbf{x}^f = [10; 10; 0; 0; 0; 0]^T, \quad (10)$$

где t_f – время достижения терминального состояния, не задано, но ограничено, и определяется из соотношения

$$t_f = \begin{cases} t, & \text{если } t < t^+ \text{ и } \left\|\mathbf{x}^f - \mathbf{x}(t_f)\right\| < \varepsilon_0, \\ t^+, & \text{иначе,} \end{cases}$$

$$\varepsilon_0 = 0.05,\ t^+ = 1.9.$$

Качество управление определяется по функционалу, который включает в себя время, штрафы за несоблюдение фазовых ограничений и точность достижения конечного состояния.

$$J_1 = t_f + p_1\left\|\mathbf{x}(t_f) - \mathbf{x}^f\right\| + \sum_{\{i=1\}}^{K} p_2 \int_0^{t_f} \vartheta\left(\phi_i(\mathbf{x})\right)dt + + p_3 \int_0^{t_f} \vartheta\left(\chi(\mathbf{x})\right)dt \to \min, \qquad (11)$$

где p_1, p_2, p_3 – весовые коэффициенты, $p_1 = 1$, $p_2 = 3$, $p_3 = 3$, $i = 1, \dots, K$, $K = 8$, $\vartheta(a)$ – функция Хевисайда,

$$\vartheta(a) = \begin{cases} 1, & \text{если } a > 0, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

$$\phi_i(\mathbf{x}) = r_i - \sqrt{\left\{(x_1) - x_{1,i}\right)^2 + \left(x_2 - x_{2,i}\right)^2},\ i = 1,2,3,4,$$

$$\phi_i(\mathbf{x}) = r_{i-4} - \sqrt{\left\{(x_4) - x_{1,i-4}\right)^2 + \left(x_5 - x_{2,i-4}\right)^2},\ i = 5,6,7,8,$$

$$\chi(\mathbf{x}) = r_0 - \sqrt{\{(x_1 - x_4)^2 + (x_2 - x_5)^2\}},$$

$r_1 = 2$, $r_2 = 2.5$, $r_3 = 2.5$, $r_4 = 2$, $x_{1,1} = 2$, $x_{2,1} = 2$, $x_{1,2} = 8$, $x_{2,2} = 2$, $x_{1,3} = 2$, $x_{2,3} = 8$, $x_{1,4} = 8$, $x_{2,4} = 8$, $r_0 = 1$.

Согласно методу синтезированного управления, первоначально решается задача синтеза системы стабилизации в обратной связи, чтобы замкнутая система управления была не просто устойчива относительно некоторой заданной точки равновесия в пространстве состояний, но и все решения из некоторой заданной области сходились в точку равновесия с минимальным значением критерия качества, в частности функционала по быстродействию. Для синтеза используется один из методов символьной регрессии, метод сетевого оператора [11], который позволяет осуществлять машинное обучение системы управления без учителя, только на основе минимизации значения функционала.

Для численного синтеза системы стабилизации необходимо было достичь заданной терминальной точки $\mathbf{x}^* = [0; 0; 0]^T$ из 18 начальных положений

$$\mathrm{X}_0 = \left[-5 + id_1;\ -5 + jd_2;\ -\frac{5\pi}{12} + kd_3\right]^T, \qquad (12)$$

где $d_1 = 5$, $d_2 = 10$, $d_3 = \frac{5\pi}{12}$, $i = 0,1,2$, $j = 0,1$, $k = 0,1,2$.

Это означает, что мы берем некую область начальных условий и находим такую функцию обратной связи, которая будет достигать заданного конечного положения из различных точек этой области с наименьшим значением критерия качества стабилизации

$$J = \mathrm{m}\left\{t_{f,1}, \dots, t_{f,K}\right\} + a_1 \sum_{i=1}^{K} \left\|\mathbf{x}^f - \mathbf{x}\left(t_{f,i}, \mathbf{x}^{0,i}\right)\right\| \to \min,$$

где a_1 – весовой коэффициент, $t_{f,i}$ – время достижения заданного терминального положения из начального положения $\mathbf{x}^{0,i}$ из множества начальных положений (12) $\mathrm{X}_0 = \{\mathbf{x}^{0,1}, \dots, \mathbf{x}^{0,K}\}$, $i \in \{1, \dots, K\}$.

Так как роботы одинаковые, делаем синтез системы стабилизации для одного робота, и повторяем его для другого.

В результате была получена следующая функция управления

$$u_{i+(j-1)2} = \begin{cases} u^{+}_{i+(j-1)2}, & \text{если} \quad \tilde{u}_{i+(j-1)2} > u^{+}_{i+(j-1)2}, \\ u^{-}_{i+(j-1)2}, & \text{если} \quad \tilde{u}_{i+(j-1)2} < u^{-}_{i+(j-1)2}, \\ \tilde{u}_{\mathrm{i+(j-1)2}}, & \text{иначе,} \end{cases} \tag{13}$$

где $i = 1{,}2$, $j = 1{,}2$, а значения $\tilde{u}_{\mathrm{i+(j-1)2}}$ вычисляются по полученной матрице сетевого оператора (14).

Данная матрица **Ψ** позволяет вычислять значения управлений в зависимости от значений состояния объекта в каждый момент времени, согласно заложенному алгоритму [11]. Для реализации вычислений функции управления, закодированной в виде матрицы сетевого оператора, непосредственно на борту объекта был разработан ROS-узел контроллера на языке C++ [12], который принимает на вход наземные координаты и цель движения робота, а на выходе формирует управляющие сигналы.

$$\boldsymbol{\Psi} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10 & 0 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 19 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 13 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 15 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 1 & 6 & 0 & 12 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 1 & 1 & 23 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 12 & 6 & 5 & 10 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 10 & 18 & 23 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 15 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 15 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{14}$$

$$q_1 = 11.89282, q_2 = 10.15381, q_3 = 15.25903,$$

Графики траекторий движения робота из четырех начальных состояний в заданное терминальное положение представлены на рис. 2.

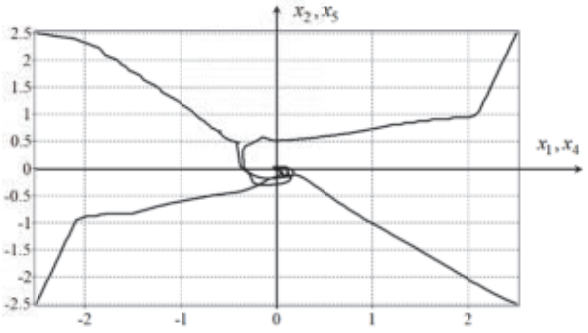


Рисунок 2 — Траектории движения объекта из 4х начальных условий в терминальное положение

На втором этапе решается задача оптимального управления (7)-(11) для замкнутой системы с функцией управления (13)-(14). Управлением на втором этапе является вектор $\mathbf{x}^*$, определяющий положение точки устойчивого равновесия в пространстве состояний в каждый момент времени. Для решения задачи оптимального управления ось времени разбивается на интервалы, и на каждом ин-

тервале функция управления аппроксимируется кусочно-постоянной функцией. Значение интервала положим $\Delta t = 0.19$.

$$x_i^* = x_i(t_j) = q_{\{i+(j-1)6\}},$$

где $i = 1, \dots, 6$, $t_j = (j-1)\Delta t$, $j = 1, \dots, D$, D – количество интервалов, $D = t^+/\Delta t = 1.9/0.19 = 10$.

Итого необходимо было найти оптимальный вектор с $10 \cdot 6 = 60$ параметрами

$$\mathbf{q} = [q_1 \dots q_{60}]^T.$$

Для решения задачи был применен эволюционный алгоритм роя частиц. Были определены следующие значения искомых параметров управления:

$\mathbf{q} = [-2.4862\ \ 2.0000\ \ 0.6231\ \ -2.1975\ \ -1.3799.\ \ 0.7058\ \ -2.5000\ \ 1.9421\ \ 1.2094\ .$
$-0.6933\ \ -2.0088\ \ -0.3378\ \ 0.1956\ \ 1.7643\ \ 0.6378\ \ 1.4052\ \ -2.4611\ \ -0.3230$
$1.7245\ \ 2.0000\ \ 0.8872\ \ 1.6769\ \ -1.2832\ \ -0.4372\ \ 0.5624\ \ 1.9987\ \ -1.1601.$
$1.9452\ \ -1.8859\ \ 0.7357\ \ 1.6876\ \ 1.5024\ \ 0.0997\ \ 1.1642\ \ -1.3678\ \ 0.5321$
$1.6945\ \ 1.9946\ \ 0.5580\ \ 0.7886\ \ -1.6027\ \ 1.3090\ \ 1.1795\ \ 1.5385\ \ -1.0798$
$0.6781\ \ -1.9975\ \ 0.0204\ \ -0.8939\ \ 1.0578\ \ -0.4106\ \ -2.1003\ \ -1.2544\ \ -1.3090$
$-2.5000\ \ 1.0746\ \ -1.2216\ \ -2.0840\ \ -1.3344\ \ -0.8913]^T$

Оптимальное значение функционала (11) составило $J = 1{,}923$.

Оптимальные траектории на горизонтальной плоскости двух роботов представлены на рис. 5. Сплошная линия — траектория первого робота, штриховая линия — траектория второго робота, красные окружности — фазовые ограничения, черные квадратики — проекции управления $\mathbf{x}^*$ на горизонтальную плоскость для первого робота, белые квадратики — проекции управления $\mathbf{x}^*$ на горизонтальную плоскость для второго робота.

На рис. 5 очень хорошо видно, что точки равновесия расположены не на траектории движения робота, как это делается при обычной стабилизации, а вне траектории. Расставляя точки на траектории, мы можем потерять в качестве, так, например, при приближении к точке равновесия робот должен замедляться. При синтезированном подходе оптимальное расположение точек обеспечивает оптимальное значение функционала.

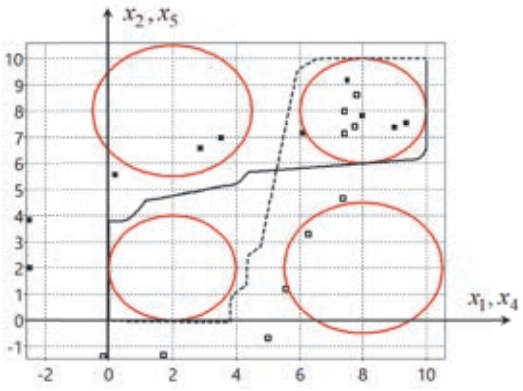


Рисунок 3 — Траектории движения объекта на плоскости при синтезированном управлении

Рассмотрен общий подход на основе машинного обучения для автоматического проектирования оптимальных систем управления с обратной связью для любых динамических нелинейных объектов управления. Основное направление – машинно-автоматизированная разработка систем управления. Согласно этому направлению, система управления получается в результате машинного решения некоторой формальной математической задачи управления и может быть в дальнейшем перенесена непосредственно на реальный объект.

Литература

1. Л.С. Понтрягин, В.Г. Болтянский, Р.В. Гамкрелидзе, Е.Ф. Мищенко. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1983.

2. Shmalko E., Diveev A. Control Synthesis as Machine Learning Control by Symbolic Regression Methods //Applied Sciences, 2021, 11.

3. Ang K.H., Chong G., Li Y. PID control system analysis, design, and technology // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2005. Vol. 13. No. 4. P. 559-576.

4. Hu F., Zeng C., Zhu G., Li S. Adaptive Neural Network Stabilization Control of Underactuated Unmanned Surface Vessels With State Constraints // IEEE Access, vol. 8, pp. 20931-20941, 2020.

5. Демидова Г.Л., Лукичев Д.В. Регуляторы на основе нечеткой логики в системах управления техническими объектами – СПб: Университет ИТМО, 2017.

6. Красовский А.А. Системы автоматического управления полетом и их аналитическое конструирование. – М.: Наука, 1973.

7. Ахрамович С.А., Баринов А.В., Малышев В.В., Старков А.В. Синтез системы управления беспилотного летательного аппарата по высоте методом бэкстеппинга // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. №2.

8. Колесников А.А., Колесников А.А., Кузьменко А.А. Методы АКАР и АКОР в задачах синтеза нелинейных систем управления. Мехатроника, автоматизация, управление. 2016;17(10):657-669.

9. A.I. Diveev, E.Yu. Shmalko, V.V. Serebrenny, P. Zentay. Fundamentals of Synthesized Optimal Control // Mathematics. 2021. V.9. 21.

10.Jia Y., Song X. et. al. Modeling and motion analysis of four-Mecanum wheel omni-directional mobile platform // 2013 International Automatic Control Conference (CACS), pp. 328-333, 2013.

11.A.I. Diveev, E.Yu. Shmalko. Machine Learning Control by Symbolic Regression. Springer. Cham, Switzerland, 2021.

12.Интернет-ресурс: https://github.com/urock/network_operator.

Л.А. Станкевич[1], А. Журавская[2]

УПРАВЛЕНИЕ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ НА ОСНОВЕ НЕЙРОИНТЕРФЕЙСА

[1]ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург, Stankevich_lev@inbox.ru; [2]СПбПУ, Санкт-Петербург, hella94@mail.ru

Аннотация

В статье представлены результаты исследований по разработке системы управления мобильным роботом с использованием нейроинтерфейса, основанного на классификации воображаемых движений рук и ног путем декодирования электроэнцефалограммам (ЭЭГ) мозга. Сигналы ЭЭГ регистрируются по 8-ми каналам отечественным прибором NeuroPlay-8Cap. Классификатор на основе римановой геометрии позволяет распознавать 8 команд, соответствующих поднятию правой и левой рук, сжатию их кистей, а также поднятию правой и левой ноги и нажатию их ступней. Приведены предварительные результаты, показывающие возможность управления роботом по этим сигналам.

Ключевые слова

Интерфейс мозг-компьютер, электроэнцефалография, воображаемые движения, классификация, мобильный робот, система управления.

L.A. Stankevich[1], A. Zuravska[2]

MOBILE ROBOT CONTROL BASED ON NEUROINTERFACE

[1]Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, St. Petersburg, Russia, stankevich_lev@inbox.ru; [2]SPbSPU, St. Petersburg, Russia, hella94@mail.ru

Abstract

The article presents the results of research on the development of a mobile robot control system using a neural interface based on the classification of imaginary movements of the arms and legs by decoding electroencephalograms (EEG) of the brain. EEG signals are recorded via 8 channels by the domestic device NeuroPlay-8Cap. The classifier based on Riemannian geometry recognizes 8 commands corresponding to raising the right and left hands, squeezing their hands, as well as raising the right and left legs and pressing their feet. Preliminary results are presented showing the possibility of controlling the robot by these signals.

Key words

Brain-computer interface, electroencephalography, imaginary movements, classification, mobile robot, control system.

В последние годы активно развиваются и используются различные средства, которые могут обеспечить лучшее качество жизни людям с ограниченными возможностями, а также могут быть полезными для расширения возможностей здоровых людей. В число таких средств входят роботизированные устройства типа биоэлектрических протезов, инвалидных колясок, сервисных мобильных роботов [1, 2]. Такие устройства могут управляться удаленно или непосредственно человеком-оператором. Удаленное или непосредственное управление мобильными роботами может быть реализовано различными способами, но при работе с обездвиженными людьми требуются бесконтактные средства коммуникации человека и устройства. Одним из перспективных способов реализации бесконтактных коммуникаций человека с ограниченными двигательными способностями и роботизированных устройств является использование нейроинтерфейсов, которые позволяют считывать сигналы, вызванные активностью мозга или проходящие по нервам, с последующим их декодированием с целью определения генерируемых воображаемых движений. В настоящее время разработано много

вариантов инвазивных и неинвазивных нейроинтерфейсов. Наиболее часто для бесконтактного управления роботизированными устройствами используются неинвазивные интерфейсы «нерв-компьютер» (ИНК), регистрирующие и декодирующие сигналы, проходящие по нервам, а также интерфейсы «мозг-компьютер» (ИМК), регистрирующие и декодирующие сигналы биоэлектрической активности головного мозга. ИНК широко применяются в системах управления протезами рук или ног. Для обездвиженных людей, которым необходимо самостоятельно управлять сервисными роботизированными устройствами, часто применяются ИМК, основанные на распознавании воображаемых движений [3].

Наибольший интерес представляют ИМК, регистрирующие многоканальные электроэнцефалограммы (ЭЭГ) и декодирующие воображаемые моторные команды, соответствующие движениям конечностей. ИМК на основе ЭЭГ отличаются неинвазивностью и относительной дешевизной, поэтому эта технология имеет значительный потенциал для создания бесконтактных средств управления роботизированными устройствами. Однако фактором, ограничивающим практическое применение ИМК на основе сигналов ЭЭГ, является сложность надежной и воспроизводимой интерпретации (декодирования) сигналов мозга. Другим фактором является сложность классификации ЭЭГ-паттернов воображаемых движений в реальном времени [4].

Общая структура интерфейса мозг-компьютер представлена на рисунке 1.

Рисунок 1 — Общая схема ИМК на основе ЭЭГ

В данной статье рассматривается проблема управления роботизированными инвалидными колясками и сервисными мобильными роботами с использованием нейроинтерфейса в варианте ИМК, регистрирующего сигналы ЭЭГ и декодирующего ЭЭГ-паттерны воображаемых движений рук и их кистей, а также ног и их стоп. Регистрация сигналов ЭЭГ по 8-ми каналам производится с помощью аппаратуры NeuroPlay-8Cap по пробам, объединенным в сессии для разных пользователей. Многомерные ЭЭГ-паттерны воображаемых движений декодируются классификатором на римановой геометрии [5]. Такой классификатор выбран, поскольку он демонстрируют хорошие результаты, особенно при значительной вариативности сигналов ЭЭГ, за счет использования в качестве признаковой информации ковариационные матрицы.

Классификатор воображаемых движений

Классификатор на римановой геометрии использует специальный алгоритм сравнения ковариационных матриц, который позволяет определять матрицы проб, относящихся к одному классу, оказывающихся ближе друг к другу, чем матрицы проб из разных классов. Подобные классификаторы неоднократно показывали высокие значения точности классификации на общедоступных наборах данных [5]. В литературных источниках показано, что использование таких классификаторов для ЭЭГ-данных позволяет достичь средней точности в offline режиме 85±6%, а в online режиме – 75±5% [6]. Помимо этого, классификатор обладает свойством обобщения, за счет чего он способен адаптироваться к изменениям ЭЭГ, имеющим место в разных сессиях.

Этот метод классификации основан на использовании симметричных положительно-определённых матриц, являющихся обобщением квадратов целых чисел для случая нескольких измерений. Так, дисперсия одномерной случайной величины задаётся положительным числом – суммой квадратов отклонений от среднего значения, в то время как дисперсия многомерной величины, кото-

рой является проба $X_i \in \mathbb{R}^{E \times T}$, представляет собой положительно-определённую ковариационную матрицу C_i, определяемую согласно выражению:

$$C = \frac{1}{T-1} \cdot (X_i - M[X_i]) \cdot (X_i - M[X_i])^T, \quad (1)$$

где $M[X_i]$ – вектор длины E, состоящих из средних по всем пробам значений сигнала для каждого канала, E – количество используемых электродов, $\{X_1, X_2, \dots, X_N\}$ – набор из N проб из ЭЭГ сигнала, для данного набора известен класс $y_i \epsilon \{1,2, \dots, K\}$ для каждой пробы, K – количество классов.

Диагональные элементы ковариационной матрицы при условии равенства средних значений нулю соответствуют дисперсии сигнала для каждого канала в отдельности. При этом уменьшение дисперсии может свидетельствовать об уменьшении амплитуды сигнала, т. е. являться признаком десинхронизации. Аналогично, значения элементов, не находящиеся на главной диагонали – ковариации показаний двух каналов, тоже будут уменьшаться при десинхронизации в соответствующих областях коры головного мозга. Таким образом, использование ковариационных матриц в качестве признаков позволяет определять класс, к которому относится проба, на основе явления десинхронизации.

Одним из наиболее простых и интуитивно понятных методов классификации является *метод ближайших соседей* (*k-nearest neighbors*, kNN), в котором класс для элемента определяется на основе того, к какому классу относятся его k ближайших соседей. При рассмотрении множества объектов X ключевым понятием является метрика – числовая функция d, определенная на декартовом произведении $X \times X$ и удовлетворяющая следующим свойствам:

1. $d(x, y) \geq 0, d(x, y) = 0 \iff x = y$ (аксиома тождества);
2. $d(x, y) = d(y, x)$ (аксиома симметрии);
3. $d(x, y) + d(y, z) \geq d(x, z)$ (неравенство треугольника).

Пара (X, d) называется метрическим пространством. Примером такого пространства может служить евклидово пространство $\mathbb{R}$ с метрикой, задаваемой выражением:

$$d(x, y) = |x - y|. \quad (2)$$

Концепция римановой геометрии предполагает введение другой метрики: ковариационные матрицы одного класса должны оказаться ближе друг к другу, чем матрицы, принадлежащие к разным классам. При этом класс задаётся некой средней ковариационной матрицей, определяемой по принципам, идентичным для одномерного случая. Для определения средней матрицы используется принцип Фреше: для заданного метрического пространства (X, d) и множества $\{C_1, \dots, C_k\}$ точек в нём средним является точка x, минимизирующая дисперсию $\frac{1}{k}\sum_k d^2(x, C_k)$.

В таком метрическом пространстве ковариационных матриц между двумя точками может быть больше одного пути, поэтому среди всех возможных путей рассматривается тот, чья длина минимальна. Длина такого пути или риманово расстояние, выражается как:

$$\delta(C_1, C_2) = \left\| \mathrm{Log}\left(C_1^{-\frac{1}{2}} C_2 C_1^{-\frac{1}{2}} \right) \right\|_F = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \log^2 \lambda_i}. \quad (3)$$

При этом геометрическое среднее набора ковариационных матриц может быть подсчитано в соответствии с подходом Фреше с помощью итерационного алгоритма [5]. Алгоритм Minimum Distance to Mean (MDM) является обобщением метода ближайших соседей для случая ковариационных матриц приведён в [5]. Первым делом производится подсчёт средних ковариационных матриц для каждого класса на основе данных из обучающей выборки, далее каждой новой пробе присваивается класс, средняя ковариационная матрица которого оказалась ближе всего. По результатам обработки нескольких предварительных проб, соответствующих воображаемым сжатиям кисти левой и правой руки, можно отметить, что введённая метрика действительно удовлетворяет требуемым свойствам:

пробы, соответствующие сжатию правой руки, оказываются ближе к средней ковариационной матрице класса «Правая рука», нежели класса «Левая рука».

Однако, многие популярные и эффективные методы машинного обучения (LDA, SVM, нейронные сети) рассчитаны на применение в пространстве $\mathbb{R}^n$, но не во введённом метрическом пространстве. Тем не менее, поскольку ковариационные матрицы являются симметричными и положительно определёнными, введённое пространство локально похоже, т.е. может быть отображено на касательное евклидово пространство, как показано на рисунке 2.

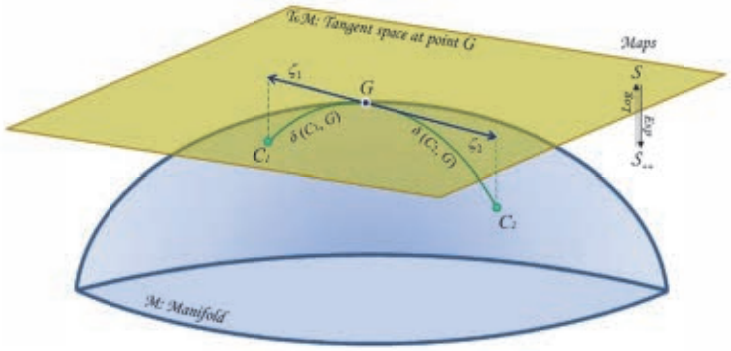


Рисунок 2 — Построение касательного пространства

Касательное пространство может быть построено в любой точке риманова многообразия, при этом вектора на гиперплоскости, соответствующие ковариационным матрицам, будут определяться выражением [5]:

$$S_i = \mathrm{Log}_C\left(C_i\right) = C^{1/2}\ \mathrm{logm}\left(C^{-1/}C_iC^{-1/2}\right)C^{1/2}, \tag{4}$$

где C – точка (ковариационная матрица), в которой строится касательное пространство, logm – матричный логарифм.

В построенном касательном пространстве для классификации паттернов ЭЭГ можно использовать типичные классификаторы, например, метод опорных векторов (Support Vector Machine – SVM). Чтобы сохранить структуру риманова многообразия, необходимо в SVM использовать ядро, задаваемое выражением:

$$k\left(vecm\left(C_i\right),vecm\left(C_j\right)\right) = tr\left(logm\left(C_i\right)logm\left(C_j\right)\right) \tag{5}$$

Для реализации классификатора на основе римановой геометрии в данной работе использован подход MDM, в котором подсчитывается средняя точка в пространстве признаков для каждого из классов. Данный подход интересен тем, что он работает одинаково для любого количества классов.

Методика обучения классификатора и управления

Управление мобильным роботом требует предварительного обучения классификатора выбранным воображаемым движениям. Сначала испытуемые в заданном ритме некоторое время выполняли реальные движения, а затем – только воображали движения в том же ритме. Все ЭЭГ-данные регистрировались и размечались метками, соответствующими начальным моментам воображения каждого из движений. Вся процедура обучения одного испытуемого занимала около часа. Далее проводились испытания обученного классификатора на распознавания каждого выбранного воображаемого движения.

Для управления был разработан программный модуль, преобразующий распознанные с помощью ИМК воображаемые движения в команды управления в соответствии с Таблицей 1. При управлении движениями: Вперед, Назад, Вправо, Влево было возможно выполнять воображение выбранного

движения неоднократно для ускорения движения или уменьшения радиуса поворота мобильного робота. На этом этапе испытуемые некоторое время учились управлять моделью робота, воображая движения, соответствующие командам. Первые попытки управления движением робота показали, что для уверенного прохождения трассы было недостаточно распознавания одной попытки воображения выбранного действия, и робот мог уйти в сторону от трассы. Это было связано с малой точностью распознавания. Далее удалось несколько улучшить результат прохождения трассы за счет усреднения трех попыток воображения выбранного движения.

Таблица 1 — Соответствие воображаемых движений и команд управления

Номер команды	Воображаемые движения	Команды управления
1	Подъем правой руки	Вправо
2	Подъем левой руки	Влево
3	Сжатие кисти правой руки	Стоп вправо
4	Сжатие кисти левой руки	Стоп влево
5	Подъем правой ноги	Стоп вперед
6	Подъем левой ноги	Стоп назад
7	Нажатие ступней правой ноги	Вперед
8	Нажатие ступней левой ноги	Назад

Результаты эксперимента

Эксперимент по управлению моделью сервисного мобильного робота проводился в среде Gazebo с использованием нейроинтерфейса на базе ИМК с предварительно обученным классификатором.

В эксперименте участвовали 5 здоровых испытуемых. Предварительно производилось обучение ИМК на распознавание ЭЭГ-паттернов воображаемых движений рук, кистей рук, ног и ступней ног отдельно для каждого из испытуемых.

При этом была достигнута средняя точность классификации для offline режима 72%, а для online режима – 67%. По сравнению с литературными данными полученные результаты были хуже, но предполагается, что при тщательной настройке классификатора, они должны улучшиться.

Gazebo – программный пакет, работающий в среде ROS (Robot Operation System), предназначенной для создания моделей роботов и среды окружения. Программа моделирования формируется на основе нескольких компонентов. Первым является часть по имитации взаимодействия различных объектов в виртуальном пространстве. Полностью описав робота в виртуальной среде, можно исследовать не только работу алгоритмов, но и устройство робота с физической точки зрения. Установленный в программе физический движок позволяет учитывать мелкие взаимодействия робота со средой или его устройств, речь идёт о трении. Так же есть возможность моделировать мощность моторов, сенсоров и камер. В роли второго выступает весь графический функционал, для отображения результатов взаимодействия объектов. Такая совокупность позволяет создавать процессы работы робототехнических устройств, которые приближены к реальным. В симуляторе Gazebo встроен 3D редактор, позволяющий пользователям моделировать процессы.

Для эксперимента была создана модель робота на четырехколесном шасси (передние колеса – ведущие, а задние – флюгерные). Модель имитирует сервисного робота для развозки лекарств и пищи обездвиженным пациентам. На рисунке 3 показан вид модели, выполненной в программе «robot» и функционирующей в среде Gazebo.

В конфигурацию системы управления платформы входят следующие модули:

- Gazebo;
- Ryman_command_classifier;
- NeuroPlay-8Cap.

Система включения модулей представлена на рисунке 4.

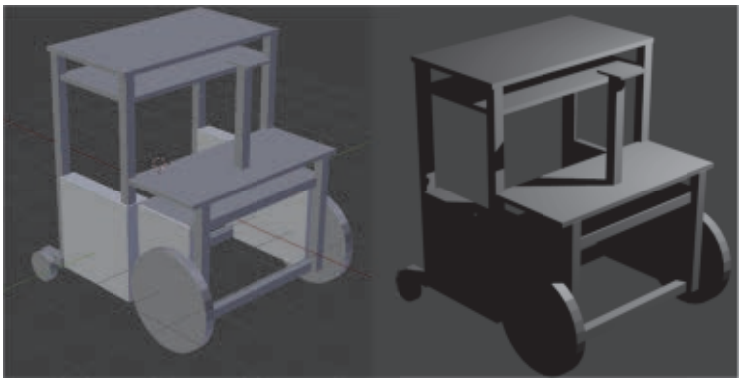


Рисунок 3 — Модель робота

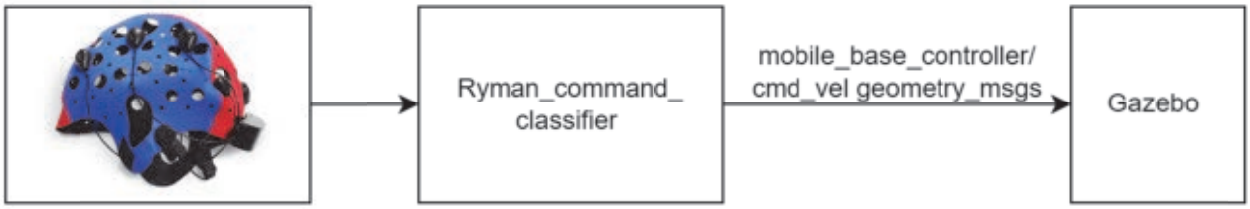


Рисунок 4 — Состав системы управления платформой в режиме прямого управления

В ходе эксперимента по онлайн управлению платформой в режиме прямого управления были получены результаты, представленные в таблице 2. Суть эксперимента заключалась в последовательном выполнении определённых команд управления. Всего было проведено 5 сессий по 24 пробы (3 пробы на каждую из 8-ми команд) в каждой, средняя точность управления составила порядка 71%. В таблице 2 (+) означает, что команда распознана, а (-) – не распознана.

Таблица 2 — Результаты распознавания команд

Номер команды	**1 сессия**	**2 сессия**	**3 сессия**	**4 сессия**	**5 сессия**
1	+	+	+	-	+
2	+	+	+	+	-
3	+	-	+	+	+
4	-	-	-	+	+
5	+	+	+	-	+
6	+	+	-	+	+
7	-	-	-	+	-
8	+	+	-	+	+
Точность	65%	60%	75%	80%	75%

В соответствии с тестированием системы управления мобильным роботом, построенной на основе нейроинтерфейса с ИМК, классифицирующим ЭЭГ-паттерны воображаемых движений рук и ног на римановой геометрии, при регистрации ЭЭГ-сигналов с помощью прибора NeuroPlay-8Cap, получены результаты, свидетельствующие о возможности реализации такого управления. Показано, что достигнутой средней точности классификации воображаемых движений в online режиме 67% недостаточно для уверенного управления движением робота по трассе. Однако применение варианта управления с усреднением нескольких попыток воображения выбранного движения позволяет несколько улучшить управление. В дальнейшем предполагается выбрать оптимальные параметры настройки риманова классификатора с целью повышения его точности и реализации более уверенного управления движением мобильного робота по трассе.

Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России FNRG-2022-0008 1021051101732-4-1.2.1;2.2.2 № 075-01623-22-01 «Исследование методов и разработка технологий создания отладочно-моделирующих комплексов для функционального и поведенческого моделирования РТК и групп РТК».

Литература

1. Tariq, M., Trivailo, P. M., & Simic, M. (2018). EEG-Based BCI Control Schemes for Lower-Limb Assistive-Robots. Frontiers in human neuroscience, 12, 312. https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00312.

2. Carlson, T., & Millan, J. D. R. (2013). Brain-controlled wheelchairs: a robotic architecture. IEEE Robotics & Automation Magazine, 20(1), 65-73. https://doi.org/10.1109/MRA.2012.2229936J2.

3. Станкевич Л.А., Гунделах Ф. В. (2017). Управление роботом с использованием интерфейса «мозг-компьютер». Робототехника и техническая кибернетика. 2, 52-56.

4. Капралов Н.В., Нагорнова Ж.В., Шемякина Н.В. (2021). Методы классификации ЭЭГ-паттернов воображаемых движений. Информатика и автоматизация. 20, 94-132. https://doi.org/10.15622/ia.2021.20.1.4.

5. Congedo M., Barachant A., Bhatia R. (2017). Riemannian geometry for EEG-based brain-computer interfaces: a primer and a review. Brain-Computer Interfaces. 4(3), 155-174. https://doi.org/10.1080/2326263X.2017.1297192.

6. Zuravska, A., & Stankevich, L. A. (2021).The use of a non-invasive brain-computer interface for the classification of imaginary movements of the lower extremities of a person. System Analysis in Engineering and Control: a collection of scientific papers of the XXV International scientific and educational-practical conference. https://10.18720/SPBPU/2/id21-364.

А.А. Демчева[1,2], А.М. Корсаков[1], А.В. Бахшиев[2]

МОДЕЛИРОВАНИЕ БОЛЕВЫХ ОЩУЩЕНИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ БИНАРНОЙ КЛАССИФИКАЦИИ

[1]ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург; [2]ВШАиР, ИММиТ, СПбПУ Петра Великого, Санкт-Петербург, a.demcheva@rtc.ru; a.korsakov@rtc.ru; palexab@gmail.com

Аннотация

В статье предложена модель болевых ощущений, основанная на теории Воротного контроля Р. Мелзака и П.Д. Уолла. Для построения модели использовалась сегментная спайковая модель нейрона с возможностью структурной адаптации. Эта особенность позволяет описывать и изменять структуру нейрона (размер тела клетки, количество и длину дендритов, количество синапсов) онлайн в зависимости от поступающего на входы паттерна импульсов. В статье приведено подробное описание механизма работы предлагаемой модели болевых ощущений, указаны основные отличия модели от схемы Воротного контроля, представлены результаты моделирования, тестирования работы схемы в качестве бинарного классификатора. Сделан вывод о возможностях применения предлагаемой модели в нейроморфных системах.

Ключевые слова

Спайковые нейронные сети, спайковые модели нейрона, сегментные модели нейрона, модель боли, теория воротного контроля, нейроморфные системы.

A.A. Demcheva[1,2], A.M. Korsakov[1], A.V. Bakhshiev[2]

SIMULATING OF PAIN PERCEPTIONS FOR SOLVING BINARY CLASSIFICATION PROBLEMS

[1]Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, St. Petersburg, Russia; [2]Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU), St. Petersburg, Russia, a.demcheva@rtc.ru; a.korsakov@rtc.ru; palexab@gmail.com

Abstract

The paper considers a pain sensation model based on the Gate control theory by R. Melzak and P.D. Wall. The model is defined through the use of CSNM (Compartment Spiking Neuron Model), which allows to describe and change the structure of a neuron online (cell body size, number and length of dendrites, number of synapses) depending on incoming spiking pattern. The paper provides a detailed description of proposed pain model and indicates the main differences between the model and the Gate Control scheme. The performance of proposed model was experimented and evaluated with solving the binary classification problem. The results of modeling have shown the 99.3% classification accuracy, which allows to conclude about the practical application. The proposed model can be used in neuromorphic systems as a part of system state control or as an Inverter (NOT logic gate). In the future, the proposed model can be used to implement behavioral functions, as well as a part of control mechanism in neuromorphic systems.

Key words

Spiking neural network, spiking neuron model, compartment neuron model, model of pain, gate control theory, neuromorphic systems.

Боль является важным механизмом защиты и саморегуляции биологического организма. Она служит сигналом о реальном или предполагаемом повреждении тканей, нарушении в работе нервной системы. Подобный механизм актуален и для технических систем. Реализация модели болевых ощу-

щений в нейроморфных системах может выполнять функции внутреннего контроля состояния и оповещения о внештатных ситуациях. В данной работе представлена модель боли, основанная на теории «Воротного контроля» [1].

В рамках работы использовалась сегментная спайковая модель нейрона [2]. Спайковые нейронные сети отличаются высокой помехоустойчивостью и энергоэффективностью, что достигается благодаря кодированию информации с помощью импульсов (спайков). В отличие от существующих спайковых моделей нейрона, использовавшаяся модель обладает способностью к структурной адаптации, обеспечивающей пластичность нейронной сети. Моделирование было выполнено с помощью средств программной платформы [3].

Предлагаемая модель болевых ощущений основана на теории Р. Мелзака и П.Д. Уолла [1], согласно которой желатинозная субстанция спинного мозга (ЖС) работает как «ворота», управляющие сенсорным входом от периферических нервных волокон (см. рисунок 1). Активность афферентных волокон большого диаметра (L) тормозит передачу импульсов, стимулируя клетки желатинозной субстанции («закрывает ворота»), в то время как активность волокон малого диаметра (S) облегчает их передачу («открывает ворота»), оказывая тормозящее воздействие на клетки желатинозной субстанции. Желатинозная субстанция, в свою очередь, тормозит передачу импульса на терминалях и тонких, и толстых волокон. Спинальные «воротные» механизмы регулируются нисходящими импульсами от головного мозга, которые активируются системой быстропроводящих волокон большого диаметра (L). Суммарное воздействие сигналов определяет выход передаточного нейрона (Т), который при достижении критического уровня активирует систему действия, т.е. зоны центральной нервной системы, формирующие сложные поведенческие реакции на боль [4].

Рисунок 1 — Схема Воротного механизма

Особенностью использовавшейся сегментной спайковой модели нейрона является возможность формировать требуемую реакцию нейрона, оперируя такими гиперпараметрами, как размер нейрона, длина дендритов, число возбуждающих или тормозных синапсов, не переходя к параметрической настройке каждого элемента. Целью настоящей работы не является подробное математическое описание использовавшейся модели нейрона. Такое описание можно найти в [2].

Схема (см. рисунок 2) иллюстрирует разработанную модель болевых ощущений. Приняты следующие обозначения: B^i— сегменты сомы нейрона; $D^{i,j}$ — j-е сегменты i-х дендритов нейрона; G — генератор выходного сигнала. В качестве единственного входа схемы выступает паттерн импульсов X. Одиночный импульс A играет роль стартового механизма и должен поступить на вход системы однократно, после чего блоком «Автогенератор» — кольцевой структурой с обратной связью — запускается непрерывная автоматическая генерация импульсов, поступающих на возбуждающий синапс нейрона, реализующего функцию «НЕ».

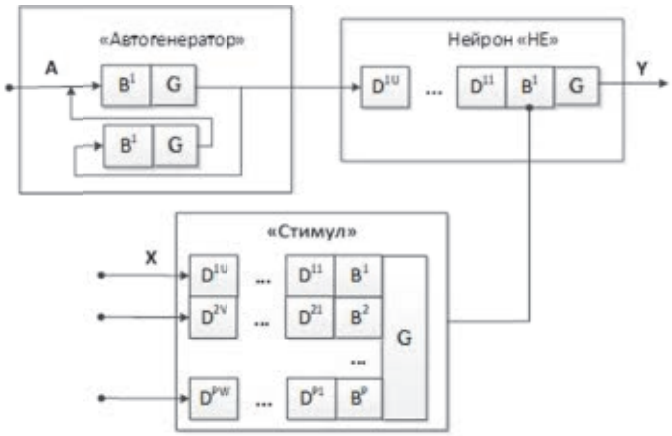


Рисунок 2 — Модель болевых ощущений

Нейрон с возможностью структурной адаптации «Стимул» сравнивает входной паттерн импульсов X с тем паттерном, которому он ранее был обучен (алгоритм обучения описан в работе [5]), и генерирует импульс, если полученный паттерн отличается от обучающего примера не больше, чем на заданную величину (определяется значением порогового потенциала нейрона «Стимул»). Выход данного нейрона подключён к тормозному синапсу единственного сегмента сомы B^1 нейрона, реализующего функцию «НЕ». При активности выхода нейрона «Стимул», его сигнал оказывает тормозное воздействие на нейрон, реализующий функцию «НЕ», и подавляет возбуждающее воздействие со стороны автогенератора — генерации сигнала не происходит. При отсутствии активности на выходе нейрона «Стимул» тормозящее воздействие не возникает, и нейрон, реализующий функцию «НЕ», начинает генерировать выходной сигнал.

Таким образом, штатной ситуацией считается поступление на вход паттерна, близкого к обучающему примеру — тогда реакция модели отсутствует. Тревожной ситуацией считается поступление на вход системы импульса, отличающегося от обучающего примера больше, чем на заданное значение, — в этом случае схема генерирует предупреждающий сигнал.

Предлагаемая модель является упрощенной по отношению к схеме Воротного контроля. В целом можно провести следующую аналогию: обученный нейрон «Стимул» выполняет роль желатинозной субстанции, регулируя интенсивность стимуляции нейрона «НЕ». Активность афферентных волокон моделируется подачей формируемого автогенератором импульсного сигнала на возбуждающий вход нейрона «НЕ». Сам нейрон «НЕ» выполняет роль передаточного нейрона.

Отличие предложенной модели от Воротного механизма состоит в отсутствии связей между активностью афферентных волокон и работой желатинозной субстанции, а также центрального контроля со стороны головного мозга.

Моделирование предложенной схемы болевых ощущений было выполнено с помощью средств программной платформы [3]. Схема представлена в библиотеке блоком *NOTGate*, его структурная организация представлена на рис. 3. Блок *Source* является источником одиночного импульса A (см. рис. 2), который запускает работу автогенератора, состоящего из блоков *Neuron1* и *Neuron2*. Выходы *Neuron1* и *Neuron2* замкнуты на возбуждающие синапсы друг друга — таким образом, возникает кольцевая структура, реализующая непрерывную генерацию импульсов. Длина дендрита и число возбуждающих синапсов для этих нейронов определяется параметрами *DendriteLengthNGen1, NumExcSynapsesNGen1* и *DendriteLengthNGen2, NumExcSynapsesNGen2*, соответственно. Изменение этих параметров позволяет настраивать интенсивность возбуждения нейронов автогенератора и, таким образом, задавать частоту возбуждающего сигнала, поступающего на блок *Neuron* (нейрон «НЕ»).

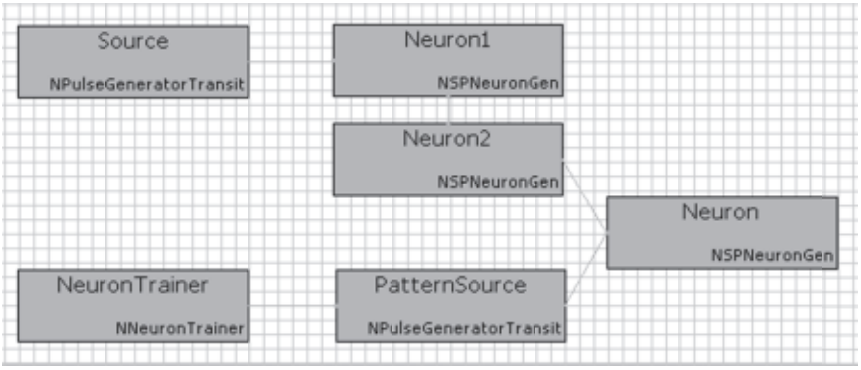


Рисунок 3 — Структурная организация модели

Блок *NeuronTrainer* соответствует нейрону с возможностью структурной адаптации «Стимул». Входной паттерн задается путем определения параметра *InputPattern,* содержащего запаздывания входного сигнала на каждом из дендритов (размерность паттерна равна числу дендритов и по умолчанию равна четырем). Показателем окончания процесса обучения новому паттерну является обнуление флага *IsNeedToTrain* блока *NeuronTrainer*.

Блок *PatternSource* поддерживает тормозящее воздействие выходного сигнала *NeuronTrainer*, путем повторения поступившего импульса с заданной частотой (параметр *PatternFrequency*) в течение определенного периода времени. В рамках исследования длительность периода воспроизведения входного импульса задавалась как:

$$T_{PattMode} = \frac{1}{f_{Spikes}} - \Delta \qquad (1)$$

где — частота генерации ответного импульса обученным нейроном (задается параметром *SpikesFrequency* блока *NeuronTrainer*), Гц; — длительность импульса генератора *PatternSource*, с (параметр *PulseLength*). Выполнение этого условия важно для полного подавления возбуждающего воздействия автогенератора на нейрон «НЕ».

Порог срабатывания схемы может быть настроен путем определения порогового потенциала блока *NeuronTrainer* (параметр *LTZThreshold*).

Значения параметров, использованные при моделировании, приведены в таблице 1.

На рисунке 4 показаны результаты моделирования. В качестве обучающего паттерна использовался набор значений [0; 0,03; 0,06; 0,09]. Одиночный импульс от источника *Source* (1) запускает работу блоков автогенератора — *Neuron1* (2), затем *Neuron2* (3). В начальный момент блок *NeuronTrainer* не обучен и не способен к распознаванию паттерна. Следовательно, тормозящее воздействие с его стороны отсутствует (4), и на выходе схема генерирует оповещающий сигнал (6). Момент завершения обучения блока показан на рисунке стрелкой. Так как на вход далее подается паттерн, совпадающий с обучающим примером, нейрон начинает генерировать ответный сигнал (4), поддерживаемый работой блока *PatternSource* (5). Возникшее тормозящее воздействие подавляет влияние автогенератора, генерация оповещающего сигнала прекращается (6).

Таблица 5 — Параметры, использованные при моделировании

	Параметр	**Значение**	**Ед. изм.**
DendriteLengthNGen1	Длина дендрита на первом нейроне автогенератора	0	-
DendriteLengthNGen2	Длина дендрита на втором нейроне автогенератора	5	-

	Параметр	Значение	Ед. изм.
NumExcSynapsesNGen1	Количество возбуждающих синапсов на дендрите первого нейрона автогенератора. Всегда , так как к одному из синапсов всегда подключен источник одиночного импульса	2	-
NumExcSynapsesNGen2	Количество возбуждающих синапсов на дендрите нейрона 2 автогенератора	2	-
NumInputDendrite	Количество дендритов обучаемого нейрона, размерность входного паттерна	4	-
PatternFrequency	Частота воспроизведения генератором полученного на вход импульса	500	Гц
SpikesFrequency	Частота генерации ответного импульса обученным нейроном	1,5	Гц
InputPattern	Паттерн, подаваемый на вход схемы	[0; 0,03; 0,06; 0,09]	с

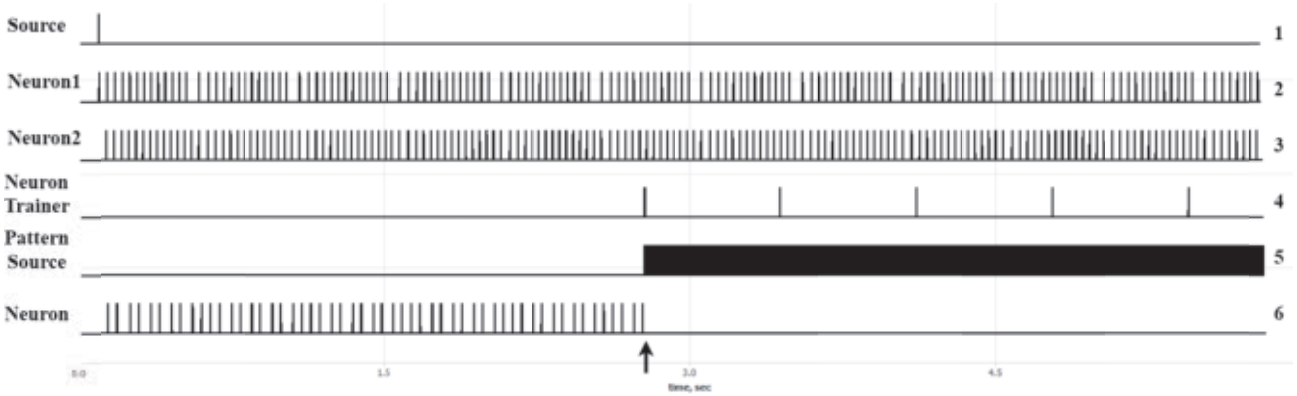


Рисунок 4 — Этап обучения NeuronTrainer

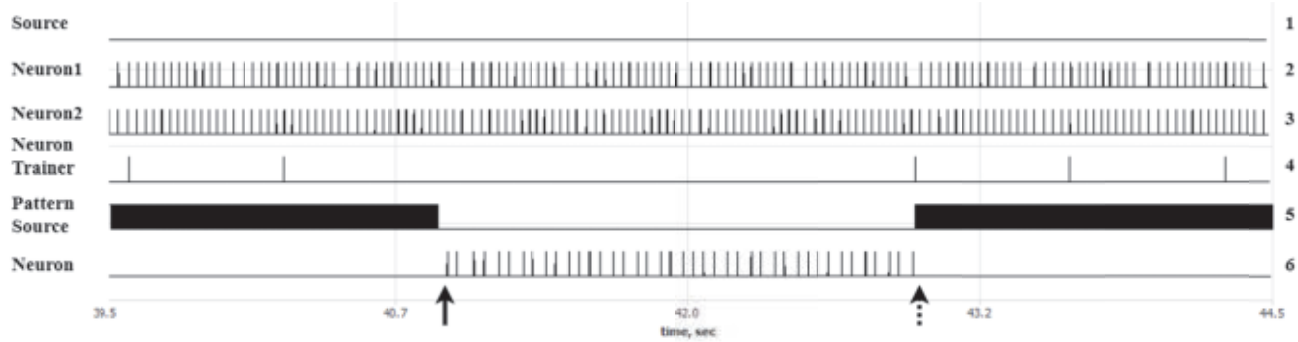


Рисунок 5 — Реакция модели на изменение входного паттерна

На рисунке 5 показана ситуация, когда на вход схемы подается паттерн [0,09; 0,06; 0,03; 0]. Так как он значительно отличается от обучающего примера, блок *NeuronTrainer* перестает реагировать на сигнал (4), однако действие *PatternSource* продолжается еще в течение периода времени, равного (5). После его окончания тормозящее воздействие прекращается, схема начинает генерировать тревожный сигнал (левая стрелка) (6). При изменении паттерна обратно на исходный (см. рис. 5, правая стрелка), сигнал прекращается.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что модель справляется с основной поставленной задачей — генерация оповещающего или тревожного сигнала при изменении входного паттерна на незнакомый.

Механизм контроля состояния системы в простейшем виде аналогичен задаче бинарной классификации, так как необходимо различать штатное состояние и аварийную ситуацию. В связи с этим работа предлагаемой модели была протестирована на наборе данных, включающем 50 измерений для класса *A* (штатная ситуация) и 100 измерений для класса *B* (тревожная ситуация). Каждое измерение содержит четыре величины, выступающие в качестве признаков.

В процессе распознавания паттерна импульсов значимыми являются лишь относительные смещения отдельных спайков в паттерне, смещение всего паттерна по временной шкале никак не сказывается на результате распознавания. Поскольку в рассматриваемой задаче, помимо относительных, значимы и абсолютные величины времени спайков, необходимо привязать паттерн импульсов к некоторому абсолютному значению. Для решения этой задачи в модель вводился дополнительный – калибровочный – дендрит. Значение временной задержки на таком дендрите всегда принимает максимальное значение, т. е. равное ширине временного окна, в данном случае 0,2 с.

Таким образом, входной паттерн в данном эксперименте состоял из пяти импульсов, поэтому число дендритов на обучаемом нейроне (параметр *NumInputDendrite* блока *NeuronTrainer*) было задано равным пяти. Значения прочих параметров соответствуют приведенным в таблице 1.

Модель была обучена по одному примеру, соответствующему классу *A* (штатной ситуации). Ожидалось, что предлагаемая модель будет генерировать тревожный сигнал в ответ на паттерн, соответствующий классу *B* (тревожная ситуация), и не будет отвечать, если на вход подан паттерн, соответствующий классу *A* (штатная ситуация).

В результате эксперимента верная реакция получена в 99,3% случаев. Ошибочно был классифицирован только 1 пример из 150. На рисунке 6 показана проекция пространства признаков использованного набора данных. Крупным белым маркером показан пример, использованный при обучении модели, круглым серым маркером показан пример, классифицированный неверно. Ошибка классификации может быть объяснена тем, что для данного примера величина евклидова расстояния до обучающего примера является наибольшей в классе (см. рис. 6).

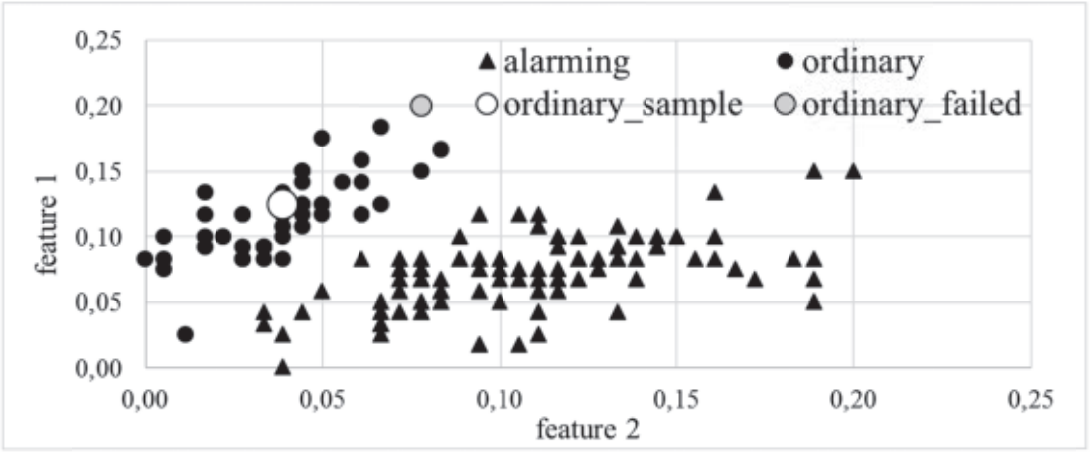


Рисунок 6 — Проекция пространства признаков

Анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод о применимости модели для решения основной поставленной задачей — генерации оповещающего или тревожного сигнала при изменении входного паттерна на незнакомый.

При решении задачи бинарной классификации модель показала точность 99,3% при обучении на одном примере, что также позволяет сделать вывод о возможности применения модели болевых ощущений в качестве бинарного классификатора или логического «НЕ».

Предложенная схема может быть использована в дальнейшем для реализации поведенческих функций, а также в качестве логического отрицания или системы контроля в технических системах.

Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России FNRG 2022 0016 1021060307690-3-1.2.1;2.2.2 № 075-01623-22-00 «Исследование и разработка биоподобной системы управления поведением мобильных роботов на базе энергоэффективных программно-аппаратных нейроморфных средств».

Литература

1. Melzack R., Wall P.D. Pain mechanisms: a new theory//Survey of Anesthesiology. – 1967. – Vol. 11. – Pain mechanisms. – No. 2. – P. 89-90.

2. Bakhshiev A., Gundelakh F. Mathematical Model of the Impulses Transformation Processes in Natural Neurons for Biologically Inspired Control Systems Development / A. Bakhshiev, F. Gundelakh // AIST. – 2015.

3. Bakhshiev A., Fomin I., Gundelakh F., Demcheva A., Korsakov A. The architecture of a software platform for growing spiking neural networks simulator developing//Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Т. 1679. – С. 042001.

4. Е. А. Чагина, Е. П. Турмова, Л. А. Демкина, А. А. Май, Е. Р. Приймач Патофизиологические теории боли. – 2021. – Евразийское Научное Объединение. – N 11-1(81). – С. 54-58.

5. Бахшиев А.В., Корсаков А.М., Астапова Л.А., Станкевич Л.А. Структурная адаптация сегментной спайковой модели нейрона / Бахшиев А.В. и др. // Труды VII Всероссийской конференции Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях. – Нижний Новгород, 2021. – С. 30-33.

М.Ф. Степанов, А.М. Степанов, О.М. Степанова

АСПЕКТЫ САМООРГАНИЗАЦИИ И АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов, mfstepanov@mail.ru

Аннотация

Предлагается подход к самоорганизации с использованием «самообучения», базирующийся на концепции автоматического создания функциональных структур, обеспечивающих решение текущей совокупности задач для достижения поставленной цели. Процесс «самообучения» сводится к расширению умений робота новыми «операциями», представляющими собой «виртуальные функциональные структуры» решения уже известных задач. Предложен алгоритм решения задач самоорганизующейся системы группового управления. Показана эффективность предлагаемого подхода на примере решения модельной задачи использования «самообучения» планирующей подсистемой решения задач.

Ключевые слова

Самоорганизация, самообучение, планирование действий, групповое управление.

M.F. Stepanov, A.M. Stepanov, O.M. Stepanova

ASPECTS OF SELF-ORGANIZATION AND ALGORITHM OF A TASKS DECISION BY INTELLECTUAL GROUP CONTROL SYSTEMS

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia, mfstepanov@mail.ru

Abstract

The approach to self-organization with use of "self-training" which is based on the concept of automatic creation of the functional structures providing a solution of the current set of tasks for achievement of a goal is offered. Process of «self-training» comes down to expansion of abilities of the robot by the new «operations» representing «virtual functional structures» of a solution of already known tasks. The algorithm of a solution of tasks of self-organizing group control system is offered. The efficiency of the offered approach is shown on the example of a solution of a illustrative task with using of «self-training» by the planning subsystem of a tasks solution.

Key words

Self-organization, self-training, planning of actions, group control system.

С расширением сфер применения робототехнических комплексов обострилась проблема обеспечения автономности их функционирования в изменяющихся условиях. При этом под изменяющимися условиями понимается как изменение текущего состояния, параметров, характеристик собственно робота, неорганизованной или плохо организованной, недетерминированной внешней среды, противодействующие решению роботом задач для достижения текущих целей, так и динамического изменения самих целей функционирования системы в целом. Наиболее адекватное поведение в указанных условиях реализуют самоорганизующиеся системы. Среди известных определений самоорганизации применительно к задачам управления наиболее корректным является определение, данное П.К.Анохиным [1]. Принципиальным отличием определения самоорганизации по П.К.Анохину является наличие главного компонента самоорганизации – цели, на достижение которой и направлен весь процесс самоорганизации.

В данной работе в развитие [1], [3], [4] предлагается подход к самоорганизации с использованием «самообучения», базирующийся на концепции автоматического создания функциональных структур, обеспечивающих решение текущей совокупности задач для достижения поставленной цели. Под функциональной структурой, создаваемой для решения конкретной задачи, понимается совокупность элементов (подсистем) самоорганизующейся системы управления, взаимодействующих (осуществляющих обмен сигналами, энергией, данными и т.д.) между собой в определенном хронологическом порядке при решении конкретной задачи и её подзадач. Взаимосвязи между компонентами создаваемых функциональных структур могут быть установлены физически (как например, устанавливаемые связи между нейронами и мышцами биологических систем) или виртуально, что используется в технических системах при реализации в форме программы действия (программы решения задачи).

В управлении группой объектов (роботов, агентов и т.д.) для достижения поставленной цели выделяются [2] централизованный и децентрализованный подходы. Централизованный подход предусматривает наличие центра управления, осуществляющего целеуказания всем членам группы на основе декомпозиции исходной глобальной задачи на подзадачи, оценку достижения локальных целей каждого участника группы и глобальной цели в целом, на основе которой устанавливается факт достижения поставленной цели либо принимается решение о проведении корректировки целеуказания. Децентрализованный подход предполагает наличие конкуренции за право «внести основной вклад в достижение поставленной цели», при которой каждый участник группы самостоятельно выполняет декомпозицию глобальной задачи на локальные подзадачи исходя из собственного «опыта» и «умений». Далеекаждый участник группы среди своего, таким образом, сформированного множества локальных подзадач глобальной задачи выбираетпервостепенную «по его мнению» локальную подзадачу (цель) для её решения (достижения). При этом в силу очевидного различия «умений», создаваемых в результате индивидуального «опыта» каждым участником группы формируемые им множества подзадач общей глобальной задачи также могут различаться. Как следствие, каждый участник группы пойдет к поставленной цели «своим путем». В конечном счете, глобальная задача может быть успешно решена (при наличии достаточного набора «умений» участников группы). Однако, сроки её достижения могут многократно превысить затраты времени при централизованном управлении.

В связи с этим «чисто» децентрализованное управление недопустимо особенно в ситуациях, когда глобальная задача должна быть решена в строго заданные сроки. Как следствие, наиболее перспективным является комбинированный подход, сочетающий достоинства как централизованного, так и децентрализованного подходов. При этом для повышения эффективности решения новых задач группой в целом необходимо воспользоваться примером биологических систем, способности которых позволяют им выживать в агрессивной внешней среде на основе эффективного использования памяти как ключевого механизма самоорганизации.

Отличительной чертой «умений» является возможность их «быстрого» применения в стандартных ситуациях в связи с отсутствиемнеобходимости использования «медленных» методов предварительного построения плана действий, применяемых для решения новых задач.

Предлагаемая концепция самоорганизации систем группового управления базируется на идее превращения «опыта» в «умения» за счет использования памяти, в том числе и на этапах планирования действий и декомпозиции задач.

Для снабжения системы группового управления возможностями к самоорганизации обобщенно память системы должна включать, по меньшей мере, три вида (уровня) памяти: оперативная, временная и долговременная. При этом каждый из указанных видов (уровней) с учетом особенностей конкретного применения может включать дополнительные иерархически связанные подвиды (подуровни). В данном изложении ограничимся указанными тремя уровнями.

Особенности использования многоуровневой памяти отражает обобщенный алгоритм решения задач самоорганизующейся системы группового управления:

1. Целеполагание

$$G(t) = O_G(S(t), F(t)) \tag{1}$$

2. Постановка задачи

$$Z(t) = O_Z(G(t), S(t), F(t)) \text{ , } Z =< G, P, D, R, T >, \tag{2}$$

где, *G*– цель решения задачи *Z*, *P*–план решения задачи, *D*–исходные данные задачи, *R*–требуемый результат решения задачи, *T*–требования, предъявляемые к искомому результату решения задачи. Если задача (2) не может быть поставлена (исчерпаны все возможные варианты) то идти к п. 1 для переопределения цели.

3. Декомпозиция задачи Z на подзадачи по подгруппам участников группы

$$Z(A_i) = \{Z_{A_i}\} = O_D(Z(t), M_A(t), G(t), S(t), F(t)), i = \overline{1, n_A} \tag{3}$$

Если декомпозиция не выполнена или исчерпаны все возможные варианты, то формируется отказ (задача помечается «нерешаемой») от решения задачи (2) и идти к п. 2.

4. Выбор членами (агентами) подгруппы A_i подзадач из подмножества подзадач Z_{A_i} задачи Z

$$Z(a_{ij}) = \{Z_{a_{ij}}\} = O_B(Z(A_i), M_{A_i}(t), G(t), S(t), F(t)), a_{ij} \in A_i, j = \overline{1, n_i}, i = \overline{1, n_A} \tag{4}$$

5. Планирование действий j-м агентом a_{ij} для решения выбранной совокупности $Z(a_{ij})$ подмножества $Z(A_i)$ задач подгруппы A_i:

$$P(Z(a_{ij})) = O_p(Z(a_{ij}), M_K(a_{ij}), Z(t), G(t)) \tag{5}$$

6. Моделирование выполнения агентом a_{ij} построенного плана $P(Z(a_{ij}))$ решения задач $Z(a_{ij})$

$$\begin{aligned} &< \hat{G}(Z(a_{ij})), \hat{R}(Z(a_{ij})) >= \\ &= O_M(P(Z(a_{ij})), Z(a_{ij}), M_K(a_{ij}), Z(t), G(t), S(t), F(t)), a_{ij} \in A_i, j = \overline{1, n_i}, i = \overline{1, n_A} \end{aligned} \tag{6}$$

Формирование возможных результатов решения задач $Z(A_i) = \{Z(a_{ij})\}, i = 1, n_i$ агентами a_{ij} подгрупп A_i и задачи $Z(t) = \{Z(A_i)\}, i = 1, n_A$

$$\hat{R}(Z(A_i)) = \bigcup_{j=1}^{ni} \hat{R}(Z(a_{ij})), a_{ij} \in A_i, j = \overline{1, n_i}, i = \overline{1, n_A} \text{ , } \hat{G}(Z(A_i)) = \bigcup_{j=1}^{ni} \hat{G}(Z(a_{ij})), a_{ij} \in A_i, j = \overline{1, n_i}, i = \overline{1, n_A} \tag{7}$$

$$\hat{R}(Z(t)) = \bigcup_{j=1}^{n_A} \hat{R}(Z(A_i)), i = \overline{1, n_A} \text{ , } \hat{G}(Z(t)) = \bigcup_{j=1}^{n_A} \hat{G}(Z(A_i)), i = \overline{1, n_A} \tag{8}$$

9. Формирование оценки возможности достижения целей решения задач

$$\hat{\varepsilon}_{ij} = \rho(< \hat{G}(Z(a_{ij})), \hat{R}(Z(a_{ij})) >, < G(Z(a_{ij})), R(Z(a_{ij})) >), a_{ij} \in A_i, j = \overline{1, n_i}, i = \overline{1, n_A} \tag{9}$$

$$\hat{\varepsilon} = \sup_i \hat{\varepsilon}_i, i = \overline{1, n_A} \text{ , } \hat{\varepsilon}_i = \sup_j \hat{\varepsilon}_{ij}, j = \overline{1, n_i}, i = \overline{1, n_A} \tag{10}$$

Если $\hat{\varepsilon}_{ij} \leq \varepsilon_{ij}$, (11)

*то*шаг «*предварительное расширение*» процесса самоорганизации:

формируется «*потенциально возможный опыт*» агентов a_{ij} подгрупп A_i,

план $P(Z(a_{ij}))$ решения задачи $Z(a_{ij})$ помечается как «допустимый» и выполняется предварительная аксиоматизация задачи $Z(a_{ij})$

$$C(Z(a_{ij})) \to S(t), F(t), D(Z(a_{ij})) \Rightarrow R((Z(a_{ij})), G((Z(a_{ij})) \leftarrow T(R(Z(a_{ij}))\,, \quad (12)$$

где $C((Z(a_{ij}))$ условия применимости аксиомы, которые могут отсутствовать,

с сохранением её реализации (плана решения) в «оперативной памяти» модели знаний $M_K(a_{ij})$ агента a_{ij} подгруппы A_i ,далее идти к п.10.

*иначе*шаг «*предварительное блокирование расширения*» процесса самоорганизации:

план $P(Z(a_{ij}))$ решения задачи $Z(a_{ij})$ помечается «недопустимым» и выполняется построение аксиомы, описывающей невозможность решения задачи $Z(a_{ij})$

$$C(Z(a_{ij})) \to S(t), F(t), D(Z(a_{ij})) \Rightarrow \neg R((Z(a_{ij})), \neg G((Z(a_{ij})) \leftarrow T(R(Z(a_{ij}))\,, \quad (13)$$

где $C((Z(a_{ij}))$ - условия применимости аксиомы, включающие характеристику условий, в которых решалась задача $Z(a_{ij})$, т.е. $C((Z(a_{ij})) =< S(t), F(t) >$ и сохранение её решения (плана решения) в «оперативной памяти» модели знаний $M_K(a_{ij})$ агента a_{ij} подгруппы A_i ,

далее идти к п.3 для построения иного варианта декомпозиции исходной задачи *Z*.

10. Выполнение агентами a_{ij} действий, предусмотренных «допустимыми» планами $P(Z(a_{ij}))$ решения задач $Z(a_{ij})$

$$\begin{aligned} &< \overline{G}(Z(a_{ij})), \overline{R}(Z(a_{ij})) >= \\ &= O_M(P(Z(a_{ij})), Z(a_{ij}), M_K(a_{ij}), Z(t), G(t), S(t), F(t)), a_{ij} \in A_i, j = \overline{1, n_i}, i = \overline{1, n_A} \end{aligned} \quad (14)$$

Формирование результатов выполнения задач $Z(A_i) = \{Z(a_{ij})\}, i = 1, n_i$ и задачи $Z(t) = \{Z(A_i)\}, i = 1, n_A$

$$\overline{R}(Z(A_i)) = \bigcup_{j=1}^{n_i} \overline{R}(Z(a_{ij})), a_{ij} \in A_i, j = \overline{1, n_i}, i = \overline{1, n_A}\,,\ \overline{G}(Z(A_i)) = \bigcup_{j=1}^{n_i} \overline{G}(Z(a_{ij})), a_{ij} \in A_i, j = \overline{1, n_i}, i = \overline{1, n_A} \quad (15)$$

$$\overline{R}(Z(t)) = \bigcup_{j=1}^{n_A} \overline{R}(Z(A_i)), i = \overline{1, n_A}\,,\ \overline{G}(Z(t)) = \bigcup_{j=1}^{n_A} \overline{G}(Z(A_i)), i = \overline{1, n_A} \quad (16)$$

11. Формирование оценок достижения целей решения задач группы

$$\overline{\varepsilon}_{ij} = \rho(< \overline{G}(Z(a_{ij})), \overline{R}(Z(a_{ij})) >, < G(Z(a_{ij})), R(Z(a_{ij})) >), a_{ij} \in A_i, j = \overline{1, n_i}, i = \overline{1, n_A} \quad (17)$$

$$\overline{\varepsilon} = \sup_i \overline{\varepsilon}_i, i = \overline{1, n_A}\,,\ \overline{\varepsilon}_i = \sup_j \overline{\varepsilon}_{ij}, j = \overline{1, n_i}, i = \overline{1, n_A} \quad (18)$$

12. Проверка достижения целей решения задач группы

Если $\overline{\varepsilon} \le \varepsilon$, (19)

то «*расширение*» процесса самоорганизации:

Если во «*временной памяти*» моделей знаний $M_K(a_{ij})$ агентов a_{ij} подгрупп A_i *отсутствуют* аксиомы, совпадающие с аксиомами «*потенциально возможного опыта*» вида (12) в «оперативной памяти»,

то преобразование «*потенциально возможного опыта*» в «*опыт*»:

аксиомы «*потенциально возможного опыта*» вида (12) в заносятся во «*временную память*».

*иначе*преобразование «*опыта*» в «*умения*»:

*Если*в «долговременной памяти» моделей знаний $M_K(a_{ij})$ агентов a_{ij} подгрупп A_i *отсутствуют* аксиомы, совпадающие с аксиомами «*опыта*» вида (12) во «*временной памяти*»,

то аксиомы «*опыта*» вида (12) во «*временной памяти*» заносятся

в «долговременную память».

*иначе*аксиомы «опыта» вида (12) во «*временной памяти*» заносятся в «*долговременную память*»

Завершение алгоритма.

Иначе «*блокирование расширения*» процесса самоорганизации:

«*потенциально возможный опыт*» агентов a_{ij} подгрупп A_i аннулируется, аксиомы вида (16) исключаются, формируются аксиомы вида (17) и записываются в «оперативную память» соответствующих моделей знаний $M_K(a_{ij})$ агентов a_{ij} подгрупп A_i, далее идти к п. 2.

Основная идея предлагаемого подхода к самоорганизации за счет использования памяти в интеллектуальных системах управления может быть несложно проиллюстрирована, в частности на примере планирования действий при решении новых задач.

В качестве подтверждения работоспособности предлагаемого подхода эффективность введения «умений» может быть оценена сокращением времени на планирование действий при решении новых задач. В качестве инструментального средства для этого воспользуемся средой исследователя интеллектуальной системы синтеза и анализа законов управления «ИНСТРУМЕНТ-3м-И» [5].

Среда исследователя системы «ИНСТРУМЕНТ-3м-И» предоставляет возможности создания моделей знаний с использованием профессиональной терминологии пользователя-исследователя, ставить на них задачи, осуществлять их решение (планирование действий) на построенной модели знаний. Построенный план действий представляется в виде совокупности действий, описываемых аксиомами модели знаний. При этом построенные модели знаний могут далее использоваться инженерами-проектировщиками в среде инженера системы «ИНСТРУМЕНТ-3м-И».

Шаги самоорганизации, реализующие формирование «*потенциально возможный опыт*», «опыт», «умение» осуществляются в виде создания аксиом с атрибутами решенной подзадачи соответствующего уровня представления знаний. Основная идея иллюстративного примера заключается в рассмотрении задачи, в которой может быть выделена подзадача, рассматриваемая как самостоятельная задача. План решения подзадачи алгоритмом самоорганизации может быть сначала оформлен как «опыт», а затем и как «умение». В результате при планировании действий общей задачи план решения подзадачи как «умение» будет трактоваться в качестве элементарного действия, без необходимости затрат времени на планирование действий по его реализации.

Базовой формой представления знаний системы «ИНСТРУМЕНТ-3м-И» является триада

$$M_o = \langle D, \Re, O \rangle, \tag{20}$$

где $D = \{d_i \mid d_i = \langle \Im(d_i), \wp(d_i), \aleph(d_i), \Xi(d_i), \Psi(d_i) \rangle\}$ – множество формализованных обобщений (математических моделей) компонентов систем управления, называемых «предметами», обладающих: свойствами $\rho_j \in \wp(d_i) = \{\rho \mid \rho \in \{true \mid false\}\}$, характеристиками $\chi_j \in \aleph(d_i) = \{\chi_{k_i} \mid \chi_{k_i} \in C^{N_{k_i}} \times C^{N_{k_i}} \times ... \times C^{N_{k_i}}\}$, где C^n n-мерное множество комплексных чисел, формами математических моделей $\mu_j \in \Im(d_i) = \{\mu_1, ..., \mu_{\tau_i}\}$, где $\mu_j = \langle r_j, m_j \rangle$, $r_j = \{r_{j1}, r_{j2}, ..., r_{jk} \mid r_{jl} \in N\}$, $m_j = \{m_{jk} \mid m_{jk} \in C^{r_{jk_1}} \times C^{r_{jk_2}} \times ... \times C^{r_{jk_l}}\}$– множество коэффициентов компонентов (матриц m_{jk} соответствующих размерностей) математической модели μ_j ;классификационными признаками, представляющими собой выделенные свойства предметов $\xi_j \in \Xi(d_i) \subseteq \wp(d_i)$;компонентами (составными частями предметов), в качестве которых могут выступать другие предметы $d_{ij} \in \Psi(d_i) \subseteq D$; $\Re = \{r \mid r = \langle c, s, g \rangle : \wp \cup \aleph \cup \Im \cup \Re \cup O \to \{true \mid false\}\}$– множество отношений (предикатов) над предметами, их компонентами и атрибутами, действиями (операциями); $O = \{o \mid o = \langle c, s, g, q \rangle : \wp \cup \aleph \cup \Im \cup \Re \to \wp \cup \aleph \cup \Im \cup \Re\}$ – множество действий (операций) над предметами и их атрибутами.

Действия $o_i = \langle c_i, s_i, g_i, q_i \rangle \in O$ и отношения $r_i = \langle c_i, s_i, g_i \rangle \in \Re$ характеризуются своими атрибутами: $c_i \in \wp \cup \Re$ – условия применимости, $s_i \in \wp \cup \aleph \cup \Im$ – исходные данные, $g_i \in \wp \cup \aleph \cup \Im \cup \Re$ – результат выполнения действия (операции), $q_i \in \Re$ – требования к результату выполнения действия (операции).

Модель знаний для решения задач иллюстративного примера представлена в виде таблиц 1 и 2. Для компактности рассматривается одноуровневая модель знаний.

Обозначения: ~ - символ логического отрицания, & - символ конъюнкции.

Структура текстового описания действий модели знаний и задач имеет вид:

Имя действия # Условия применимости -> Исходные данные =>

=> Искомый результат <- Требования к результату

Рассмотрим решение задачи «Задача 1»:

Исходные данные:П1.Ф1::Форма "Ф1", П2.Ф2::Форма "Ф2"

Искомые результаты:П3.Ф3::Форма "Ф3"

Требования к результатам:ОВ.О1::Отношение "О1"

Или в компактной форме:

Задача 1 # -> П1.Ф1,П2.Ф2 => П3.Ф3 <- ОВ.О1

Таблица 1 — Символы модели знаний

№	Тип	Символ	Наименование	№	Тип	Символ	Наименование
1	О	О1	Отношение "О1"	9	Ф	П2.Ф2	Форма "Ф2"
2	О	О2	Отношение "О2"	10	П	П3	Предмет "П3"
3	П	П1	Предмет "П1"	11	Ф	П3.Ф3	Форма "Ф3"
4	С	П1.С1	Свойство "С1"	12	П	П4	Предмет "П4"
5	Х	П1.Х1	Характеристика "Х1"	13	Ф	П4.Ф4	Форма "Ф4"
6	Ф	П1.Ф1	Форма "Ф1"	14	П	П5	Предмет "П5"
7	П	П2	Предмет "П2"	15	С	П5.С3	Свойство "С3"
8	С	П2.С2	Свойство "С2"	16	Ф	П5.Ф5	Форма "Ф5"

Таблица 2 — Действия модели знаний

№	Имя	Наименование	Условия	Данные	Результат	Требования
1	ДА1	Действие "Д07"		П1.Ф1,П2.Ф2	П1.С1	
2	ДА2	Действие "Д08"		П1.Ф1,П2.Ф2,П5.Ф5	П2.С2	
3	ДА3	Действие "Д09"		П1.Ф1,П2.Ф2	П5.С3	
4	ДХ1	Действие "Д10"	~П2.С2	П1.Ф1,П5.Ф5	П1.Х1	
5	ДП01	Действие "Д01"	&П1.С1,&П2.С2	П4.Ф4,П5.Ф5	П3.Ф3	
6	ДП02	Действие "Д02"	&~П1.С1,&П2.С2	П4.Ф4,П5.Ф5	П3.Ф3	
7	ДП03	Действие "Д03"	&П1.С1,&~П2.С2	П1.Х1,П4.Ф4,П5.Ф5	П3.Ф3	
8	ДП04	Действие "Д04"	&~П1.С1,&~П2.С2	П1.Х1,П4.Ф4,П5.Ф5	П3.Ф3	
9	ДП05	Действие "Д06"	&П5.С3	П1.Ф1,П2.Ф2	П5.Ф5	
10	ДС01	Действие "Д05"		П1.Ф1,П2.Ф2,П5.Ф5	П4.Ф4	ОВ.О2
11	ДО1	Действие "Д11"		П1.Ф1,П2.Ф2,П3.Ф3	ОВ.О1	
12	ДО2	Действие "Д12"		П1.Ф1,П2.Ф2,П4.Ф4,П5.Ф5	ОВ.О2	

Решение задачи (планирование действий – составление плана решения задачи) выполнялось в системе ИНСТРУМЕНТ-3м-И в автоматическом режиме (кнопка «Автоматически») и потребовало 3005 мксек. Протокол решения задачи представлен на вкладке «Планирование» (рис. 1).

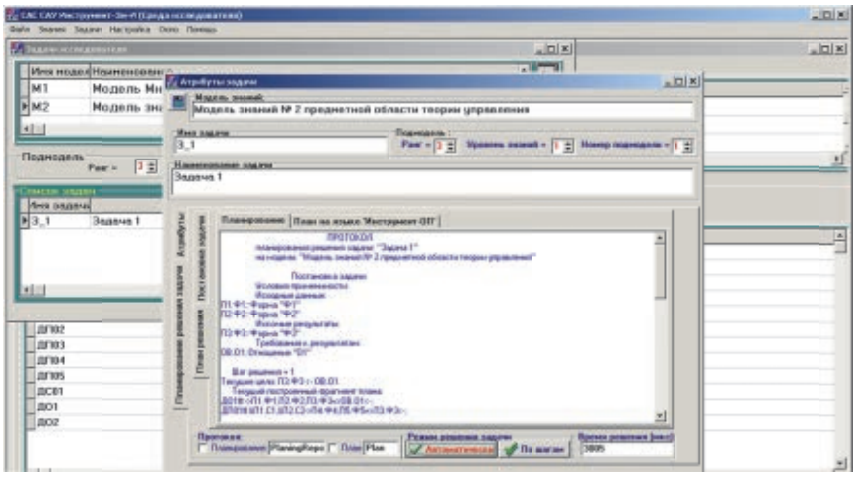


Рисунок 1 — Результаты планирования действий для решения задачи «Задача 1».
Представлен фрагмент протокола работы планирующей подсистемы

Построенный план решения задачи «Задача 1» представлен на рис. 2. План строится в виде списка действий, выполнение который приводит к получению результатов решения задачи.

Текст плана решения задачи «Задача 1» на языке ИНСТРУМЕНТ-ОП:

ДА1# ->П1.Ф1,П2.Ф2=>П1.С1<-;
ДА3# ->П1.Ф1,П2.Ф2=>П5.С3<-;
ДП05# &П5.С3->П1.Ф1,П2.Ф2=>П5.Ф5<-;
ДС01# ->П1.Ф1,П2.Ф2,П5.Ф5=>П4.Ф4<-ОВ.О2;
ДО2# ->П1.Ф1,П2.Ф2,П4.Ф4,П5.Ф5=>ОВ.О2<-;
ДА2# ->П1.Ф1,П2.Ф2,П5.Ф5=>П2.С2<-;
ДХ1# &~П2.С2->П1.Ф1,П5.Ф5=>П1.Х1<-;
ДП01# &П1.С1,&П2.С2->П4.Ф4,П5.Ф5=>П3.Ф3<-;
ДП02# &~П1.С1,&П2.С2->П4.Ф4,П5.Ф5=>П3.Ф3<-;
ДП03# &П1.С1,&~П2.С2->П1.Х1,П4.Ф4,П5.Ф5=>П3.Ф3<-;
ДП04# &~П1.С1,&~П2.С2->П1.Х1,П4.Ф4,П5.Ф5=>П3.Ф3<-;
ДО1# ->П1.Ф1,П2.Ф2,П3.Ф3=>ОВ.О1<-;

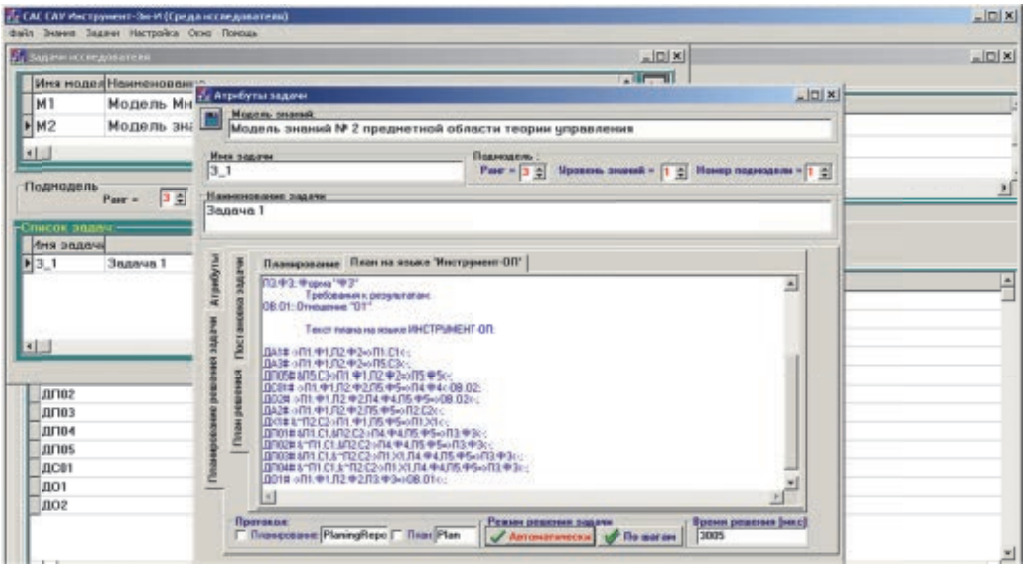


Рисунок 2 — Построенный план решения задачи «Задача 1»

Для моделирования самоорганизации планирующей подсистемы создадим вспомогательную задачу для последующего получения «опыта» её решения и затем создания «умения» привычно её решать как стандартное действие, т.е. без предварительного планирования действий.

Постановка вспомогательной задачи «Задача 2»:

Исходные данные:П1.Ф1::Форма "Ф1", П2.Ф2::Форма "Ф2"

Искомые результаты:П4.Ф4::Форма "Ф4", П5.Ф5::Форма "Ф5"

Требования к результатам:ОВ.О2::Отношение "О2"

Или в компактной форме:

Задача 2 # -> П1.Ф1,П2.Ф2 => П4.Ф4,П5.Ф5 <- ОВ.02

Результат решения задачи «Задача 2» (план решения задачи) представлен на рис. 3.

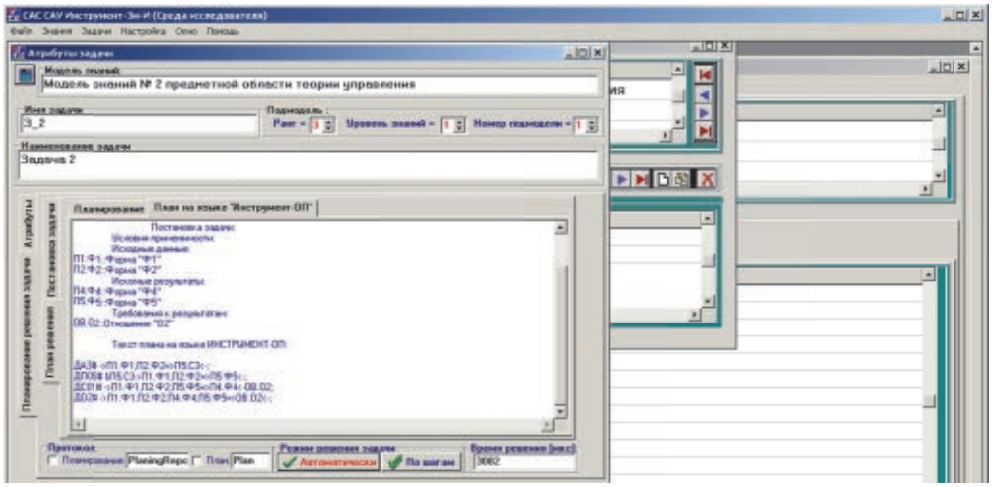


Рисунок 3 — Результат решения задачи «Задача 2». План решения задачи

Текст построенного плана решения задачи «Задача 2» на языке ИНСТРУМЕНТ-ОП:

ДА3# ->П1.Ф1,П2.Ф2=>П5.С3<-;

ДП05# &П5.С3->П1.Ф1,П2.Ф2=>П5.Ф5<-;

ДС01# ->П1.Ф1,П2.Ф2,П5.Ф5=>П4.Ф4<-ОВ.О2;

ДО2# ->П1.Ф1,П2.Ф2,П4.Ф4,П5.Ф5=>ОВ.О2<-;

Опустим для компактности неоднократное решение этой вспомогательной задачи как подзадачи других задач, что в соответствии с алгоритмом самоорганизации должно привести к созданию новой типовой операции, состоящей из последовательности выполнения нескольких операций, записываемой на проблемно-ориентированном языке. Будем называть такую операцию «укрупненной проектной операцией».В рассматриваемом иллюстративном примере для моделирования шага самоорганизации создадим укрупненную проектную операцию (рис. 4), включающую действия, предусмотренные планом решения задачи «Задача 2».

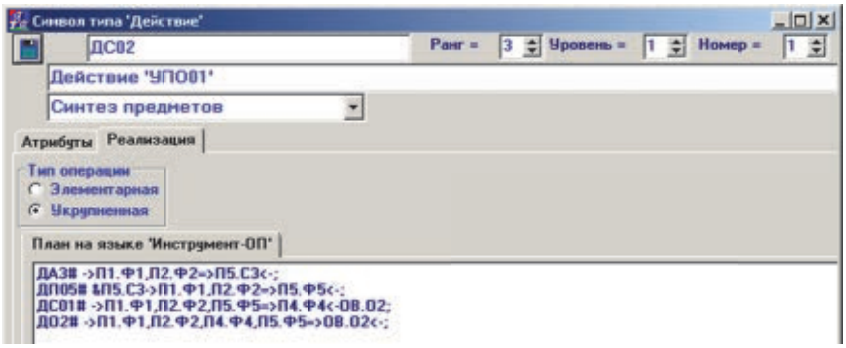


Рисунок 4 — Заполнение атрибута «План на языке ИНСТРУМЕНТ-ОП» создаваемой укрупненной проектной операции «Действие УПО01» с именем ДС02

Теперь вновь вернемся к решению задачи «Задача 1» при наличии новой укрупненной операции ДС02, решающей подзадачу «Задача 2»задачи «Задача 1».Результаты нового планирования действий по решению задачи «Задача 1» представлены на рисунке 5.

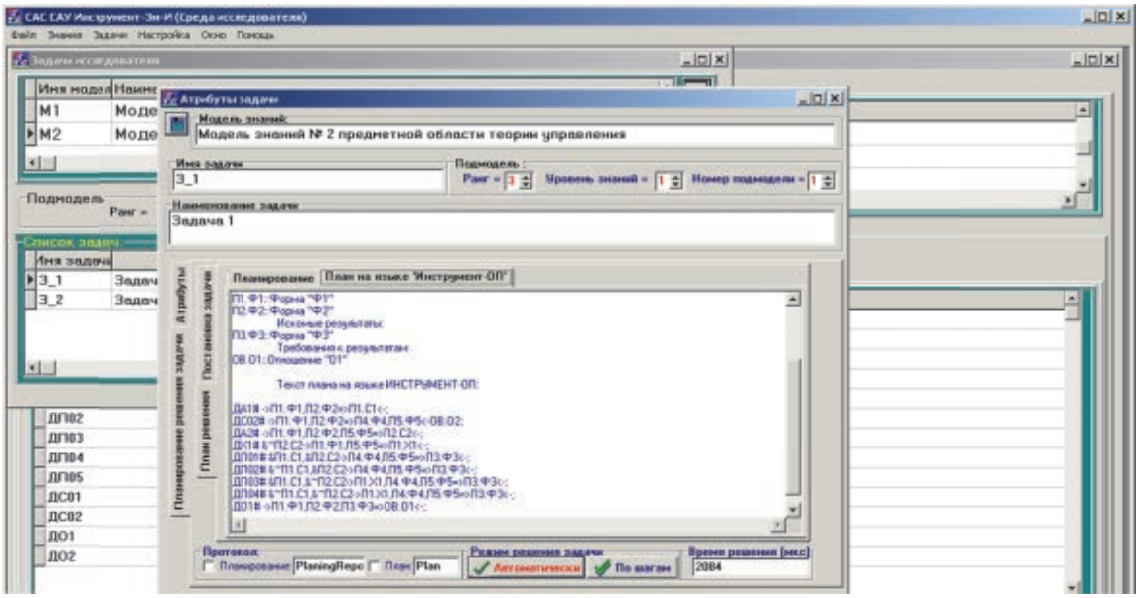


Рисунок 5 — Планирование действий для решения задачи «Задача 1» с использованием укрупненной проектной операции ДС02 (присутствует в списке операций модели знаний)

Построенный план решения задачи «Задача 1» не содержит операции ДА3, ДО2, ДП05, ДС01 подзадачи «Задача 2», но включает операцию ДС02, выступающую как «умение», в состав которой теперь они и входят.Текст плана решения задачи «Задача 1» с использованием укрупненной проектной операции ДС02 на языке ИНСТРУМЕНТ-ОП:

ДА1# ->П1.Ф1,П2.Ф2=>П1.С1<-;

ДС02# ->П1.Ф1,П2.Ф2=>П4.Ф4,П5.Ф5<-ОВ.О2;

ДА2# ->П1.Ф1,П2.Ф2,П5.Ф5=>П2.С2<-;

ДХ1# &~П2.С2->П1.Ф1,П5.Ф5=>П1.Х1<-;

ДП01# &П1.С1,&П2.С2->П4.Ф4,П5.Ф5=>П3.Ф3<-;

ДП02# &~П1.С1,&П2.С2->П4.Ф4,П5.Ф5=>П3.Ф3<-;

ДП03# &П1.С1,&~П2.С2->П1.Х1,П4.Ф4,П5.Ф5=>П3.Ф3<-;

ДП04# &~П1.С1,&~П2.С2->П1.Х1,П4.Ф4,П5.Ф5=>П3.Ф3<-;

ДО1# ->П1.Ф1,П2.Ф2,П3.Ф3=>ОВ.О1<-;

Для построения плана меньшей длины потребовалось меньшее время (2084 мксек вместо 3005 мксек, т.е. на 30,65% меньше), что и является следствием применения накопленных «умений» решать известные задачи при использовании их в качестве подзадач на этапе планирования действий для решения «новых» неизвестных задач.

Способности запоминать, накапливать опыт и умения позволяют биологическим системам обеспечить выживаемость во враждебной среде обитания. Самоорганизация технических систем нацелена на обеспечение возможностей достижения целей функционирования не только в нормальных, но и в экстремальных условиях. Использование самообучения, иерархических механизмов памяти повышает эффективность самоорганизации. Разработанный алгоритм решения задач самоорганизующейся системой управления включает самообучение подсистемы планирования действий. Эффективность предлагаемого подхода демонстрируется решением задачи на модели знаний в системе автоматизации решения задач управления «ИНСТРУМЕНТ-3м-И».

Данная работа продолжает исследования, поддержанные грантами РФФИ 13-07-00647, 15-07-99684, а также грантом 14.577.21.0282 Минобрнауки России.

Литература

1. Анохин, П. К. Философские аспекты теории функциональной системы / П. К. Анохин. — М.: Наука, 1978.

2. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Методы и модели коллективного управления в группах роботов. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. - 280 с.

3. Степанов М.Ф. Интеллектуальные самоорганизующиеся системы автоматического управления. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2002. – 112 с.

4. Степанов М.Ф. Исследование алгоритмов функционирования интеллектуальной системы управления разведывательным робототехническим комплексом / М.Ф.Степанов, А.М.Степанов, Д.Ю.Петров, О.М.Степанова // Экстремальная робототехника.- 2021.-Т.1. №1.-С.136-142

5. Степанов М. Ф. Нейронные сети для планирования решения задач теории автоматического управления // Проблемы управления. 2004. № 2. С. 66-71.

А.Д. Московский, М.А. Ровбо, П.С. Сорокоумов

ПРЕДСКАЗАНИЕ ОПАСНЫХ СИТУАЦИЙ ПО ДАННЫМ СТЕРЕОКАМЕРЫ ПРИ ДВИЖЕНИИ МОБИЛЬНОГО РОБОТА ПО СЛОЖНОМУ ЛАНДШАФТУ

Национальный исследовательский центр «Курчатовский Институт», Москва,
moscowskyad@gmail.com, rovboma@gmail.com, petr.sorokoumov@gmail.com

Аннотация

В работе рассмотрен подход к решению задачи обеспечения безопасного движения мобильным роботом в среде, отличной от комнатной. «Некомнатные» среды характерны тем, что помимо опасности столкновения с элементами среды добавляется опасность падения с высоты или опрокидывания робота при езде по неровной или наклонной поверхности. Предлагаются архитектура и подход к обучению глубокой нейросетевой модели, которая по данным стереокамеры и характеру движения робота предсказывает класс и вероятность опасной ситуации, в которую попадет робот, если продолжит движение. Предложенный подход показал свою работоспособность как в симуляционной среде Gazebo, так и на реальном робототехническом устройстве.

Ключевые слова

Стереокамера, предсказание опасностей, безопасное движение, машинное обучение.

A.D. Moscowsky, M.A. Rovbo, P.S. Sorokoumov

DANGEROUS SITUATION PREDICTION BY STEREO CAMERA DATA FOR MOBILE ROBOT MOTION ON A COMPLEX LANDSCAPE

National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia,
moscowskyad@gmail.com, rovboma@gmail.com, petr.sorokoumov@gmail.com

Abstract

The paper considers an approach to safe movement of a mobile robot in an outdoor environment. In these environments, in addition to the collision with the elements of the environment, the danger of falling from a height or the robot tipping over on an uneven or inclined surface is added. An architecture and approach to training a deep neural network model is proposed that predicts the class and probability of a dangerous situation that the robot will fall into if it continues to move according to the video from the stereo camera and the trajectory parameters. The proposed approach has shown its effectiveness both in the Gazebo simulation environment and on a real robotic device.

Key words

Stereo camera, danger prediction, mobile robot safety, machine learning.

Обеспечение безопасности движения – одна из основных задач при создании мобильного робототехнического устройства. Эта задача весьма хорошо решена для роботов, функционирующих в комнатной среде, и для которых нежелательные ситуации прежде всего связаны со столкновениями. Обычно безопасность движения обеспечивается построением двумерной карты препятствий по данным различных дальномеров и дальнейшей экстраполяцией положения робота с учетом текущей скорости и модели движения. Экстраполированное положение робота далее проверяется на пересечение с картой препятствий. Похожий механизм оценки траекторий лежит и в основе задач планирования движения мобильным роботом. Он представлен в виде инструментария, например, в распространённом фреймворке для прототипирования роботов ROS. Однако при движении робота по открытой местности становятся возможны и иные опасные ситуации, такие как падение с высоты или опроки-

дывание с наклонной поверхности. Для определения таких ситуаций роботу требуется более развитая сенсорика, включающая камеры глубины или лидары, производящие сканирование в трехмерном пространстве. Такие сенсоры позволяют получить трехмерный «срез» местности, по которой планируется движение. Существуют подходы, позволяющие также оценить смещение робота, в таком пространстве и оценить безопасность движения [1, 2], однако для них требуется серьезная предобработка данных, например, сведение разряженного облака точек, выдаваемого такими сенсорами, к модели поверхности. Любой подход с построением карты проходимости для дальнейшего анализа затруднен в виду большого количества элементов среды, которые требуется корректно опознать и нанести на карту, а также ввиду «неидеальности» получаемых данных из-за шумов разного рода или отсутствия сведений о части видимой области.

В противовес классическому подходу с анализом карты препятствий предлагается применить подход на основе машинного обучения, создав нейросетевую модель, которая будет выполнять требуемое предсказание по данным стереокамеры, как наиболее доступного сенсора, способного работать с трехмерным пространством. Подходы с обучением занимают все больше места в современной робототехнике, в том числе и при решении задачи безопасного движения, например, работы [3, 4] с использованием методов обучения с подкреплением. Наиболее близкой к данной работе является [5], где нейросетевая модель определяет безопасную траекторию движения дрона по карте глубины со стереокамеры.

В данной же работе основная задача - оценить, насколько безопасна будет отправленная колесному роботу команда движения. Такая система в первую очередь требовалась для интеграции в роботизированную инвалидную коляску, разрабатываемую в Курчатовском институте [6].

Рисунок 1 — Роботизированная инвалидная коляска с глазоуправлением

Одной из возможностей данной коляски (рис. 1) является управление при помощи взгляда [7]. Такой способ управления разрабатывается в парадигме «еду куда смотрю» и полезен для лиц из числа инвалидов с сильным нарушением моторики верхних конечностей, но сопряжен с рядом рисков. Основная проблема заключается в том, что система не способна по данным устройства, определяющего направление взгляда, отличить целенаправленную команду от спонтанного движения глаз, что в свою очередь может привести к выполнению неправильной команды. Одним из способов решения такой проблемы является развитая система безопасности, которая сможет оценить команду пользователя и заблокировать её, если она опасна для пользователя и устройства.

Предлагаемое решение

Таким образом, от нейросетевой архитектуры требуется по данным со стереокамеры определить безопасность некоторой команды, которую выдает пользователь. Команда пользователя для управле-

ния колесным роботом с дифференциальным приводом представляет собой две величины – линейную и угловую скорости. Предсказание должно описывать ситуацию, которая произойдет через некоторый промежуток времени. Осознанно также делать сразу несколько предсказаний, через несколько промежутков времени, чтобы иметь возможность варьировать время реакции на опасную ситуацию в зависимости от пользователя. Архитектура сети изображена на рисунке 2.

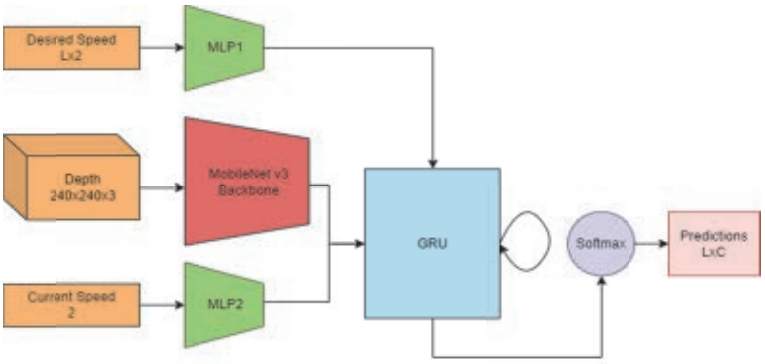


Рисунок 2 — Архитектура нейронной сети для предсказания опасных ситуаций

На сеть подаются входные данные, состоящие из набора команд пользователя, для которых требуется выполнить предсказания, подготовленной карты глубины со стереокамеры и текущей скорости робота. Каждый тип данных проходит свою обработку: скорости – многослойными перцептронами, изображение с стереокамеры - магистралью MobileNetv3 [8]. Далее все поступает на вход рекуррентного модуля архитектуры Gated Recurrent Unit (GRU). Результат обработки текущей скорости и изображения соединяются в единый вектор и подаются на GRU как внутреннее состояние, а результат обработки команд - на основной вход. Конечные результаты нормируются функцией активации Softmax с получением на выходе вероятности ситуации для каждого класса и для каждой из входных команд.

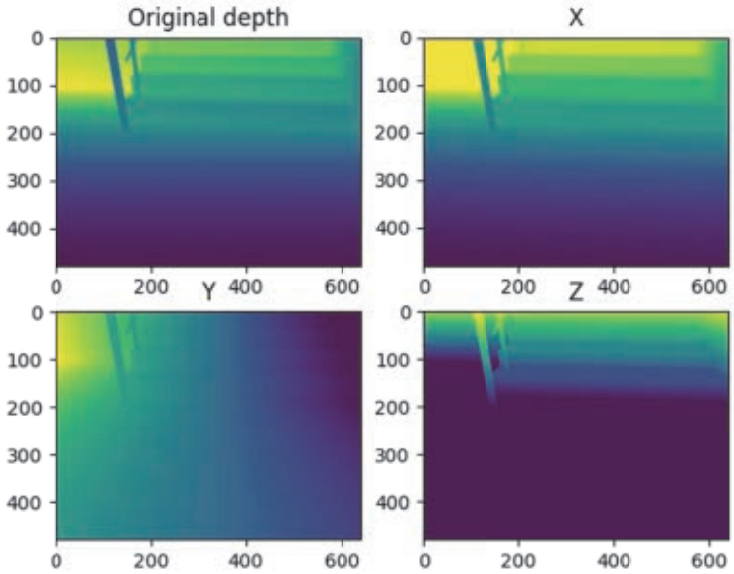


Рисунок 3 — Пример результата преобразования карты глубины со стереокамеры, разложенного по отдельным каналам

Классическая карта глубины со стереокамеры представляет собой одноканальное изображение, где значение пикселя соответствует расстоянию до объекта по некоторому направлению. Направление определяется параметрами камеры. Для того чтобы добавить эту информацию на вход сети, изображение преобразовывается в трехканальное, где значения каждого пикселя — это его трехмерные координаты в системе отсчёта робота. Переход к трехканальному изображению позволяет без изменений

пользоваться проверенными предобученными сверточными архитектурами, такими как MobileNetv3. Также на получившемся трехканальном изображении некоторые элементы окружающей среды, такие как плоские поверхности, хорошо «видны» на отдельных каналах, т.к. имеют одинаковые значения (на рисунке 3 на канале Z можно видеть, что точки пола под роботом имеют равную высоту).

Далее изображение уменьшается до входных значений 240x240 методом интерполяции по ближайшему соседу. При обучении нейронной сети на данных карты глубины было обнаружено, что полезно отключить процедуру нормирования пакета (BatchNorm), которая широко применяется в сверточных архитектурах для ускорения процесса обучения. Процедура BatchNorm выполняет локальное нормирование каждого отдельного пакета данных, взятых для обучения, однако в случае карт глубины на значениях пикселей стоят реальные расстояния в метрах, которые будут случайно изменены в ходе перенормировки.

Обучение в симуляторе

Как и для большинства задач, решаемых с помощью подходов машинного обучения, требуется подготовить корректный набор данных. Для сбора данных робот должен случайно двигаться в пространстве, записывая данные со стереокамеры и регистрируя те или иные ситуации. Однако делать это на реальном роботе проблематично, так как он подвергается опасности. В таком случае можно воспользоваться виртуальными симуляторами, где в каждый момент доступна вся информация о роботе и его окружении. В среде Gazebo был подготовлен ряд виртуальных миров, по которым случайно перемещалась модель роботизированной инвалидной коляски (рис. 4).

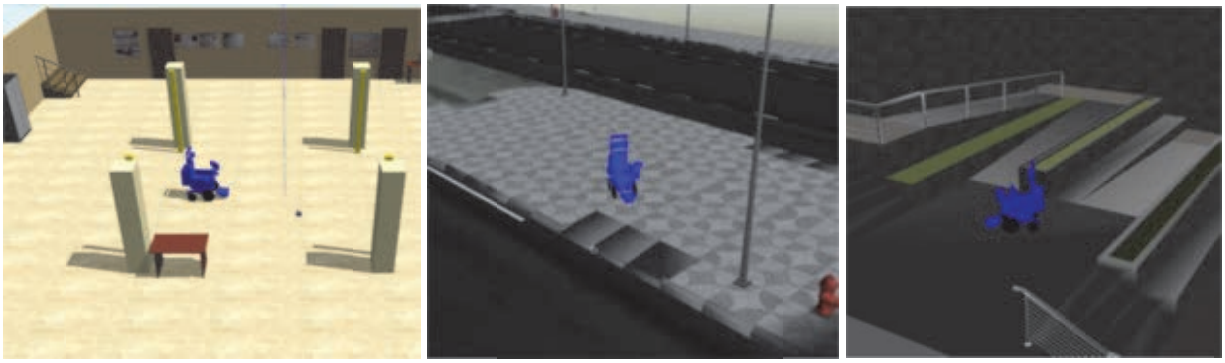


Рисунок 4 — Примеры миров для сбора данных в симуляции

Столкновения определялись по данным о контактах между объектами, а падения - по истинной ориентации робота и резкому скачку в высоте. Управляющий сигнал формировался случайно из заданного диапазона и сохранялся в течение нескольких шагов. Каждый шаг – время, за которое собираются данные, - в данном случае был выбран равным 1.5 сек. Данные со стереокамеры и скорости записывались в начале шага, класс ситуации – в конце. Если происходила опасная ситуация, то робот перемещался в другую точку мира: с некоторой вероятностью - в случайную, с некоторой - за несколько шагов до опасной ситуации. Такая процедура позволила расширить данные, имея похожие карты глубины, которые при разных командах приводят к разным ситуациям. На данном этапе важно было соблюсти синхронность данных, чтобы изображения соответствовали своим классам. Для проверки корректности данных был создан ряд инструментов.

Во время обучения набор данных формировался путем выбора случайного шага. Последовательность скоростей и ситуаций составлялась из L (обычно выбирались значения 3 или 5) последующих шагов. В случае если опасная ситуация происходила ранее L, то последующие шаги заполнялись случайными скоростями из диапазона, а класс ситуации сохранялся тем же. Оптимизатор SGD показывал результаты по предсказанию уже после первой эпохи (рис. 5).

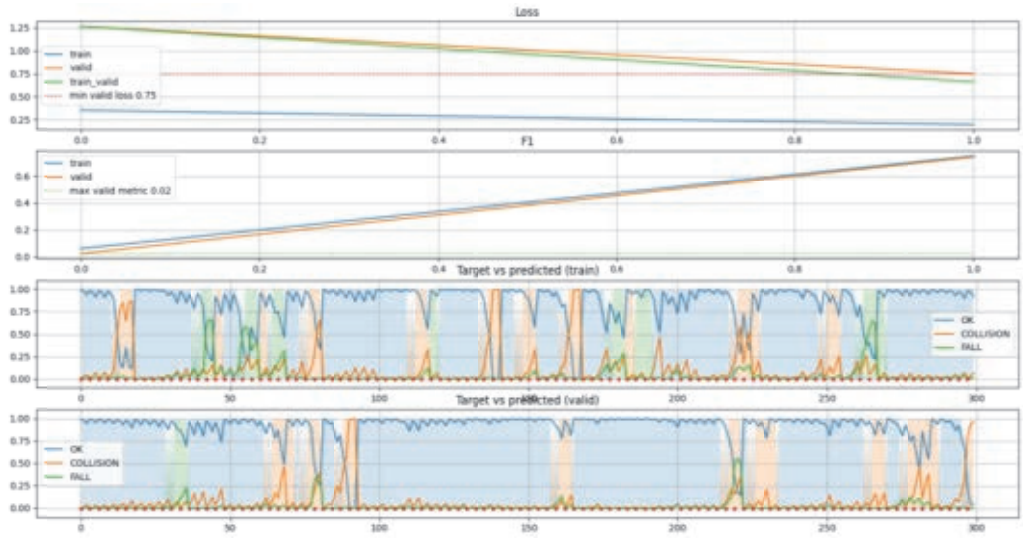


Рисунок 5 — Визуализация процесса обучения модели. Первый график — значения функции потери на разных наборах данных, второй — значения метрики F1, третий и четвертый — визуализация предсказаний на некотором подмножестве обучающего и тестового набора данных

Через несколько эпох начинало происходить переобучение, поэтому сохранялись модели с лучшими показаниями функции потерь и метрики на тестовом наборе данных. Лучшие модели показали хорошую способность предсказывать опасные ситуации на тех же мирах, где происходило обучение.

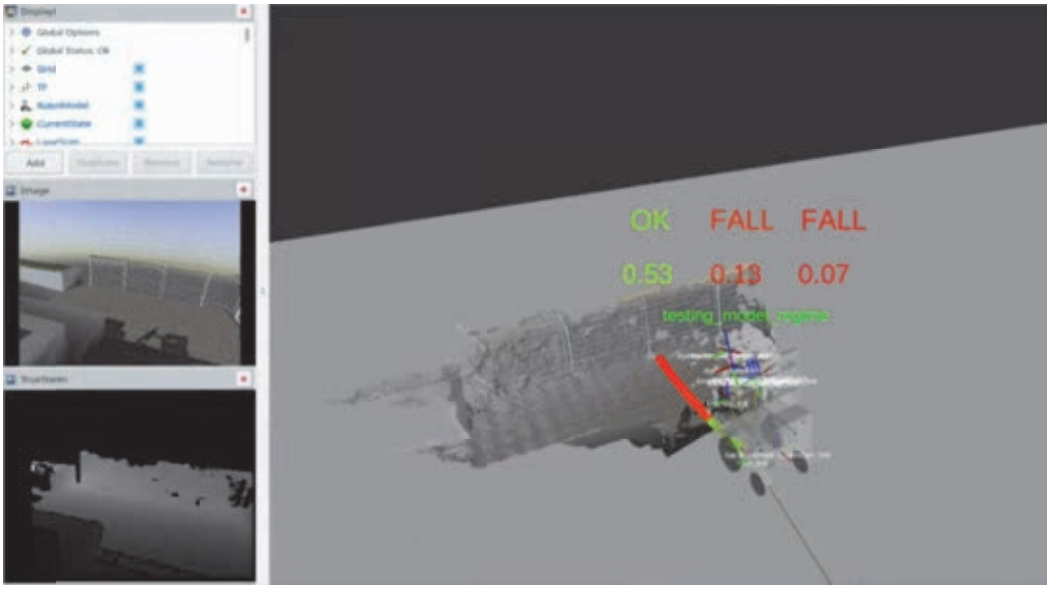


Рисунок 6 — Корректное предсказание скорого падения с лестницы, которое произойдет на втором шаге

Обучение на реальных данных

Несмотря на то, что в симуляции карта глубины получалась путем классического восстановления из двух изображений со стереопары, перенести модель на реальное устройство не удалось. Предсказания не соответствовали реальности, предположительно из-за различий в симулированных и реальных данных. Для проверки данной гипотезы был собран небольшой набор данных с реального робота, включающий только столкновения, которые определялись при помощи двумерного лидара и классическим способом, описанным в начале работы. Модель, обученная только на реальных данных, также показала хорошие результаты в предсказании и позволила избегать столкновения (рис. 7).

Также информацию о предлагаемой системе предсказания опасных ситуаций можно получить в видеоматериале по ссылке https://youtu.be/SrQPnzfWUFw.

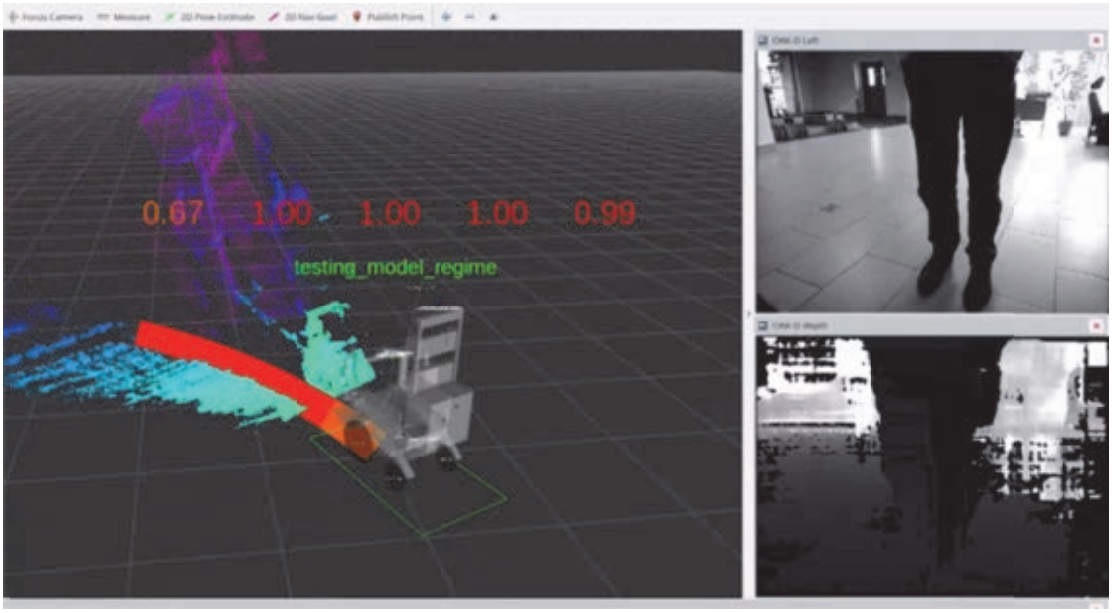


Рисунок 7 — Тестирование системы на реальном роботе

Был предложен и протестирован способ определения различных опасных ситуаций при помощи обучения. Метод показал свою применимость в симуляционной среде и частичную применимость в реальной. Проблемой в реальном случае все еще остается добавление различных опасных ситуаций в обучающие данные. В настоящее время прорабатывается несколько путей решения данной проблемы. Один из путей – создание «крепкого» робота, способного выдерживать небольшие падения. Также возможно использование человека как учителя, который бы в реальности сопровождал робота, прерывая его движение при приближении к опасной ситуации. Однако данный вариант сопряжен с человеческим фактором и вероятно влечет за собой проблемы в синхронизации данных, т.к. временной промежуток перед опасной ситуацией будет варьироваться. Наиболее желательным вариантом остается обучение в симуляторе. Авторами ведутся работы по использованию API стереокамер семейства OAK-D, которые позволят восстанавливать карту глубины из изображений не с реальных камер, а из симуляции, тем самым сделав данные максимально похожими на те, что будут в реальности.

Литература

1. Putz S. et al. Continuous Shortest Path Vector Field Navigation on 3D Triangular Meshes for Mobile Robots // 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2021. P. 2256–2263.

2. Wei M., Isler V. Energy-efficient Path Planning for Ground Robots by Combining Air and Ground Measurements. 2019.

3. Patel U. et al. Dynamically Feasible Deep Reinforcement Learning Policy for Robot Navigation in Dense Mobile Crowds. 2020.

4. Feng S., Sebastian B., Ben-Tzvi P. A Collision Avoidance Method Based on Deep Reinforcement Learning // Robotics. 2021. Vol. 10, № 2. P. 73.

5. Loquercio A. et al. Learning high-speed flight in the wild // Sci. Robot. 2021. Vol. 6, № 59.

6. Karpov V.E. et al. Architecture of a Wheelchair Control System for Disabled People: Towards Multifunctional Robotic Solution with Neurobiological Interfaces // Mod. Technol. Med. 2019. Vol. 11, № 1. P. 90–102.

7. Московский А.Д. Применение технологии отслеживания взгляда для высокоуровневого управления роботизированным подвижным объектом // Вестник военного инновационного технополиса Эра. 2021. Vol. 2, № 3. P. 27–32.

8. Howard A. et al. Searching for MobileNetV3. 2019.

Д.А. Анохин, К.И. Кий

АНАЛИЗ НАМЕРЕНИЙ СОСЕДНИХ ВОДИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

Российский государственный гуманитарный университет, Москва, anodmitry@gmail.com;
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной математики им. Келдыша Российской Академии Наук (ИПМ РАН), Москва, konst.i.kiy@gmail.com

Аннотация

В работе рассматривается подход к анализу сигнальных зон впередиидущего автомобиля с помощью компьютерного зрения на основе метода геометризованных гистограмм для описания и сегментации цветных изображений. Описан метод нахождения сигнальных зон и определения их состояния на основе анализа графов цветовых сгустков кадров видеопоследовательности изображений дорожной сцены. Разработана программа, которая реализует описанный метод. Приведены примеры обработки кадров с помощью разработанной программы. На основе анализа каждого кадра видеопоследовательности и нахождения сигнальных зон впередиидущего автомобиля в реальном времени производится определение момента начала торможения и его продолжительность.

Ключевые слова

Сегментация и сжатое описание изображений, метод геометризованных гистограмм, анализ видеопоследовательностей.

D.A. Anokhin, K.I. Kiy

COMPUTER VISION-BASED ANALYSIS OF THE BEHAVIOR OF ADJACENT DRIVERS

Russian State University for Humanities, Moscow, Russia, anodmitry@gmail.com; Keldysh Institute of applied mathematics of RAS, Moscow, Russia, konst.i.kiy@gmail.com

Abstract

In this paper, an approach to analysis of the state of signal zones of the vehicle in front based on computer vision is addressed. This approach is based on the geometrized histograms method (GHM) for description and segmentation of color images. A method for finding signal zones and determining their state based on the analysis of graphs of color bunches of video frames of road scenes is described. A program implementing the developed method was developed. Examples of processing frames by this program are presented. Using real-time computer analysis of each frame of a video sequence and finding and analyzing signal zones of the vehicle in front, the moment of the start of its braking and the duration of braking are found.

Key words

Image segmentation and concise description of images, image sequence analysis, geometrized histograms method.

Каждый опытный водитель реагирует на поведение соседних водителей и пытается отслеживать изменения их намерений. Особо важными являются следующие моменты:

1. Водитель впередиидущей машины начал тормозить.
2. Водитель впередиидущей машины включил поворотник и собирается сделать поворот или разворот.
3. Водитель в соседней полосе включил поворотник и собирается перестроиться или не имеет намерений по перестроению и просто забыл выключить сигнал поворота.
4. Водитель в соседней полосе начинает маневр в нашу сторону.

5. Водитель в соседней полосе подрезает наш автомобиль.

На основе анализа сообщений в прессе можно заключить, что многие аварии беспилотных автомобилей связаны с неумением их систем управления правильно и своевременно действовать в перечисленных ситуациях. Это связано с неумением нейронных сетей находить мелкие объекты (сигнальные зоны автомобилей) проверять их состояние и хорошо анализировать динамические процессы, а также проводить сложный анализ корректности выбранных решений на основе учета многих факторов. Пример автомобиля Тесла, который неожиданно протаранил несколько автомобилей на обочине, включая полицейскую машину, из-за того, что неправильно распознал разметку, говорит о том, что нужен сложный логический анализ сцены, учитывающий много факторов. Были случаи аварий из-за торможения впередиидущего автомобиля или необоснованно резкого торможения из-за заезда в полосу автомобиля из соседней полосы. Также много аварий происходит из-за действий водителя впередиидущего автомобиля и небольшого отвлечения от управления водителей. Система, которая может информировать, например, о начале торможения впередиидущего транспортного средства и выдать информацию о его продолжительности, может предупредить утратившего внимание водителя или систему управления автономного транспортного средства необходимости действий, требующих мгновенной реакции. Следует также отметить, что для выводов в перечисленных ситуациях необходимо проводить анализ сигнальных зон по результатам их работы на достаточно больших временных интервалах, и нельзя сделать заключения на основе анализа только одного кадра.

Решение указанных задач в рамках систем помощи водителям, так называемых ADAS, также представляет большой интерес. Изменение сигнальных зон ввиду малости их областей на изображении можно замечать только на изображениях достаточно высокого разрешения. Поэтому возникает потребность в методах, которые способны работать в реальном времени на больших изображениях и с использованием достаточно дешевых вычислительных средств с тем, чтобы можно было это реализовывать в ADAS на достаточно бюджетных автомобилях.

Сегментация изображений и построение систем понимания изображений в реальном времени являются ключевыми элементами в развитии автономных робототехнических комплексов. Большие успехи в этом направлении получены с помощью использования нейронных сетей с глубоким обучением. Однако нейронные сети пока не могут хорошо оценивать динамику движения объектов и могут давать непредсказуемые результаты в незнакомой ситуации.

Ввиду того, что лидар является дорогим устройством и дает информацию с некоторым запаздыванием, компьютерное зрение может дать более быстрое предупреждение на основании выявления момента начала торможения по анализу состояния сигнальных зон впередиидущего транспортного средства (сигнал торможения в сигнальных зонах). Устройство, основанное на компьютерном зрении, может применяться даже в дешевых системах помощи водителю, если компьютерные алгоритмы могут быть реализованы в реальном времени на недорогих устройствах типа мобильных телефонов. Отслеживание сигнальных зон впередиидущего транспорта позволяет также предупреждать об опасном сближении с ним на основе анализа изменения расстояния между левой и правой частью его сигнальной зоны. Это может быть полезно, даже если просто разность скоростей машин ощутимая, торможение впередиидущего транспортного средства отсутствует (нет включения сигналов), а водитель просто отвлекся. Поэтому такой компьютерный анализ может найти важное применение в соответствующих системах предупреждения водителя даже в достаточно бюджетных автомобилях, а также в системах автономного и полуавтономного управления транспортными средствами. В следующем разделе кратко описана техника, которая применяется при решении сформулированных задач.

Метод геометризованных гистограмм для поиска мелких окрашенных объектов и построение систем понимания изображений реального времени

Предлагаемые алгоритмы обнаружения сигнальных зон впередиидущего автомобиля и анализа их состояния основаны на методе геометризованных гистограмм, разработанном в [1–5]. С помощью

техники, описанной в [2–5], каждому цветному изображению ставится в соответствие структурный граф цветовых сгустков *STG*. Чтобы построить *STG* изображение разбивается на полосы одинаковой ширины St_n со сторонами параллельными горизонтальной или вертикальной оси плоскости изображения *Os*. Вводится понятие геометризованной гистограммы изображения [3], которая является далеким обобщением обычной гистограммы и учитывает не только частоты появления цветовых характеристик изображения, но и описывает геометрию распределения цветов на плоскости изображения. Это дает возможность иметь сжатое описание изображения, которое содержит в себе описание его геометрии. Это описание дает возможность не только выделять объекты на изображении, но и устанавливать пространственные связи между этими объектами.

Получается геометризованная гистограмма с помощью проектирования пикселов полосы на ее нижнее основание. Удается при проектировании разделить всё множество точек полосы на подмножества, в которых насыщение, оттенок и яркость варьируются в некоторых диапазонах. В каждой полосе получаются системы интервалов, каждый из которых *Sg* характеризуется следующими параметрами:

- Положение интервала $[beg_{Sg}, end_{Sg}]$ *Sg* на оси *Os*.
- Диапазон $\Delta_H^{Sg} = [H_{min}^{Sg}, H_{max}^{Sg}]$ и среднее значение оттенка H_{mean}^{Sg}.
- Диапазон $\Delta_S^{Sg} = [S_{min}^{Sg}, S_{max}^{Sg}]$ и среднее значение S_{mean}^{Sg} насыщения.
- Диапазон $\Delta_I^{Sg} = [I_{min}^{Sg}, I_{max}^{Sg}]$ и среднее значение яркости I_{mean}^{Sg}.
- Мощность интервала CardSg (приблизительно равна числу точек полосы, лежащих в полосе над интервалом с цветовыми характеристиками, заключенными в интервалах, указанных выше для Sg на оси Os).

Обозначим $dens(Sg) = Card^{Sg}/(end_{Sg} - end_{Sg} + 1)$ плотность интервала *Sg*.

Геометризованная гистограмма получается за один проход массива изображения [1, 4], что дает возможность строить ее в реальном времени. С помощью оригинальной операции кластеризации [3] интервалы геометризованной гистограммы объединяются в цветовые сгустки *g,* которые характеризуются такими же, как и у интервалов *Sg*, составляющих данный сгусток, яркостно-цветовыми параметрами, мощностью и плотностью. Цветовые сгустки объединяются в граф. В полосе соединяются ребром соседние цветовые сгустки (с соседними интервалами локализации), а в соседних полосах – цветовые сгустки, интервалы локализации которых пересекаются. Неформально, каждый сгусток дает описание некоторой части реального объекта в полосе, его проекцию на ось *Os* и описание значений численных цветовых характеристик этой части объекта. *STG* можно интерпретировать геометрически с помощью наложения интервалов локализации его сгустков ($[beg_b, end_b]$) на центральную линию соответствующей полосы и окрашивания этих отрезков в цвет, определяемый H_{mean}^{b}, S_{mean}^{b}, I_{mean}^{b}. Алгоритмы построения геометризованной гистограммы и графа *STG* в деталях описаны в [1–5].

С помощью программы находящейся на [6] можно построить и визуализировать геометризованную гистограмму множество цветовых сгустков для любого изображения в формате BMP (на сайте имеется инструкция для пользователя этой программы). Построение графа цветовых сгустков можно распараллелить [1] и реализовать в реальном времени на достаточно медленных процессорах с несколькими ядрами [1] или на компьютерах с достаточно большим числом не очень быстрых процессоров.

На множестве цветовых сгустков строится “решетка поиска” SearchLat (*STG*) [5], которая позволяет производить глобальный анализ изображения. Если мы положим на среднюю линию каждой полосы разбиения изображения интервалы геометрической локализации $[beg_b, end_b]$ всех цветовых сгустков полосы, то получаем некоторое ее покрытие. Введем плотность цветового сгустка как $dens(b) = Card^b /L([beg_b, end_b])$ (мощность, деленная на длину интервала). Цветовые сгустки, имеющие в некоторой точке средней линии максимальную плотность, называются доминирующими цветовыми сгустками. Ясно, что доминирующие цветовые сгустки образуют покрытие средней линии. Оказывается [5], что всегда можно выбрать линейно-упорядоченную последовательность базисных цветовых

сгустков, которые образуют покрытие средней линии. Доминирующие цветовые сгустки, включенные в линейно-упорядоченное покрытие, называются базисными цветовыми сгустками. Базисные цветовые сгустки всех полос образуют решетку поиска изображения SearchLat (*STG*) [5]. Решетка поиска состоит из линейно упорядоченных цепочек доминирующих цветовых сгустков, покрывающих ось *Os*. Многие задачи по поиску ориентиров и объектов в кадре, можно переформулировать строго как задачи поиска некоторых абстрактных объектов на графе цветовых сгустков.

Способность метода геометризованных гистограмм с помощью построения графа *STG* находить в реальном времени даже очень малые контрастные объекты, такие как сигнальные зоны автомобилей, была отмечена и использовалась в работе [7]. После разработки в [1] методов распараллеливания построения *STG* появилась возможность решать в реальном времени задачи на HD-видео. Результаты компьютерной обработки, наложенные на изображения, которые показывают цветовые сгустки, соответствующие сигнальным зонам (включая очень слабый сигнал третей зоны, расположенной в окне автомобиля и загоревшиеся сигналы торможения), а также включение сигналов поворота, продемонстрированы на рисунке 1.

Более темные красные отрезки соответствуют габаритам, более яркие – загоревшимся сигналам торможения, а яркий желтый квадрат соответствует сигналу поворотника. Необходимо отметить, что на данном изображении изменение состояние третей сигнальной зоны еле заметно для человека (часть изображения выше отрезка, обнаруживающего это изменение). Это говорит о высокой различающей способности GHM и его способности решать задачи при малой заметности признаков. В следующем разделе будет описан метод получения компонент сигнальных зон и методов анализа динамики их изменения.

Метод выделения, описания и анализа компонент сигнальных зон

Необходимо отметить, что сигнальные зоны состоят из нескольких частей, имеющих разные оттенки красного или желтого. На некоторых камерах и в определенных погодных условиях (сильно пасмурная погода) яркие сигналы могут выцветать до ярких бесцветных. Причем сигнальные зоны поворота и торможения в автомобилях, произведенных в разных странах, могут быть как желтого, так и красного цвета. Все это означает, что при цели осуществлять опознавание сигнальных зон при неизвестных камерах и любых погодных условиях, мы имеем дело с очень сложной задачей. Для решения этой задачи используется метод геометризованных гистограмм [1—5]. В этом методе реальные объекты описываются цветовыми сгустками в графе *STG*. Из выше сказанного следует что, сигнальным зонам автомобиля в каждой полосе должны соответствовать несколько цветовых сгустков в графе цветовых сгустков *STG* с различными цветовыми параметрами, которые определенным образом объединены своими локализациями.

Чтобы описать состояние сигнальной зоны надо проанализировать цвет и яркость всех компонент ее образующих. Поэтому необходимо строить кластеры, образованные кандидатами в части сигнальных зон среди цветовых сгустков *STG* в каждой полосе. Для этого последовательно рассматриваются цветовые сгустки-кандидаты в полосе и к выбранному кандидату присоединяются другие кандидаты из полосы, которые имеют близкие яркостно-цветовые характеристики и интервалы локализации.

Алгоритм нахождения и анализа состояния сигнальных зон построен основываясь на перечисленных свойствах входных данных:

1. На первом шаге находятся на *STG* цветовые сгустки-кандидаты на представление частей сигнальных зон, имеющие интервалы локализации относительно небольшой длины и раскрашенные в цветовые оттенки, которые могут иметь эти части. Также в полосах строятся кластеры кандидатов, которые объединяются по причине их близкой локализации.

2. На втором шаге строятся непрерывные цепочки кластеров, расположенных в разных полосах, которые могут порождать сигнальные зоны автомобилей.

3. На третьем шаге проверяется факт, что построенные цепочки могут быть частями некоторых впередиидущих автомобилей.

4. На четвертом шаге состояние компонент выбранных цепочек проверяется для последовательности кадров видеопоследовательности с целью нахождения моментов начала торможения и определении его длительности.

Аналогичные действия предпринимаются для анализа кандидатов на сгустки представляющие сигналы включения поворотника. В качестве возможных оттенков рассматривается весь диапазон красного и желтого. Интересно, что, например сигнал поворотника меняет свои оттенки, когда он загорается, разгорается и пропадает. Яркость сначала растет, но потом падает, а оттенок идет от границы с красной зоной до границы с зеленой, а потом обратно. Также надо принимать во внимание возможность выгорания ярких цветов.

Рисунок 1 — Выделение цветовых сгустков, соответствующих сигнальным зонам автомобиля

Каждый получившийся кластер в полосе характеризуется следующими параметрами:

1. Mean_Hue, Max_Hue, Min_Hue – средним, максимальным и минимальным значением оттенка; 2. Mean_Sat, Max_ Sat, Min_ Sat – средним, максимальным и минимальным значением насыщения цвета; 3. Mean_Gray, Max_Gray, Min_Gray – средним, максимальным и минимальным значением полутоновой интенсивности; 4. BegInterv и EndInterv – началом и концом интегрированного интервала компонент данного кластера, построенного с помощью объединения интервалов локализации цветовых сгустков, образующих данный кластер; 5. ClusterNumber – общего номера кластера по всему изображению; 6. NumberInTheStrip – номер кластера в полосе; 7 NumberOfTheConnectedCluster – номер кластера, который соответствует возможной второй части сигнальной зоны в полосе на противоположной части автомобиля; 8. BasicBunchNumber – номер первого сгустка, с которого начинался процесс построения данного кластера; 9. ClusterSignificance – приблизительное число точек в полосе, соответствующих данному кластеру. Также, для каждого кластера имеется список всех цветовых сгустков, входящих в него. Это особенно важно для последних моделей автомобилей, имеющих сложный многокомпонентный состав.

На рисунке 1, объединенные интервалы локализации получившихся кластеров нанесены на нижние границы соответствующих полос. Причем яркость этих интервалов приблизительно соответствует средней яркости найденных кластеров. Из рисунка видно, что найденные кластеры показывают активизацию режима торможения. Это подтверждают последние яркие кластеры в верхних частях цепочек, соответствующих сигнальным зонам, а также появившийся кластер, соответствующий третьей сигнальной зоны. Особую сложность представляет нахождение компоненты, связанной с третьим сигналом торможения, расположенным на окне автомобиля. Дело в том, что соответствующий

цветовой сгусток может иметь низкое цветовое насыщение и высокую полутоновую интенсивность. На самом деле на автомобиле могут иметься места с низким цветовым насыщением и высокой полутоновой интенсивностью, цвет которых не виден человеку и которые воспринимаются как бесцветные. Для устранения таких фальшивых кандидатов найдены эмпирические оценки незаметности цвета в зависимости от насыщения и полутоновой интенсивности. Кроме того, нахождение третьей тормозной компоненты зависит от качества камеры и от типа автомобиля. На некоторых типах автомобилей (например, марках KIA) даже и для качественных камер, которые не обрезают цвет в ярких местах, преобладающим цветом в третьей тормозной компоненте является желтый. Поэтому третья тормозная зона может давать два цветовых сгустка, мощный – желтый и более слабый – красный. Особенно это проявляется, когда впередиидущий автомобиль расположен близко. На дешевых камерах видеорегистраторов желтая компонента может вырождаться просто в яркую бесцветную. И чтобы подтвердить начало торможения надо анализировать много факторов.

Из рисунка 1 видно, что сигнальная зона автомобиля может быть расположена в нескольких полосах изображения. Для того, чтобы выделить на изображении область сигнальной зоны в этом случае необходимо объединить полосы, в которых найдены ее части. Для этого нужно построить все цепочки кластеров цветовых сгустков кандидатов на части сигнальной зоны, у которых близкие интервалы локализации. Такие цепочки сгустков определят (с помощью их интервалов локализации) некоторый прямоугольник на изображении, в котором может находиться сигнальная зона. Более того, анализируя яркостно-цветовые характеристики цепочки, можно выделить в ней компоненты разной яркости. Из рисунка видно, что нижние компоненты сигнальных зон и верхние имеют существенно разную яркость. Имеется выделенная третья яркая компонента в третьей сигнальной зоне, что говорит о том, что включился сигнал торможения. Для того, чтобы сделать уверенный вывод об этом необходим анализ данных по предыдущим кадрам. Исходя из частоты ввода кадров делается циклически обновляемый массив, содержащий данные приблизительно за 10 секунд движения основного автомобиля. На этом массиве выделяются интервалы постоянного состояния сигнальных зон (с наличием или без наличия торможения). На основании его анализа определяются моменты начала торможения и его длительность.

Более темные составляющие сигнальных зон хорошо видны даже на камерах достаточно дешевых видеорегистраторов. Поэтому сигнальные зоны хорошо выделяются предложенными алгоритмами и разработанными программами даже в этом случае. Рисунок 2 показывает пример объединения кластеров кандидатов в полосах в цепочки, которые выделяют сигнальные зоны автомобиля.

Рисунок 2 — Цепочки кандидатов в полосах, порождающие сигнальные зоны

Отличие в состоянии сигнальных зон при включении торможения и поворотника показывает рисунок 3. Этот кадр часть съемки автомобиля Фольксваген Polo на камеру хорошего качества. На левой части рисунка изображен кадр с автомобилем до начала торможения. В полосах нанесены кластеры цветовых сгустков, которые имеют темный цвет. На правой части кадра нанесены кластеры после начала торможения. Сверху в сигнальных зонах добавляются кластеры повышенной яркости. Также появляется третью сигнальная зона. Она обозначена кластером более яркого цвета, расположенным ниже сигнальной зоны. Заметим, что третья сигнальная зона очень плохо видна. Одна из

причин – яркая пересветка от отражения солнца на заднем стекле. Также обнаружен яркий кластер желтого цвета, соответствующий сигналу включенного поворотника, который обнаружен программой и визуализирован желтым прямоугольником. Разработанная техника также позволяет выделять третьи компоненты сигнальных зон в случае, когда более массивная компонента имеет желтый цвет.

Если желтая компонента выцветает до яркой бесцветной, ввиду низкого качества камеры и плохих погодных условий, то ищется соответствующий цветовой сгусток на графе *STG*, который расположен внутри сигнальной зоны. Вместе цветовым сгустком красного цвета он служит подтверждением начала торможения.

Рисунок 3 — Сравнительный анализ результатов обработки до после включения сигнала торможения

Для реализации третьего шага алгоритма была разработана техника построения почти вертикальных линий на SearchLat (*STG*) [1, 5, 7], которые могут соответствовать граничным частям на автомобилях. На всех рисунках, соответствующие почти вертикальные линии нанесены на рисунки зеленым пунктиром. Для каждой цепочки-кандидата на сигнальную зону, для всех цветовых сгустков, которые в нее входят проверяется наличие слева или справа соответствующей почти вертикальной линии и делается заключение о возможности представлять граничную сигнальную зону некоторого автомобиля. Находятся также возможные пары сигнальных зон, принадлежащие одному автомобилю. Также при определении соседнего автомобиля принимаются во внимание данные о разметке дороги, которые также получены с помощью метода геометризованных гистограмм [1, 8].

Для реализации четвертого шага алгоритма разработаны и реализуются алгоритмы прослеживания цепочек, описывающих сигнальные зоны, в кадрах видеопоследовательностей и формирования файлов, описывающих динамику изменения состояния сигнальных зон.

Возможность работы сконструированных алгоритмом в реальном времени на относительно медленных компьютерах с несколькими процессорами или ядрами была показана с помощью с помощью распараллеливания программ, реализующих метод геометризованных гистограмм, в [1]. В настоящее время обдумывается реализация программ на процессорах мобильных телефонов, что сильно удешевит стоимость возможных устройств в составе советующих систем помощи водителям. Предполагается, что на многопроцессорных слабых процессорах также может быть достигнута скорость 2—30 fps для HD-видео.

Программная реализация и экспериментальная проверка

В настоящее время полностью реализованы программами шаги 1, 2 и 3 предложенного алгоритма. Шаг 4 в настоящий момент находится в стадии отладки и проверки. Получены первые положительные результаты на видеопоследовательностях. В частности, на видеопоследовательности, кадры их которой представлены на рисунках, получены 100% результаты по нахождению и определению состояний всех трех сигнальных зон. Также, полностью определены все моменты включения сигнала поворотника. Работа пока ведется в основном на видеопоследовательностях, снятых в светлое время дня (включая вечернее и пасмурную погоду), так как это – наиболее трудный случай, когда неосвещенные и даже части зажегшихся сигнальных зон плохо заметны или их цвет искажается. Необходимо отметить, что программы характеризуются очень высокой логической сложностью и для удовле-

творительного решения задачи в полной постановки и, принимая во внимание использование камер типа тех, которые имеются в стандартных видеорегистраторах, необходима большая дополнительная работа. Также в качестве следующей задачи выглядит перспективным использовать данные с нескольких кадров для стереоопределения расстояния до впередиидущего автомобиля.

В работе были предложены методы решения задач нахождения и оценки сигнальных зон автомобиля. Были также описаны методы программной реализации предложенных методов и приведены результаты на кадрах конкретной видеопоследовательности, снятой на дороге Российской Федерации.

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 122-04100-126-8.

Литература

1. К.И. Кий, Д.А. Анохин, А.В. Подопросветов, Программная система обработки изображений с параллельными вычислениями, // Программирование. 2020. № 6. 38-50.

2. K.I. Kiy, A new real-time method for description and generalized segmentation of color images// Pattern Recognition and Image Analysis. 2010. N. 2. P. 169-178.

3. K.I. Kiy Segmentation and detection of contrast objects and their application in robot navigation // Pattern Recognition and Image Analysis. 2015. N. 2. P. 338-346.

4. K.I. Kiy, A new real-time method of contextual image description and its application in robot navigation and intelligent control, in *Computer Vision in Control Systems-2. Innovations in Practice*, Springer, Intelligence Systems Reference Library. Vol. 75, Ch. 5. P. 109-133. 2015.

5. K.I. Kiy A new method of global image analysis and its application to understanding road scenes, // Pattern Recognition and Image Analysis. 2018, N. 3, p. 483-495

6. http://project1054516.tilda.ws/.

7. К.И. Кий, Алгоритмы компьютерного зрения для анализа сигнальных объектов в дорожной сцене, // Робототехника и техническая кибернетика, 2018, 1(18), с. 26-33.

8. Dosaev R.V., Kiy K.I. A new real-time method for finding temporary and permanent road marking // CEUR Workshop Proceedings. V. 2391. p. 86-96.

М.И. Надежин, О.В. Широбоков

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К ДИАГНОСТИКЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, mikhailn131@gmail.com

Аннотация

Рассмотрено 3 подхода к диагностике подшипников качения синхронных двигателей с постоянными магнитами низкой мощности. Подходы основаны на применении нейронных сетей различной архитектуры в качестве классификаторов технического состояния подшипников качения: сверточная нейронная сеть, рекуррентная нейронная сеть и нейросеть прямого распространения. Проведен сравнительный анализ рассмотренных подходов по критериям точности, быстродействия и требуемого объема памяти.

Ключевые слова

Диагностика, машинное обучение, электродвигатель, синхронный двигатель с постоянными магнитами.

M.I. Nadezhin, O.V. Shirobokov

COMPARATIVE ANALYSIS OF APPROACHES TO THE DIAGNOSIS OF THE ACTUATOR ELEMENTS OF ELECTROMECHANICAL SYSTEMS BY MACHINE LEARNING METHODS

Baltic State Technical University «VOENMEH», St. Petersburg, Russia, mikhailn131@gmail.com

Abstract

3 approaches to diagnostics of rolling bearings of permanent magnet synchronous motors with low-power are considered. The approaches are based on the use of neural networks of various architectures as classifiers of the technical condition of rolling bearings: convolutional neural network, recurrent neural network and feedforward neural network. A comparative analysis of the considered approaches according to the criteria of accuracy, speed and required memory is carried out.

Key words

Diagnostics, machine learning, electric drive, permanent magnet synchronous motor.

Эффективным способом увеличения срока службы электромеханических систем является диагностика их технического состояния с последующей корректировкой режимов работы и методов управления.

В настоящее время для решения прикладных инженерных задач, – например, диагностики технического состояния электромеханических систем (ЭМС), – с получением эффективного результата используют подходы, основанные на применении методов искусственного интеллекта (ИИ), в том числе методов машинного обучения (МО) и глубокого обучения (ГО).

Диагностика методами ИИ заключается в решении задачи классификации технических состояний, где каждый класс представляет собой состояние: исправное или дефектное [1]. Количество определяемых дефектных состояний может разниться в зависимости от системы диагностики и предъявляемых к ней требований.

Преимуществами такого подхода являются:

– установление зависимости между входными и выходными величинами без наличия исчерпывающей информации о диагностируемом объекте. Применительно к задаче диагностики входными

величинами являются числовые признаки, выделяемые из сигналов телеметрии, а выходными величинами являются вероятности принадлежности текущего состояния исследуемой системы к конкретному состоянию;

– высокая точность и эффективность работы.

Недостатками такого подхода являются:

– получение исходного массива данных для обучения. В случае решения задачи технической диагностики это является одной из основных проблем, т.к. готовых массивов данных, используемых для достижения поставленной цели нет в готовом виде в общедоступных ресурсах. Для получения исходных данных зачастую требуется проведение дополнительных мероприятий;

– необходимость в корректной разметке данных;

– вычислительные затраты и высокая «стоимость» обучения;

– необходимость выбора архитектуры и синтеза параметров алгоритма.

Для решения задач диагностики методами МО необходима работа с данными, которая заключается:

– в подготовке исходного набора данных;

– в предварительной обработке исходных данных: фильтрация, нормализация, нормирование, разметка;

– в выделении признаков, численно характеризующих состояние исследуемой системы;

– в удалении ненужных признаков для уменьшения размерности обучающих данных и улучшения точности работы модели классификации;

– в обучении модели классификации для решения задачи диагностики.

При использовании методов ГО шаги 3 и 4 могут быть реализованы внутри обучающего алгоритма.

Обучение моделей классификации для решения задач диагностики обычно происходит с помощью сигналов фазных токов электродвигателя и вибрационных сигналов (виброускорения, виброскорости, виброперемещения) корпуса электродвигателя. При существующей возможности в дополнение могут быть использованы сигналы фазных напряжений и температуры корпуса электродвигателя.

Существует множество подходов к диагностике ЭМС методами ИИ. Например, в работе [1] представлен пример использования рекуррентной нейронной сети (НС) совместно с автоэнкодером для анализа состояния подшипника качения, который является наиболее уязвимым элементом вращающихся электрических машин низкой мощности [2]. В работе [3] использовали глубокую сеть – автоэнкодер для выделения признаков из исходных сигналов вибрации, которые используются в качестве входа для экстремальной обучающей машины (extreme learning machine), являющейся классификатором для определения состояния подшипника качения. Авторы работы [4] использовали сверточную нейронную сеть для анализа изображений временных и спектральных сигналов вибраций с целью диагностики роликовых подшипников качения. В работе [7] диагностировали межфазные замыкания в синхронном двигателе с постоянными магнитами (СДПМ) по сигналам фазных токов и напряжений с помощью ансамбля нейронных сетей. В работе [8] диагностировали и прогнозировали состояние вращающихся электрических машин с помощью метода опорных векторов. В работе [9] диагностировали неисправности статора асинхронного двигателя, анализируя фотографии, полученные тепловизором.

Подшипники качения являются неотъемлемой частью электрических вращающихся машин и зачастую лимитируют их ресурс. При эксплуатации повреждения подшипников могут быть вызваны недостаточным поступлением смазки, изменением зазора и посадок между деталями подшипников и опорами ротора, усталостными разрушениями материала, его износом [3]. Дефекты подшипников являются причиной повышения амплитуд на характерных частотах вибрационных сигналов (чаще всего виброускорений и виброскоростей), изменения толщины разделяющей поверхности смазочной пленки, повышения температуры подшипников на 30-40%, изменение геометрии рабочих поверхностей подшипников [10].

В настоящей работе авторами рассматривались дефекты внешнего и внутреннего колец подшипника качения синхронных двигателей с постоянными магнитами мощностью 52 Вт. Характеристики

двигателя представлены в таблице 1. Подобные двигатели находят широкое применение в качестве исполнительных элементов бортовых систем: насосные агрегаты авиационной и космической техники, движители телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов и наземных мобильных роботов, приводы систем позиционирования и стабилизации и т.д.

Таблица 1 — Параметры СДПМ

Параметр	*R*, Ом	L_d, мкГн	*Lq*, мкГн	*J*, кг*м^2	λ, вб	*p*
Значение	1.1	262,5	221,5	10-5	0,00673	4

где R – активное сопротивление фаз статора, L_d, Lq – продольная и поперечная индуктивности соответственно, J – момент инерции ротора, λ – потокосцепление постоянных магнитов ротора, p – число пар полюсов ротора.

Наиболее частыми и опасными дефектами подшипников качения являются дефекты внешнего и внутреннего колец [11]. Дефекты тел качения и сепаратора встречаются крайне редко и обычно не возникают раньше дефектов колец.

Для проведения исследований была проведена разборка образцов подшипников, применяемых в составе выбранных двигателей, и бриннелирование напильником их внутренних и внешних колец. Далее выполнена серия экспериментальных исследований четырех образцов СДПМ одной серии в номинальном режиме нагрузки в следующих условиях:

– работа исправного двигателя;
– работа двигателя с подшипником качения при дефекте внешнего кольца;
– работа двигателя с подшипником качения при дефекте внутреннего кольца.

Вид стенда для проведения исследований представлен на рисунке 1.

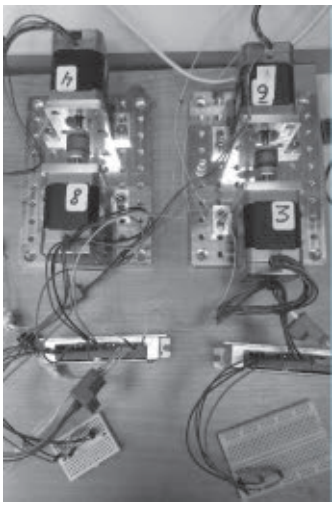


Рисунок 1 — Стендовое оборудования для проведения экспериментальных исследований

Во время работы двигателя измерялись фазные токи и виброускорения по трём осям: поперечная (*X*); вертикальная, перпендикулярная плоскости двигателя (*Y*); продольная, сонаправленная с осью вращения вала (*Z*). В работе принимаются соответственно условные обозначения измеряемых параметров: *ia, ib, ic, gx, gy, gz*.

Аппаратная часть наземной системы диагностики состоит из блока измерений электрических величин и виброускорений и анализатора спектра. Сохранение исходных массивов измерений осуществлялось через *SCADA*-систему. Дальнейшая обработка данных происходила в пакете *MATLAB* ®.

В ходе каждого исследования измерение параметров осуществлялось в течение 5 минут с частотой дискретизации 50 кГц.

Для диагностики технического состояния подшипника качения применялись 3 подхода:

- анализ годографа фазных токов сверточной НС;
- анализ временных сигналов фазных токов и вибраций рекуррентной НС;
- выделение признаков из временных и спектральных сигналов фазных токов и вибраций и их анализ НС прямого распространения.

Анализ годографа фазных токов сверточной нейронной сетью

Годограф фазных токов представляет собой зависимость $i_\beta(i_\alpha)$, где i_β, i_α – токи неподвижной системы координат [12]. Для трёхфазных электродвигателей токи i_β, i_α получают с помощью преобразования Кларк.

Для трёхфазного СДПМ при трапецеидальном распределении противо-ЭДС годограф имеет форму шестиконечной звезды. На рисунке 2 представлены формы годографов исправного двигателя (а), двигателя с дефектом внешнего кольца подшипника (б) и двигателя с дефектом внутреннего кольца подшипника (в).

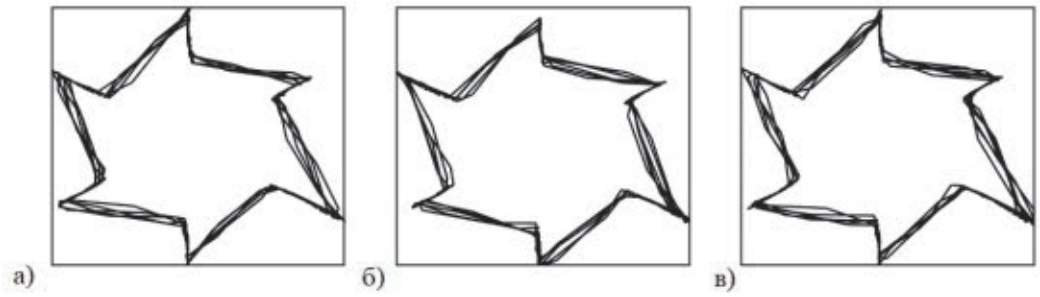


Рисунок 2 — Формы годографов для трехфазного СДПМ: а) исправного, б) с дефектом внешнего кольца подшипника, в) с дефектом внутреннего кольца подшипника

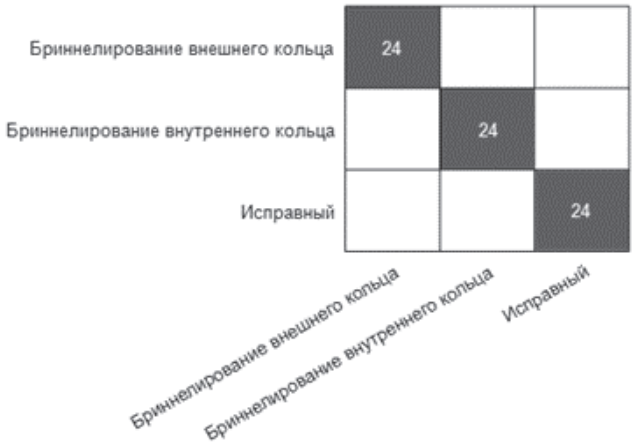


Рисунок 3 — Матрица соответствия для диагностики методом анализа годографа фазных токов

Сверточные нейронные сети являются эффективным и надежным инструментом для анализа изображений вследствие их робастности к шумам и флуктуациям исходных обучающих данных, а также возможности выделять из них информативные признаки. В настоящей работе для классификации изображений годографов использовалась сверточная НС с архитектурой:

- входной слой;
- слой свертки. Размер фильтров 2x2, количество фильтров – 8;
- слой свертки. Размер фильтров 2x2, количество фильтров – 16;
- полносвязный слой;
- слой классификации.

На рисунке 3 представлена матрица соответствия для диагностики методом анализа годографа фазных токов.

Анализ временных сигналов рекуррентной нейронной сетью

При использовании в качестве входных данных временных и спектральных сигналов классическим является применение рекуррентных НС вследствие их эффективного выделения признаков из временных сигналов. Такой подход позволяет использовать минимальную обработку исходных сигналов, т.к. обучающий алгоритм автоматически преобразует входные данные и выделяет ключевые признаки.

В настоящей работе использовались сигналы фазных токов и виброускорений корпуса двигателя (суммарно 6 сигналов) в качестве входных данных для рекуррентной НС LSTM (Long Short-Term Memory) с архитектурой:

- входной слой;
- слой LSTM. Количество скрытых юнитов – 200;
- полносвязный слой;
- слой классификации.

На рисунке 4 представлена матрица соответствия для диагностики временных сигналов с помощью рекуррентной НС.

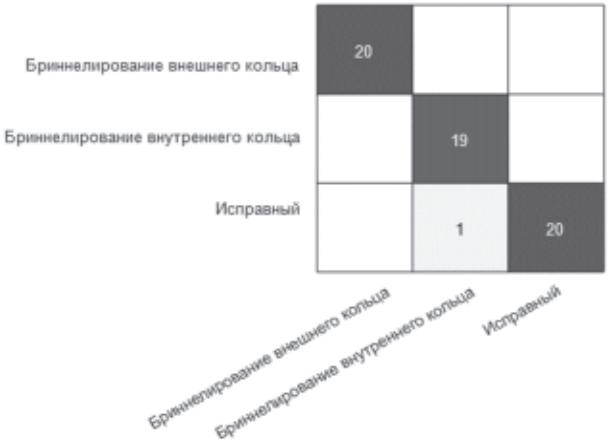


Рисунок 4 — Матрица соответствия для диагностики с помощью рекуррентной НС

Анализ сигналов нейронной сетью прямого распространения

НС прямого распространения используют в качестве обучающих данных набор признаков, который выделяется из исходной информации. Признаки представляют собой численные характеристики исходной информации (например, среднеквадратичное значение виброускорения или толщина плеча годографа).

В настоящей работе использовалась трехслойная НС прямого распространения с архитектурой:

- входной слой;
- скрытых слоя с количеством нейронов 5,10 и 5 соответственно. Функции активации – логистическая сигмоида;
- выходной слой.

Набор признаков, используемый для обучения и дальнейшей классификации:

- энтропия Шэннона ia;
- клиренс-фактор gx;
- клиренс-фактор gz;
- энергия спектра gz.

На рисунке 5 представлена матрица соответствия для диагностики с помощью НС прямого распространения.

Проведен сравнительный анализ примененных подходов к диагностике подшипников качения СДПМ. Результаты представлены в таблице 2. Под объемом памяти подразумевается объем памяти, необходимый для получения исходных диагностических данных, например, в случае анализа годографов это объем памяти, занимаемый массивами токов + объем памяти, занимаемый изображением годографа. Под весом нейросети подразумевается объем памяти, который занимает обученная НС на диске.

Рассмотрены и применены подходы для диагностики технического состояния колец подшипников качения трехфазных СДПМ на основе методов ИИ. Проведены экспериментальные исследования для получения статистических данных.

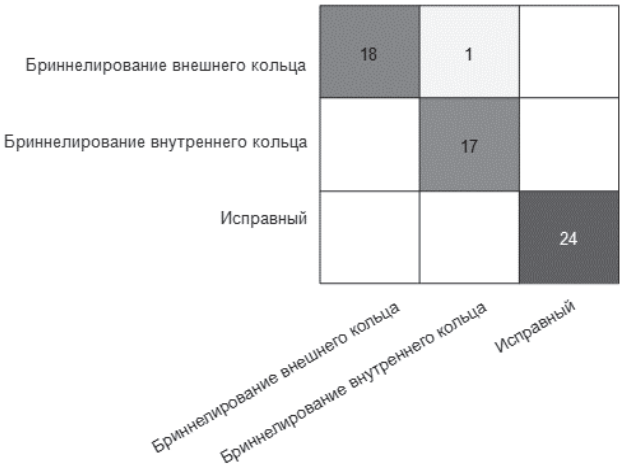


Рисунок 5 — Матрица соответствия для диагностики с помощью НС прямого распространения

Таблица 2 — Результаты диагностики

Метод	Точность, %	Время обучения, с	Время классификации, с	Объем памяти, КБайт	Вес нейросети, КБайт
Сверточная НС	100	15	0,45	59	5 136
Рекуррентная НС	98,33	20	0,2	46,875	316
НС прямого распространения	98,33	0,1295	0,0083	27,35	7

По результатам работы сделан вывод, что по критериям точности при минимальном количестве датчиков (3 датчика тока) анализ годографов фазных токов сверточной НС имеет преимущество над остальными методами. По критериям быстродействия и минимального использования объема памяти вычислительного устройства имеет преимущество НС прямого распространения. Однако для успешного применения такого подхода необходимо провести предобработку исходных сигналов и выделить информативные признаки, что зачастую требует более углубленных изысканий в сравнении с остальными подходами.

Литература

1. H. Liu, J. Zhou, Y. Zheng, W. Jiang, Y. Zhang Fault diagnosis of rolling bearings with recurrent neural network-based autoencoders // ISA Transactions. – 2018. – Т. 77. – С. 167-178

2. Матвеев С. А. и др. Обзор методов диагностики электронасосных агрегатов спутниковых платформ //Радиопромышленность. – 2020. – Т. 30. – №. 3. – С. 86-98.

3. Haidong Shao, Hongkai Jiang, Xingqiu Li, Shuaipeng Wu Intelligent fault diagnosis of rolling bearing using deep wavelet auto-encoder with extreme learning machine // Knowledge-Based Systems. – 2018. – Т. 140. – С. 1-14

4. Chen Lu, Zhenya Wang, Bo Zhou Intelligent fault diagnosis of rolling bearing using hierarchical convolutional network based health state classification // Advanced Engineering Informatics. – 2017. – Т. 32. – С. 139-151

5. Mashayekhi V., Hasani Borzadaran S., Hoseintabar Marzebali M. Classification of Fault Severity in Induction Machine Systems Based on Temporal Convolutions and Recurrent Networks //International Transactions on Electrical Energy Systems. – 2022.

6. B. Yoshua, L. Pascal, P. Dan, L. Hugo, Greedy layer-wise training of deep networks. In: Editor edito. Advances in Neural Information Processing Systems 19 (NIPS'06)// Pub Place, 2007.

7. Zhifu Wang, Jingzhe Yang, Chuang Cao, Zhongli Gu Phase-phase short fault analysis of permanent magnet synchronous motor in electric vehicles // Energy Procedia. – 2016. – Т. 88. – С 915 – 920

8. Galar D. et al. Remaining useful life estimation using time trajectory tracking and support vector machines //Journal of physics: Conference series. – IOP Publishing, 2012. – Т. 364. – №. 1. – С. 012063.

9. Glowacz A., Glowacz Z. Diagnostics of stator faults of the single-phase induction motor using thermal images, MoASoS and selected classifiers //Measurement. – 2016. – Т. 93. – С. 86-93.

10.Носов В. В. Диагностика машин и оборудования: Учебное пособие. 2-е изд. испр. и доп //СПб: Изд-во «Лань». – 2012.

11.Lessmeier C. et al. Condition monitoring of bearing damage in electromechanical drive systems by using motor current signals of electric motors: A benchmark data set for data-driven classification //PHM Society European Conference. – 2016. – Т. 3. – №. 1.

12.Коротков Е. Б. и др. Наземная система комплексной диагностики электромеханических устройств космических аппаратов //Радиопромышленность. – 2019. – №. 4. – С. 54-62.

А.И. Калинин

ОБУЧЕНИЕ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ В МОБИЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИКЕ

ЦИТМ «Экспонента», Москва, alexey.kalinin@exponenta.ru

Аннотация

Задача навигации, рассматриваемая в данной работе имеет множество вариантов решения таких как: планирование и дальнейшая корректировка маршрута, методами классического машинного обучения и глубокого обучения. В последнее время, во многом благодаря работам компании DeepMind [1, 2, 3] набирают популярность методы глубокого обучения с подкреплением. В контексте данных алгоритмов задача навигации рассматривается как последовательный процесс принятия решений о действии робота на основании наблюдений получаемых с датчиков. Преимуществом таких алгоритмов является отсутствие затрат на сбор данных и возможность решать сложные задачи с большим числом сценариев, слабо поддающихся строгой классификации и алгоритмическому описанию. Для полной постановки задачи обучения с подкреплением необходимо зафиксировать функцию награды, подбор которой является важным этапом, поскольку алгоритм обучается максимизировать именно ее значение, и ее специфичность к задаче играет одну из решающих ролей в успехе обучения алгоритма.

Ключевые слова

Обучение с подкреплением, навигация, мобильная робототехника, машинное обучение, глубокое обучение.

A.I. Kalinin

REINFORCEMENT LEARNING IN MOBILE ROBOTICS

ETMC «Exponenta», Moscow, Russia, alexey.kalinin@exponenta.ru

Abstract

The navigation problem considered in this paper has many options for solving such as planning and further route adjustment using classical machine learning and deep learning methods. Recently, thanks in large part to the work of DeepMind [1, 2, 3], deep reinforcement learning methods are gaining popularity. In the context of these algorithms, the task of navigation is considered as a sequential process of making decisions about the action of the robot based on observations received from sensors. The advantage of such algorithms is the absence of data collection costs and the ability to solve complex problems with a large number of scenarios that are poorly amenable to strict classification and algorithmic description. For a complete formulation of the reinforcement learning problem, it is necessary to fix the reward function, the selection of which is an important step, since the algorithm learns to maximize its value, and it is its specificity to the task that plays one of the decisive roles in the success of the algorithm learning.

Key words

Reinforcement learning, navigation, mobile robotics, machine learning, deep learning.

Обучение с подкреплением позволяет мобильным роботам автоматически обучаться сложным навыкам посредством взаимодействия со средой. В настоящее время глубокое обучение с подкреплением (DRL) показывает многообещающий потенциал в управлении мобильными роботами для навигации. Обычные методы навигации роботов, такие как одновременная локализация и сопоставление (SLAM), навигация путем определения положения и отображения. По сравнению по сравнению с традиционными методами, методы на основе DRL работают по принципу «от конца к концу», позволяя обойти трудоемкий этап извлечения признаков. С помощью DRL роботы могут ориентироваться,

но с меньшим количеством датчиков. Как правило, говорят, что робот способен к самостоятельной навигация, если он может достичь указанной цели, избегая препятствия. Таким образом можно выделить две подзадачи: достижение цели и избежание препятствий. В данной работе будут рассмотрены различные подходы к решению задачи навигации: решение комбинированной задачи и ее декомпозиция. А также рассмотрены различные алгоритмы обучения с подкреплением для решения задачи навигации.

Постановка задачи

В контексте обучения с подкреплением задача навигации робота представляется как последовательный процесс принятия агентом, в данном случае роботом, решений для достижения цели избегая препятствий. Подчиняясь политике π и получая входные наблюдения obs_t, робот совершает действие a_t. Наблюдения представляют собой вектор состоящий из расстояния до цели d_t, угла поворота робота на цель φ_t и скана лидарного датчика s_t. После принятия роботом действия он получает награду и новое наблюдение obs_{t+1}. Тогда задача сводиться к нахождения политики π, при которой суммарная награда $G_t = \sum_{\tau=t}^{T} \gamma^{T-\tau} r_t$ максимальна. Где T-суммарное время эпизода, γ– коэффициент дисконтирования, определяющий текущую стоимость будущей награды.

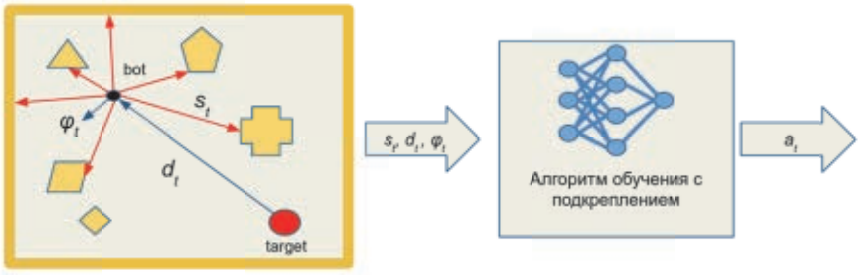


Рисунок 1 — Общая схема задачи навигации

Для окончательной постановки задачи так же необходимо определить пространства возможных действий робота и наблюдений. В нашей работе пространство действий дискретно и представлено в таблице 1. Частота принятия дейтсвий составляет 5 Гц.

Таблица 1 — Возможные действия

Действие	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
Угловая скорость, рад/с	0.0	0.2	-0.2	0.3	-0.3
Линейная скорость м/с	0.4	0.2	0.2	0.1	0.1

Действия соответствуют движению прямо, поворотам вправо и влево и резким поворотам вправо и влево. Пространство наблюдений представлено в таблице 2.

Таблица 2 — Возможные действия

	Размерность	Min	Max
Скан лидар, м	108	0.15	3.5
Расстояние до цели, м	1	0	10
Угол доворота на цель, рад	1	0	2π

Методы

Глубокое Q-обучение (DQN)

Q-функция политики πизмеряет ожидаемую награду от состояния при принятии действия a и дальнейшего следования политике. Таким образом выражение для Q-функции имеет вид:

$$Q^{\pi}(s,a) = E_{\pi}[G_t s = s_t, a = a_t] \quad (1)$$

Соответственно максимизация значения этой функции будет приводить к оптимальному решению. Для итеративного ее обновления применяется уравнение Беллмана, представляющее собой замену максимума суммы на сумму максимума.

$$Q_{opt}(s,a) = E[r + \gamma * max_{a'} Q(s',a')] \quad (2)$$

Таким образом, правило для обновления значений Q-функции выглядит следующим образом:

$$Q_{i+1} \leftarrow Q(s,a) + \alpha * E[r + \gamma * max_{a'} Q(s',a')] \quad (3)$$

где α шаг оптимизации. В таком виде Q-обучение применимо только для дискретного пространства состояний. В непрерывном случае значение Q-функции приближается нейронной сетью. В таком случае Q-функция принимает зависимость от набора парметров θ. Для обучения этой глубокой сети необходим буффер воспроизведения B, содержащий в себе наборы (s,a,s'). На каждом шаге обучения алгоритм получает выборку из буффера и используя уравнение Беллмана обновляет веса сети θ,используя функцию потерь следующего вида.

$$L(\theta) = \frac{1}{N} * \sum \quad \left(Q(s,a) - Q_{target}(s,a)\right)^2 \quad (4)$$

где $Q_{target}(s,a)$ есть целевое значение Q-функции получаемое на предыдущих шагах обновления.

Алгоритм актора-критика с преимуществом (англ. Advantage Actor Critic, A2C)

Алгоритм A2C представляет собой комбинацию value-based и policy-based подходов. Value-based методы аналогичны алгоритму DQN, то есть алгоритму необходимо правильно предсказывать значение Q-функции или Value-функции для каждого состояния. В случае же с policy-based методами алгоритм оптимизирует веса сети на основе следующего выражения

$$\nabla_{\theta} J(\theta) \leftarrow \sum_{i=1}^{N} \quad \left(\sum_{\tau=1}^{T=1} \quad \nabla\theta log\pi_{\theta}\left(a_t^i, s_t^i\right)\right)\left(\sum_{t=1}^{T_i} \quad r\left(s_t^i, a_t^i\right)\right) \quad (5)$$

Общая схема алгоритма A2C на рисунке 2. Алгоритм состоит из двух частей, одна предсказывает действие, а другая предсказывает для него значение функции полезности.

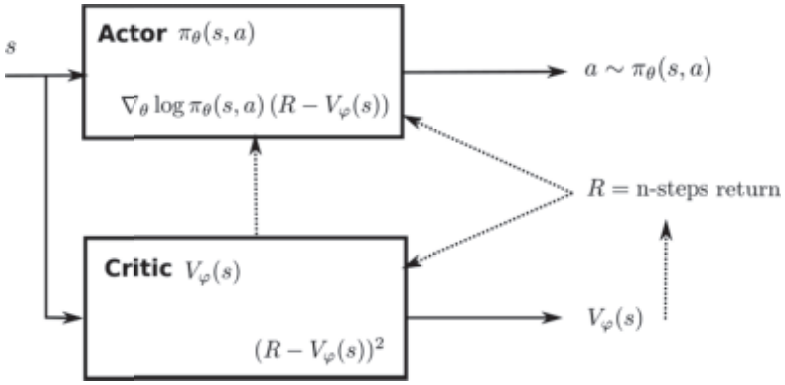


Рисунок 2 — Общая схема алгоритма A2C

Каждая из частей оптимизируется по своему правилу, использует приближение для градиента по формуле (5), Critic о формуле (4).

Экспериментальное окружение

При проведении численных экспериментов использовалась виртуальная среда Gazebo[5], симулирующая модель робота и его датчики. Алгоритмы обучались с использованием видеокарты Nvidia GTX 3090. Взаимодействие с моделью робота строилось при помощь ROS Noetic.

Реализация и результаты

DQN

Был реализован прямой алгоритм DQN на комбинированных данных о местоположении и с лидара. Общая схема алгоритма представлена на рисунке 3. Значение Q-функции аппроксимировалось при помощи нейронной сети с двумя входами: лидарные данные обрабатывались при помощи одномерных сверточных слоев, данные о местоположении при помощи линейного слоя.

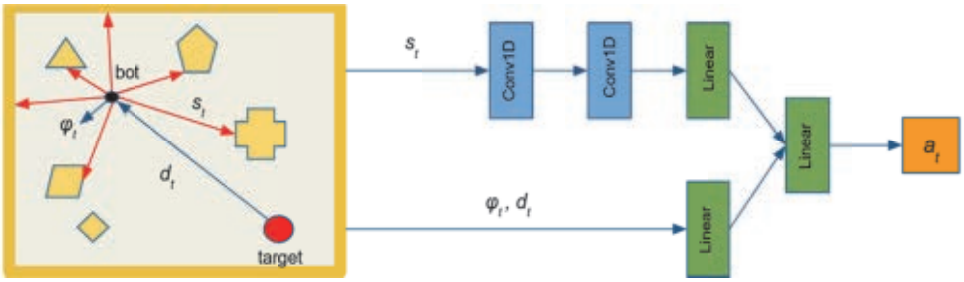


Рисунок 3 — Архитектура алгоритма DQN на смешанных данных

В качестве функции награды использовалась функция вида:

$$\begin{cases} R_{reached} & d_t < c_{reach} \\ R_{crashed} & crashed \\ (d_{t-1} - d_t) * c - p & else \end{cases} \quad (6)$$

В ходе обучения алгоритма использовалась -жадная политика исследования среды. Так же применились техники double Q-learning. Обучение длилось примерно 2000 эпизодов. В ходе экспериментов были опробованы различные комбинации параметров обучения, к сожалению не показавшие удовлетворительного результата. На рисунке 4 представлены кривая обучения. За 2000 эпизодов средняя функция награды не показала значительного прироста. Такое поведение может быть обусловлено как неспецифичностью функции награды к решаемой задаче, так как в ее формулировке отсутствует награда за нестолкновение, так и сильной зашумленность комбинированного вектора наблюдений, состоящего из данных о местоположении и скана лидара.

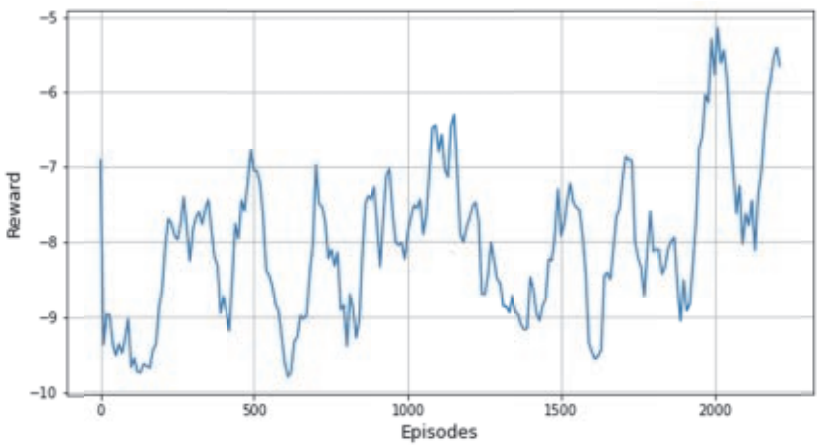


Рисунок 4 — Кривая обучения алгоритма DQN

A2C

Алгоритмы семейства Actor-Critic лучше справляются с различными задачами в тестовых бенчмарках [3]. Для поставленной задачи был применен алгоритм A2C, архитектура которого представлена на рисунке 5.

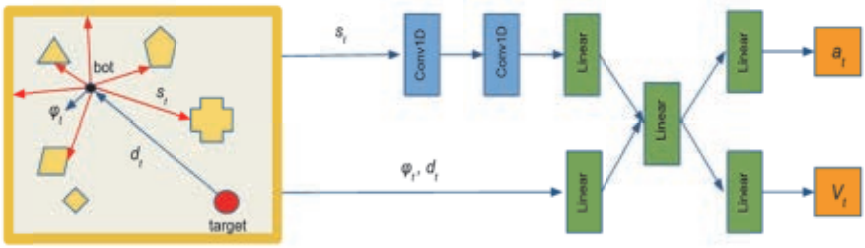


Рисунок 5 — Архитектура алгоритма A2C на смешанных данных

Результаты обучения так же как алгоритм DQN не привели к положительному результату (рис. 6), по возможно тем же причинам, что и DQN на комбинированных данных.

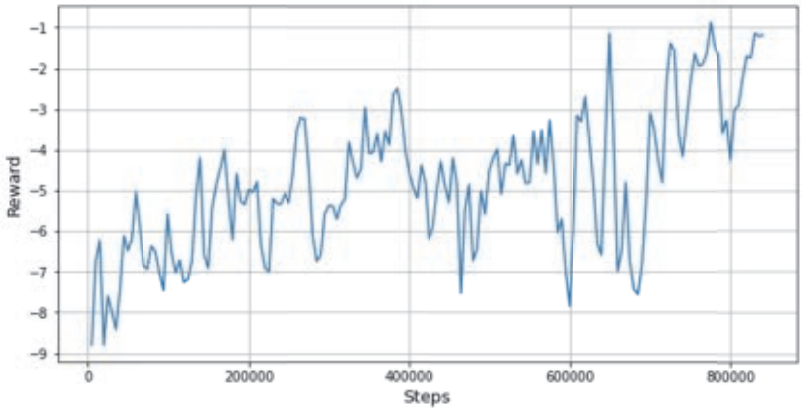


Рисунок 6 — Кривая обучения алгоритма A2C на смешанных данных

Как видно на графике награда за время обучения выросла, но при этом обучения не было стабильно, о чем свидетельствуют существенные осцилляции, даже при применении бегущего среднего с шириной окна в 100 точек.

Разделение задачи навигации

Для стабилизации сходимости алгоритмов была применена техника разделения задачи навигации на две подзадачи: избежание препятствий и достижение цели. Для задачи достижения цели симулировалась среда без препятствий, для избежания препятствий среда с большим числом стен и столбов (рис. 7).

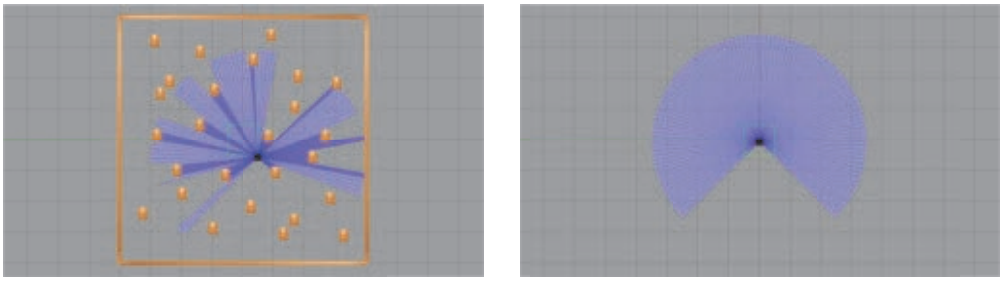


Рисунок 7 — Среды для обучения отдельных алгоритмов

Задача достижения цели

Для решения задачи навигации применялся алгоритм DQN. Входными данными для алгоритма являлись дистанция до цели и угол поворота на цель. Функция награды в данной задаче задавалась следующим выражением:

$$\begin{cases} R_{reach} & d_t < c_{reach} \\ (d_{t-1} - d_t) * c - p & else \end{cases} \quad (7)$$

Значения где *d*–расстояние до цели, p=0.01 имеет смысл штрафа за длительное движение, R_{reach}– большая положительная константа, терминальная награда за удачное завершение эпизода. Максимальное число шагов в симуляции устанавливалось 250.Архитектура алгоритма значительно упростилась, сохранив лишь два линейных слоя (рис. 8).

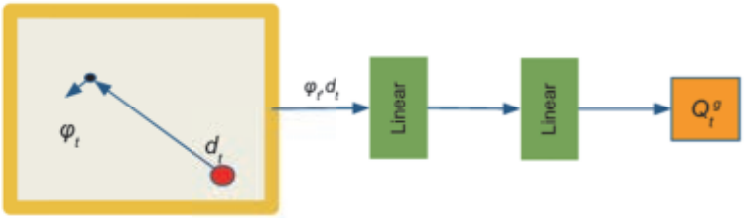


Рисунок 8 — Архитектура алгоритма DQN для достижения цели

Результаты обучения алгоритма достижения цели представлены на рисунке 9. Алгоритм сошелся к решению примерно за 5000 эпизодов, в конце достигал цели в пустом пространстве во всех случаях.

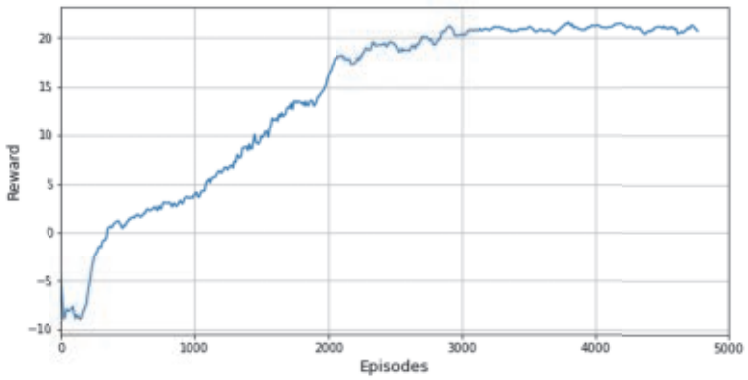


Рисунок 9 — Кривая обучения алгоритма DQN для достижения цели

Задача избежания препятствий

Для решения задачи избежания препятствий так же применялся алгоритм DQN. Входными данными для данного алгоритма являются данные с лидарного датчика. Функция награды имеет вид:

$$\begin{cases} R_{crash} & crashed \\ v * cos(w) - p & else \end{cases} \quad (8)$$

Здесь *v* линейная скорость робота, ω угловая скорость. Таким образом, робот получает меньшую награду за низкую скорость и большую угловую скорость. И так же штрафуется за время. Архитектура алгоритма представлена на рисунке 10. Данные с лидарного датчика обрабатывались как и ранее при помощи одномерных сверточных слоев.

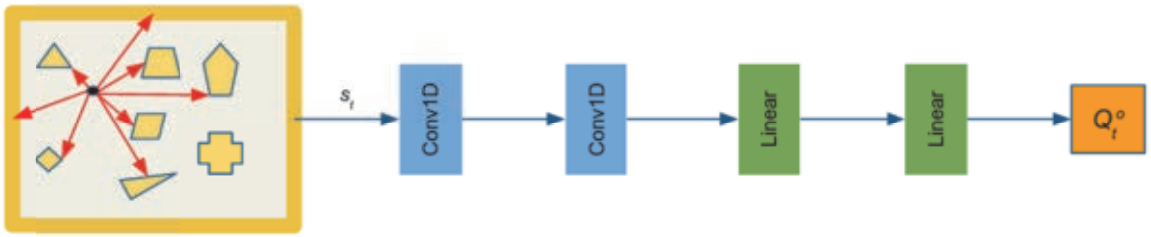


Рисунок 10 — Архитектура алгоритма DQN для избежания препятствий

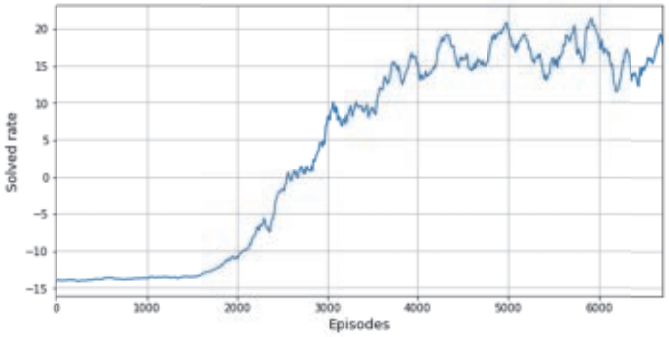


Рисунок 11 — Схема совмещения алгоритмов

Результаты обучения алгоритма избежания препятствий приведены на рисунке 11. Алгоритм сошелся к решению за 6000 эпизодов. Максимальная длительность эпизода была установлена в 500 шагов.

Совмещение двух алгоритмов

Для совмещения двух алгоритмов была применена схема представленная на рисунке 12. Каждый из алгоритмов получал на вход данные, после чего делал свое предсказание для Q-функции.

Алгоритм достижения цели предсказывал $Q_g(s_t, a_t)$, алгоритм избежания препятствий $Q_o(s_t, a_t)$.Значение $Q_g(s_t, a_t)$ свидетельствовало о полезности с точки зрения достижения достижения цели, $Q_o(s_t, a_t)$с точки зрения опасности столкновения с препятствиями. Для принятия итогового решения значения этих функций взвешенно складываются по формуле:

$$Q_N(s_t, a_t) = Q_g(s_t, a_t) + \lambda * Q_o(s_t, a_t) \quad (9)$$

формируя значение итоговой функции $Q_N(s_t, a_t)$, затем действие выбирается как действие с наибольшей полезностью в текущем состоянии.

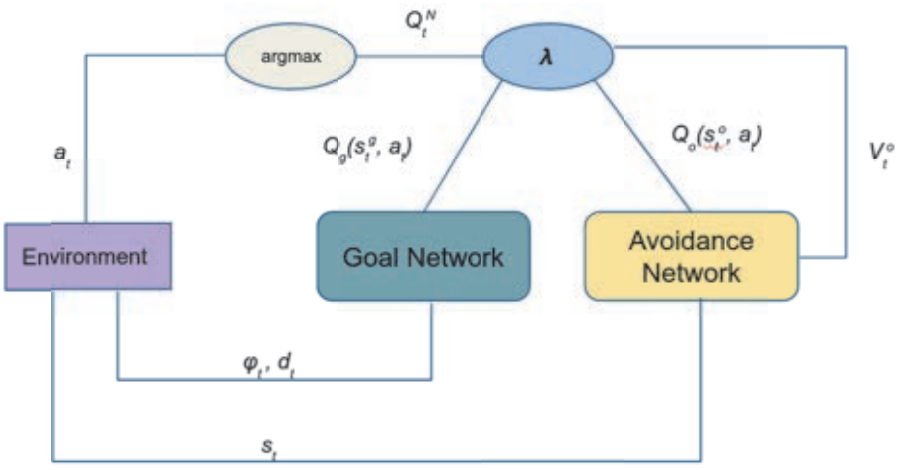


Рисунок 12 — Схема совмещения алгоритмов

Важной частью данного алгоритма является способ для расчета коэффициента λ, Поскольку именно от него зависит в как в конкретном состоянии будет вести себя робот. В нашем случае значение λ задавалось выражением:

$$\lambda = \begin{cases} 0 & d_t < D_g \\ e^{-(V_o(s_t)-c)*k} & else \end{cases} \quad (10)$$

где $V_o(s_t)$есть функция полезности состояния, предсказанная алгоритмом избежания препятствий. Соответственно чем полезнее это состояния, тем больше алгоритм сосредотачивается на достижении цели и λ убывает, и наоборот. Так же если расстояние до цели меньше заданного порога D_g= 1 м, то робот концентрируется только на достижении цели.

Результаты работы итогового алгоритма

В результате был получен алгоритм, способный решить задачу навигации. На тестовой карте алгоритм решал задачу движение к выбранной точке в 81% случаев.

Важным в работе алгоритма были параметры функции λ**,** а именно константы cи k, отвечающие за пороговое значение функции полезности и чувствительность алгоритма к препятствиям (рис 13, 14). Так при малом значении c алгоритм меньше обращал внимание на препятствия и двигался к цели более короткими маршрутами. Аналогично и для значения k, при уменьшении k, показатель экспоненты растет медленнее, что уменьшает вклад алгоритма избежания препятствий в итоговое решение.

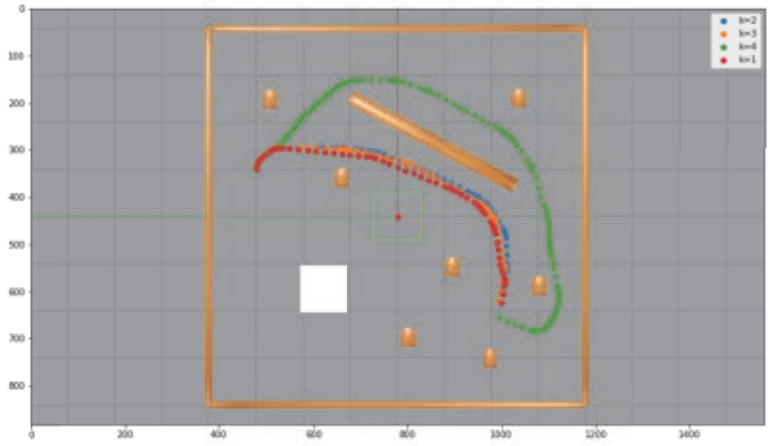


Рисунок 13 — Зависимость маршрута от параметра k

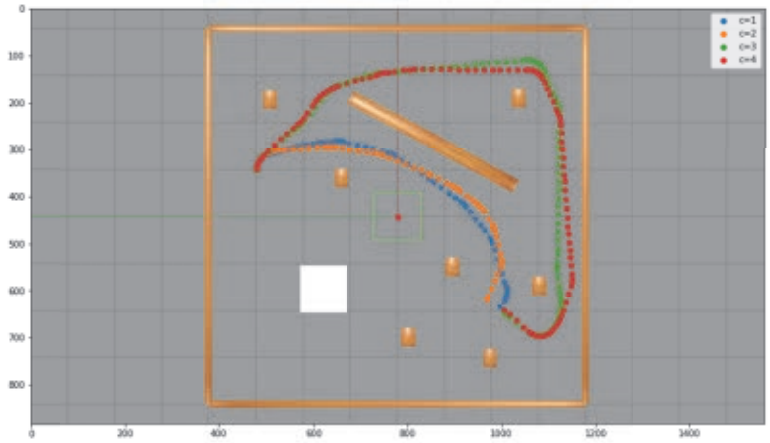


Рисунок 14 — Зависимость маршрута от параметраc

Заключение

Были протестированы различные подходы обучения с подкреплением к задаче навигации робота. Результатом стал алгоритм навигации, основанный на совмещении двух алгоритмов: достижения цели и избежания препятствий. Обучение алгоритмов задаче навигации напрямую не дает положительных результатов, по нескольким причинам:

– функция награды менее не достаточно соответствует задаче навигации, поскольку в ней отсутствует награды за нестолкновение;

– объединение данных о местоположении робота и скана лидара имеет более сложную и зашумленную структуру, что ухудшает сходимость алгоритмов.

Таким образом, можно сделать вывод, что для решения задачи навигации, ее разделение на подзадачи может дать существенно более качественные результаты.

Итоговый алгоритм так же не зависит от карты, на которой он обучался. Таким образом, данный алгоритм может быть легко использован в неизвестных ранее условиях, с учетом предварительно решенной задачи локализации, что дает возможность прямого использования, без дополнительного обучения, на реальном роботе. Так же данный подход дает возможность добавлять новые условия в заддчу например, следование дорожным знакам.

Литература

1. Mnih V. et al. Playing atari with deep reinforcement learning //arXiv preprint arXiv:1312.5602. – 2013.

2. Mnih V. et al. Human-level control through deep reinforcement learning //nature. – 2015. – Т. 518. – №. 7540. – С. 529-533.

3. https://arxiv.org/abs/1602.01783

4. https://arxiv.org/abs/1509.02971

5. N. Koenig and A. Howard, «Design and use paradigms for Gazebo, an open-source multi-robot simulator,» 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (IEEE Cat. No.04CH37566), 2004, pp. 2149-2154 vol.3, doi: 10.1109/IROS.2004.138972.

В.В. Варлашин

АЛГОРИТМ УСТРАНЕНИЯ ИСКАЖЕНИЙ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ, ПОЛУЧЕННЫХ С ВИДЕОКАМЕР СО СВЕРХШИРОКОУГОЛЬНЫМИ ОБЪЕКТИВАМИ

ФГАОУ ВО СПбПУ Петра Великого, Санкт-Петербург, botanic-8@yandex.ru

Аннотация

Рассмотрены вопросы применения камер со сверхширокоугольными объективами в системах технического зрения. Предложен алгоритм ректификации изображений в областях сильных искажений, вносимых оптическими системами камер. Для проведения исследований использована виртуальная модель, включающая в себя 3D-CAD модели среды и камеры. Для реализации модели выбрана кроссплатформенная интегрированная среда разработки «Unity». Для работы с изображениями использованы библиотека алгоритмов компьютерного зрения OpenCV и набор инструментов Computer Vision Toolbox из пакета MATLAB. Исследована погрешность ректификации изображения в зависимости от направления устранения искажений. Предложена методика оценки качества устранения искажений с использованием графического примитива в виде прямоугольника с нанесенной на его поверхность текстурой, располагаемый в поле зрения камеры, перпендикулярно ее оптической оси.

Ключевые слова

Техническое зрение, сверхширокоугольный объектив, дисторсия, модель камеры.

V.V. Varlashin

AN ALGORITHM FOR CORRECTING DISTORTION IN IMAGES OBTAINED WITH FISHEYE LENS CAMERA

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU), St. Petersburg, Russia, botanic-8@yandex.ru

Abstract

The issues of using cameras with fisheye lenses in computer vision systems are considered. An image rectification algorithm is proposed. The proposed rectification algorithm applicable for distortion correction of most distorted parts on the images. A virtual model for research was implemented in the cross-platform integrated development environment «Unity». A virtual model includes 3D-CAD models of the environment and camera. The library of computer vision algorithms OpenCV and the Computer Vision Toolbox from the MATLAB software package were used for image processing. The error of elimination of distortions depending on the direction of elimination is investigated. A technique for assessing the quality of distortion elimination using a graphic primitive in the form of a rectangle with a texture applied to its surface, located in the camera's field of view, perpendicular to its optical axis, is proposed.

Key words

Computer vision, fisheye lens, distortion, camera model.

Использование сверхширокоугольных объективов в системах технического зрения находит все большее применение в различных сферах. Существующие алгоритмы обработки изображений чаще всего невозможно применить к изображениям, полученным со сверхширокоугольных камер ввиду особенностей их оптических систем. В процессе проецирования окружающего пространства на матрицу камеры возникают различного рода аберрации – погрешности в изображении, вызываемые отклонением луча света от направления, аналогичного в идеальной оптической системе. Аберрации делятся на монохроматические и хроматические. Наибольшие трудности вызывает монохроматическая аберрация типа дисторсия, при которой нарушается геометрическое подобие между объектом и его изображением

на матрице камеры. Выделяют два типа искажений: подушкообразное (англ. pincushion), при котором дисторсия считается положительной, поскольку коэффициент линейного увеличения возрастает по мере удаления отображаемых предметов от оптической оси, и бочкообразное (англ. barrel), при котором коэффициент уменьшается по мере удаления отображаемых предметов от оптической оси. Сверхширокоугольные объективы (англ. fisheye, «рыбий глаз»), применяемые в камерах, позволяют получить угловое поле зрения 180º и более, вплоть до 250º [1] имеют бочкообразное искажения, при этом возможны различные варианты формирования изображения на матрице объектива (рис. 1): циркулярный (при котором угловое поле зрения камеры составляет 180º и более во всех направлениях от оптической оси), диагональный (полнокадровый, при этом поле зрения 180º и более достигается только в направлении диагонали формируемого изображения) и обрезанный круг (угол поле зрения 180º и более достигается в горизонтальном направлении и по диагонали).

Рисунок 1 — Варианты заполнения кадрового окна камеры с соотношением сторон формируемого изображения 16:9. Слева направо: циркулярный, диагональный и обрезанный круг

Математическая модель системы «матрица-объектив»

Для преобразования изображения, полученного со сверхширокоугольной камеры, к ортоскопическому виду необходимо выполнить ректификацию – устранение искажений (англ. undistortion, dewarping). Для правильного устранения искажений необходимо иметь информацию о том, как отклоняются лучи от оптической оси в зависимости от угла направления между оптической осью и лучом, при этом выполнять моделирование хода лучей в оптической системе камеры является нецелесообразным по ряду причин:

– отсутствие информации об устройстве объектива (производители объективов оперируют такими параметрами, как фокусное расстояние, апертура, угол обзора в зависимости от размеров матрицы, диаметр проекционного пятна на матрице);

– большая вычислительная сложность.

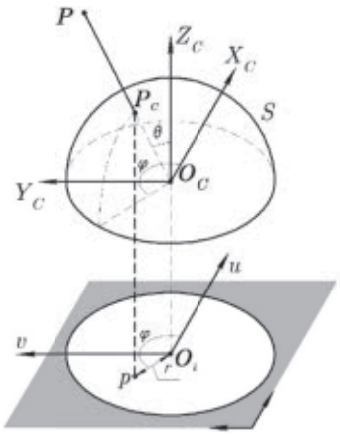


Рисунок 2 — Обобщенная схема проецирования точки трехмерного пространства в точку на матрице камеры

При обработке изображений прибегают к аппроксимационным математическим моделям, называемым моделями камер, которые описывают систему «матрица-объектив» как единое целое. Здесь и далее под моделью камеры будем подразумевать модель системы «матрица-объектив». Чаще всего такие аппроксимации используют модель сферы для описания направления на объект в трехмерном пространстве. На рисунке 2 представлена обобщенная схема проецирования изображения через объектив на матрицу камеры.

Модель камеры – это функция, описывающая преобразование из точки трёхмерного пространства в области зрения камеры $P = [x_c, y_c, z_c]^T$ в точку на плоскости изображения $p = [u, v]^T$. Единичная полусфера S с центром в точке O_C описывает поле зрения объектива. На ней также лежит точка P_C, являющаяся результатом прямой и обратной проекций. Угол θ является углом падения для рассматриваемой точки, а угол ϕ откладывается между положительным направлением оси x и O_{ip}. Модели камер включают в себя описания нескольких типов искажений, накладываемых системой линз, но в сверхширокоугольных объективах самыми существенными являются радиальные искажения, проявляющиеся сильнее ближе к краям изображения. Существует различные модели, аппроксимирующих искажения сверхширокоугольных объективов, которые можно разделить на две группы:

– идеальные модели камер, такие как стереографическая, эквидистантная, азимутальная и ортографическая [2];

– модели, учитывающие искажения, вносимые оптической системой, в виде полиномов. Ими являются: модель Канналы и Брандта [3], модель Мея [4], модель Скарамуццы [5] и модель двух сфер [6].

В дальнейшем в работе применяется модель Скарамуццы [5] как наиболее распространенная.

Виртуальная модель

Виртуальные модели среды и камеры разработаны с использованием кроссплатформенной интегрированной среды разработки (англ. IDE) Unity, предназначенной для создания компьютерных игр. Виртуальная сцена реализована с использованием встроенных примитивов Unity, импортированных файлов моделей различных форматов, библиотек моделей и текстур, повторяющих различные реальные объекты. Встроенная в Unity математическая модель камеры соответствует перспективной (ортоскопической) проекции и не может применяться для решения задачи, поэтому для моделирования камер со сверхширокоугольными объективами использовано расширение Dome Tools [7] **Ошибка! Источник ссылки не найден.**из Unity Asset Store. Для виртуальной камеры доступны настройки угла зрения, виньетирования по краям изображения, а также параметры визуализации, влияющие на детализацию выходного изображения. Математическая модель камеры соответствует идеальной стереографической проекции, описываемой формулой (1).

$$r = R \cdot tan\frac{\theta}{2}, \quad (1)$$

где r – расстояние от центра проекции, R – радиус сферы, θ – полярный угол.

Рисунок 3 — Внешний вид виртуальной сцены в Unity

Внешний вид виртуальной сцены в Unity представлен на рисунке 3. Сцена содержит камеру со сверхширокоугольным объективом в соответствии с моделью (1), подвижный калибровочный шаблон типа «шахматная доска», а также целевой объект в виде прямоугольника с нанесенной текстурой, предназначенный для проведения виртуальных экспериментов и оценки погрешности устранения искажений.

Алгоритм устранения искажений

Реальные камеры с со сверхширокоугольными объективами никогда не соответствуют идеальным моделям камер, поэтому применяются модели камер, аппроксимирующие радиальные и тангенциальные искажения объективов полиномами. Выбранная модель Скарамуццы [5] связывает точки на изображении с соответствующей точкой в пространстве в системе координат камеры по формуле (2):

$$\begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} U \\ V \\ a_0 + a_2 r^2 + a_3 r^3 + a_4 r^4 \end{pmatrix} \quad (2)$$

где $a_0 ... a_4$ – коэффициенты, описывающие внутренние параметры камеры, λ – масштабный коэффициент, $r = \sqrt{U^2 + V^2}$ – расстояние от оптического центра изображения до пикселя с координатами *(U, V)*.

Существующие библиотеки компьютерного зрения имеют встроенные функции для калибровки камер и устранения искажений сверхширокоугольных объективов. В OpenCV калибровка осуществляется с использованием методов из пространства имен *cv::fisheye*, в пакете MATLAB – с использованием набора инструментов Computer Vision Toolbox. Оба подхода к калибровке позволяют получить оценку внутренних параметров в соответствии с моделью Скарамуццы, а также выполнить операцию устранения искажений, однако имеют ограничение, связанное с тем, что искажения устраняются только в центральной части изображения, тогда как для некоторых задач [8, 9] необходимо осуществить преобразование в боковой части изображения.

В работе [2] описан способ устранения искажений, применимый для идеальных моделей камер. По аналогии с ним для реализации описанной системы стереозрения разработан собственный алгоритм преобразования кадров (устранения искажений, далее – алгоритм).

Для получения ортоскопического изображения из сверхширокоугольного необходимо найти соответствия между пикселями исходного изображения и выходного изображения. Схема принципа представлена на рисунке 4.

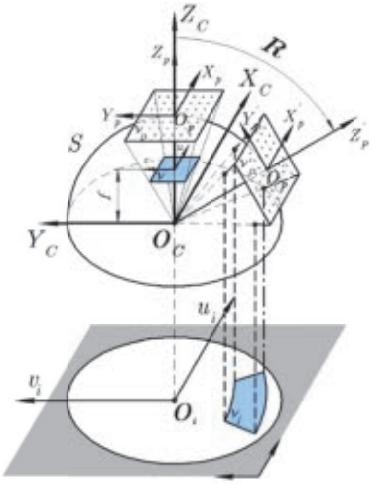


Рисунок 4 — Схема принципа устранения искажений

Выходное изображение, получаемое в результате преобразования, интерпретируется как полученное с некоторой «виртуальной» камеры-обскуры, для которой справедливы соотношения ортоскопи-

ческого изображения. Пользователь заранее задает параметры «виртуальной» камеры, такие как разрешение и углы обзора по горизонтали и по вертикали.

На первом этапе преобразования каждому пикселу «виртуальной» камеры ставится в соответствие пространственная точка в системе координат сверхширокоугольный камеры

$$(x_c, y_c, z_c)^T = z_c \left(\frac{u}{f}, \frac{v}{f}, 1\right)^T$$

где $[x_c, y_c, z_c]^T$ – точка в пространстве в системе координат исходной камеры, u и v – пиксельные координаты выходного изображения, f – фокусное расстояние выходного изображения.

На втором этапе преобразования координаты точек областей v_p и v'_p связываются преобразованием поворота R, которое в общем случае может быть задано углами Эйлера. Преобразование поворота задает ориентацию «виртуальной» камеры в пространстве относительно оптического центра исходной камеры.

$$(X_c, Y_c, Z_c)^T = R \cdot [x_c, y_c, z_c]^T$$

На третьем этапе преобразования каждой точке области v'_p с использованием обратной проекции в соответствии с моделью [5] ставится в соответствие точка область v_i исходного изображения в соответствии с формулой (2). Ход лучей в модели Скарамуцци считается центрально-симметричным, поэтому искажения зависят от удаления от центра изображения. На рисунке 5 представлена схема преобразования, кривая линия задается формулой $f(p) = a_0 + a_2 p^2 + a_3 p^3 + a_4 p^4$ с коэффициентами $a_0 ... a_4$, определенными в результате выполнения калибровки камеры. Решая систему уравнений, необходимо определить неизвестные (U, V, λ).

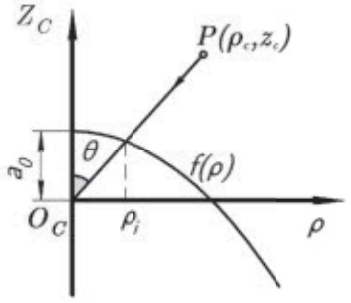


Рисунок 5 — Схема обратной проекции для модели Скарамуцци

Для ускорения дальнейших расчетов результат выполнения действий заносится в таблицу соответствия (англ. LUT, Look-up table) пиксельных координат выходного изображения исходному, а вычисление цветов в каждом пикселе осуществляется с помощью билинейной интерполяции.

Оценка погрешности устранения искажений

Изображение, захватываемое со сверхширокоугольной камеры, реализованной в модели, соответствует циркулярному варианту заполнения кадрового окна камеры, с углами обзора 180º по всем направлениям. Исходное изображение имеет разрешение 1920x1080 пикселов (эффективная область 1080x1080 пикселов). «Виртуальная» камера имеет угловое поле зрения 90º по вертикали и по горизонтали, а область, охватываемая на исходном изображении, составляет порядка 290000 пикселов, что аналогично изображению с разрешением 540x540 пикселов, поэтому «виртуальная» камера имеет аналогичное разрешение.

Калибровка камеры осуществляется в наборе инструментов Computer Vision Toolbox из пакета MATLAB по методу [10] по набору изображений с паттерном типа «шахматная доска» (рис. 6). В результате калибровки выполняется оценка параметров $a_0 ... a_4$, указанные в (2).

Алгоритм устранения искажений реализован с использованием функций библиотеки алгоритмов компьютерного зрения OpenCV. Алгоритм реализован в виде динамической библиотеки dll, подключаемой к виртуальной модели в Unity.

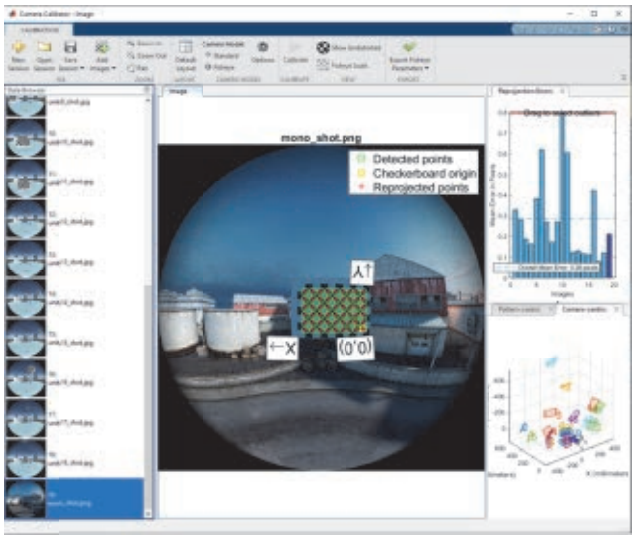


Рисунок 6 — Калибровка камеры в MATLAB Camera Calibrator набора инструментов Computer Vision Toolbox из пакета MATLAB

Для проведения виртуальных экспериментов и оценки погрешности устранения искажений в виртуальную сцену добавлена «эталонная» камера-обскура, имеющая параметры, аналогичные «виртуальной» камере, и расположенная и ориентированная в пространстве, аналогично виртуальной камере. «Эталонная» камера формирует «эталонное» изображение, с которым сравнивается изображение с «виртуальной» камеры.

Сравнение изображений осуществляется по разностным изображениям, получаемым путем вычитания изображения с «эталонной» камеры из изображения с «виртуальной» камеры. Камерам демонстрируется целевой объект, располагаемый перпендикулярно оптической оси камеры и симметрично относительно оси. На рисунке 7 представлен результат вычитания. Различия в изображениях минимальны и составляют единицы в соответствии с цветовой моделью RGB с 8-битным представлением цвета.

Рисунок 7 — Разностное изображение (справа) с увеличенной яркостью различающихся участков, полученное путем вычитания изображения с «эталонной» камеры (слева) из изображения с «виртуальной» камеры (справа)

В таблице 1 представлен результат сравнения «эталонного» изображения с полученным в результате преобразования. Количество отличающихся пикселей увеличивается по мере увеличения угла между оптической осью камеры со сверхширокоугольным объективом и «виртуальной» камерой. Это объясняется тем, что степень искажения на краях изображения существенно выше, чем центре, при этом отклонение яркости отличающихся пикселей варьируется в пределах от трех до четырех единиц. В результате выполнения ректификации выходное изображение получается менее резким в сравнении с «эталонным» изображением.

В работе реализован алгоритм локальной ректификации изображений, получаемых с камер со сверхширокоугольными объективами в областях, наиболее удаленных от центра изображения и подверженных наибольшим искажениям. Для проверки работоспособности алгоритма проведена серия экспериментов с виртуальной компьютерной моделью. Результаты эксперимента показывают, что

ректифицированное изображений имеет меньшую резкость в сравнении с «эталонным» ортоскопическим изображением, но отличия в цвете и расположении пикселей минимальны.

Таблица 1 — Результаты сравнения изображений

Угол поворота «виртуальной» камеры, °	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Процент пикселов, отличающихся на разностном кадре	2,0	1,9	2,2	2,2	2,4	2,3	2,5	2,6	2,8	2,9
Среднее отклонение яркости отличающихся пикселов, бит	3,3	3,5	3,4	3,0	3,0	3,6	3,5	3,3	3,5	3,8

Дальнейшие исследования могут быть направлены на сравнение различных математических моделей камер как на виртуальных моделях, так и на реальных камерах, а предложенная методика оценки качества устранения искажений позволит сравнить как существующие математические модели, так и разработанные в будущем.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90094 «Исследование методов оценки расстояний до объектов окружающей среды с использованием системы кругового обзора мобильных роботов».

Литература

1. Русинов М.М. Техническая оптика // Машиностроение. Ленингр. отд-ние. – 1979. – 488 с.

2. Clapa, Jakub, Henryk Blasinski, Kamil Grabowski and Przemyslaw Sekalski. «A fisheye distortion correction algorithm optimized for hardware implementations.» 2014 Proceedings of the 21st International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems (MIXDES) (2014): 415-419.

3. Kannala, J.. A generic camera model and calibration method for conventional, wide-angle, and fish-eye lenses / J. Kannala, S.S. Brandt // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2006. Vol. 28, no. 8. P. 1335–1340.

4. Mei, Christopher. Single view point omnidirectional camera calibration from planar grids / Christopher Mei, Patrick Rives // Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2007. P. 3945–3950.

5. Scaramuzza, D. A flexible technique for accurate omnidirectional camera calibration and structure from motion / D. Scaramuzza, A. Martinelli, R. Siegwart // Fourth IEEE International Conference on Computer Vision Systems (ICVS'06). 2006. P. 45–45.

6. Vladyslav, Usenko. The double sphere camera model / Usenko Vladyslav, Demmel Nikolaus, Cremers Daniel // CoRR. 2018. Vol. abs/1807.08957. arXiv : 1807.08957.

7. Расширение Dome Tools // Unity Asset Store [Электронный ресурс]. URL: https://assetstore.unity.com/packages/vfx/shaders/fullscreen-camera-effects/dome-tools-62664 (дата обращения: 07.06.2022).

8. Baofeng Zhang, Chunfang Lu, Juha Röning, and Weijia Feng «The study of calibration and epipolar geometry for the stereo vision system built by fisheye lenses», Proc. SPIE 9406, Intelligent Robots and Computer Vision XXXII: Algorithms and Techniques, 94060M (8 February 2015);

9. Pan, J., Mueller, M., Lahlou, T., Bovik, A.C. (2018). Orthogonally-Divergent Fisheye Stereo. In: Blanc-Talon, J., Helbert, D., Philips, W., Popescu, D., Scheunders, P. (eds) Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems. ACIVS 2018. Lecture Notes in Computer Science, vol 11182. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01449-0_10.

10.Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration // IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 2000. – Т. 22. – №. 11. – С. 1330-1334.

В.В. Варлашин, О.А. Шмаков

ПОДХОДЫ К ОРГАНИЗАЦИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНОГО ПРОМЫШЛЕННОГО ЭКЗОСКЕЛЕТА

ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург, v.varlashin@rtc.ru

Аннотация

Рассмотрены современные исследования, направленные на создание промышленных экзоскелетов. Приведен обзор систем управления активными экзоскелетами верхних и нижних конечностей. Выделены отличительные особенности организации контуров управления активных экзоскелетов. Выполнена классификация подходов, применяемых на различных уровнях типовой трехуровневой системы управления экзоскелетом. Определены способы взаимодействия контура управления экзоскелета с человеком-оператором. Выделены подходы, представляющие интерес с точки зрения применения в промышленных экзоскелетах.

Ключевые слова

Экзоскелет, нижние конечности, верхние конечности, управление, обзор.

V.V. Varlashin, O.A. Shmakov

APPROACHES TO THE ORGANIZATION OF CONTROL SYSTEM FOR ACTIVE INDUSTRIAL EXOSKELETON

Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, St. Petersburg, Russia, v.varlashin@rtc.ru

Abstract

Modern research aimed at creating industrial exoskeletons is considered. An overview of control systems for active exoskeletons of the upper and lower extremities is given. Distinctive features of the organization of control loops of active exoskeletons are highlighted. A classification of approaches used at various levels of a typical three-level exoskeleton control system has been made. The methods of interaction between the control loop of the exoskeleton and the human operator are determined. Approaches that are of interest from the point of view of application in industrial exoskeletons are highlighted.

Key words

Exoskeleton, lower-limb, upper-limb, control, review.

Современные экзоскелеты являются сложными техническими устройствами, применяемыми для достижения различных целей. Актуальность направления исследований в данной области подтверждает статистика опубликованных статей по данной тематике (рис. 1), согласно информации с сайта https://www.semanticscholar.org/.

В общем случае экзоскелеты можно классифицировать по области применения:

– реабилитационные экзоскелеты, которые в свою очередь делятся на экзоскелеты для восстановления мышечной активности и для помощи людям с нарушениями мышечно-скелетной системы;

– повышающие физические возможности, которые находят применение в таких областях как военное дело, погрузочно-разгрузочные работы, спасательные операции. К этой группе относятся и промышленные экзоскелеты.

Применение промышленных экзоскелетов для использования на рабочих местах направлено на решение ряда задач: облегчение физического труда, повышение производительности труда, снижение риска получения производственных травм. Такие устройства используются широким кругом специали-

стов: рабочими автосборочных линий, грузчиками, сварщиками, строителями, монтажниками. Применение промышленных экзоскелетов не ограничивается решением задач перемещения грузов. Выделяют несколько разновидностей промышленных экзоскелетов:

- устройства для удержания и манипулирования инструментом;
- устройства для разгрузки плечевого пояса и рук;
- устройства для поддержания спины и поясницы;
- устройства для поддержания ног оператора в заданной позиции;
- комбинированные устройства.

В общем случае выделяют три типа промышленных экзоскелетов по исполнению приводных механизмов:

- пассивные экзоскелеты, предназначенные для снижения нагрузки на человека-оператора;
- активные экзоскелеты, оснащенные различного рода приводами и датчиками, помогающими при выполнении операций;
- частично активные экзоскелеты, которые могут совмещать в процессе работы усилия, развиваемые механическими приводами и усилия мышц человека.

В качестве приводов активных и частично активных экзоскелетов используются электрические, пневматические и гидравлические приводы, а также их комбинации.

Наиболее продвинутым типом экзоскелетов являются активные экзоскелеты, оснащаемые большим количеством разнообразных датчиков. Основной трудностью при разработке таких экзоскелетов является выбор подхода к организации системы управления. С учетом большого количества публикаций по теме экзоскелетов, актуальной выглядит задача систематизации и классификации существующих подходов с целью определения тех, которые лучше всего подходят для применения в составе контура управления промышленного экзоскелета. Существующие исследования [2, 5], посвященные систематизации результатов, были получены более пяти лет назад и нуждаются в актуализации.

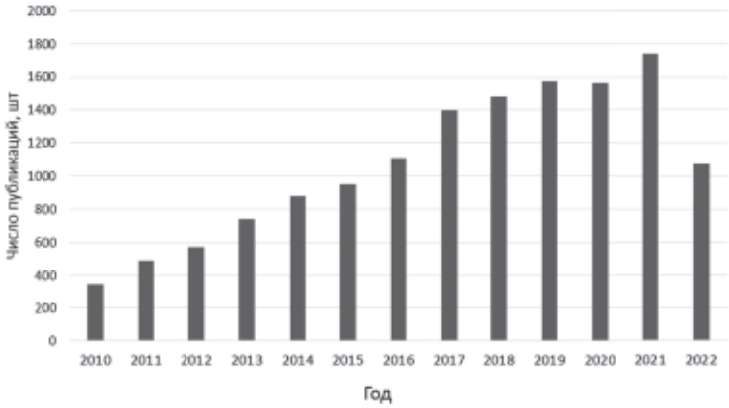


Рисунок 1 — Статистика числа публикаций за последние 12 лет

Целью работы является аналитический обзор существующих подходов к организации систем управления активных промышленных экзоскелетов и последующая систематизация полученных результатов. Для достижения цели решаются следующие задачи:

- поиск научно-исследовательских работ по теме активных экзоскелетов, в частности, реализации их систем управления;
- определение подходов к управлению экзоскелетом на различных уровнях и формируемой на них информации.
- выделение подходов, наиболее подходящих для управления промышленными экзоскелетами.

Аналитический обзор

Общее число публикаций, посвященных разработке экзоскелетов за последние 12 лет превышает 25000. Для сужения круга поиска информации принято решение ввести ограничения на поиск информации:

– публикации не ранее 2000 года;
– язык поиска: русский, английский;
– тип публикаций: статьи в научно-технических журналах, сборниках конференций, патенты;
– поисковые системы: РИНЦ (elibrary.ru), Google Scholar, Scopus Search;
– поиск информации по ключевым словам на русском и английском языках: экзоскелет, экзоскелетный комплекс, носимые устройства, робот, помощь, управление, верхние конечности, нижние конечности (англ. exoskeleton, robot, wearable device, assistance, control, lower limb, upper limb).

Фильтрация результатов поиска осуществляется не только по названию публикаций, но и по содержаниям аннотаций. Для каждой отобранной публикации в итоговую базу данных статей вносится следующая информация: метод управления верхнего уровня*, метод управления среднего уровня*, метод управления нижнего уровня*, тип привода, краткое описание метода управления, предполагаемое применение, как осуществляется помощь оператору, название устройства* (*при наличии информации).

В литературе представлено значительное количество различных способов управления, существенно отличающихся друг от друга. Однако требования к действиям, выполняемым контурами управления, чаще всего являются схожими. Полный контур управления экзоскелета можно разбить на более мелкие единицы (блоки), которые могут комбинироваться друг с другом. Анализ литературы позволил сделать вывод о применимости иерархической структуры системы управления с тремя уровнями (рис. 2): стратегическим, оперативным, тактическим. На рисунке 2 приведены типовые подходы, применяемые в экзоскелетах на различных уровнях управления.

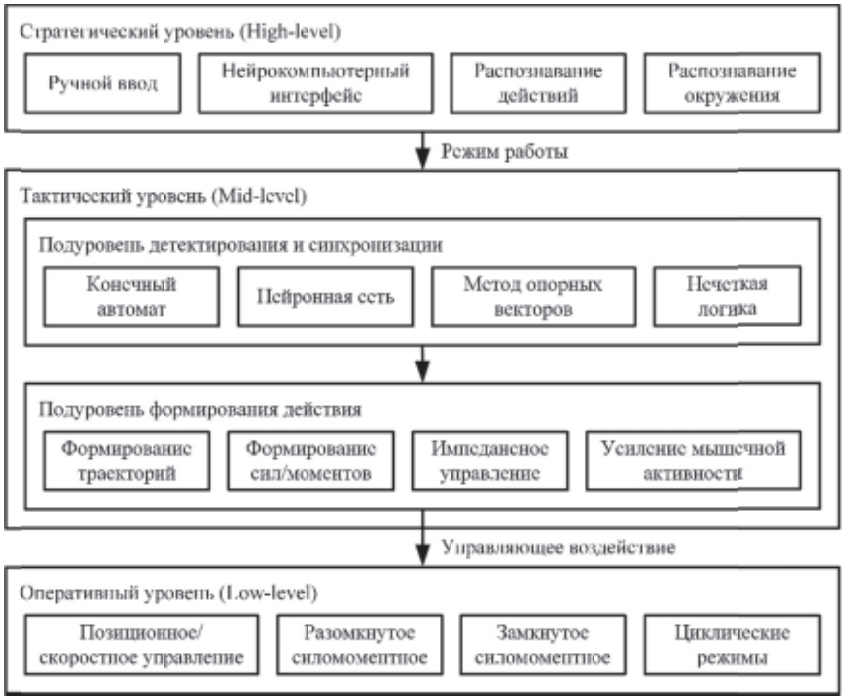


Рисунок 2 — Блок-схема иерархической структуры системы управления

Каждый из блоков имеет свое назначение, входные и выходные данные. В общем случае блоки управления на одном уровне имеют одинаковые выходные данные с точки зрения контура управления, но могут и отличаться. Это приводит к тому, что возможны не все комбинации блоков с разных уровней. Рассмотрим подробнее каждый из уровней.

Стратегический уровень управления

Стратегический уровень управления (англ. High-level) определяет режим работы экзоскелета в целом. Переключение между режимами работы экзоскелета осуществляется с учетом выполняемых опе-

ратором действий, а также с учетом состояния окружающей среды. Переключение режимов работы осуществляется не так часто, типовое время работы экзоскелета в одном из режимов составляет порядка несколько секунд, что позволяет использовать в том числе и ручной выбор режима. Обзор литературы показал, что вопросам организации стратегического уровня управления посвящено наименьшее количество публикаций. Чаще всего в рамках исследований, проводимых авторами публикаций, экзоскелет работает в одном конкретном режиме, в контролируемых условиях. Однако в реальной жизни выбор режимы работы является одним из ключевых действий для обеспечения удобства пользования экзоскелетом.

Выделяют следующие подходы: ручной ввод команд управления [6, 9] (англ. explicit/manual user input), использование информации, поступающей с нейрокомпьютерных интерфейсов [10, 12] (англ. brain‑computer interface), распознавание действий датчиками, закрепленными на теле оператора или применяемыми в составе экзоскелета [13, 17] (англ. movements recognition), а также методы на основе анализа окружающей среды системами технического зрения [18-21]. Обычно в составе экзоскелета применяются несколько подходов с возможностью переключения между ними.

Тактический уровень управления

Тактический уровень (англ. Mid-level) отвечает за взаимодействие экзоскелета с оператором, и поэтому играет наиболее важную роль в контуре управления. Наибольшее число исследований посвящено именно этой области. В рассматриваемой иерархической структуре контура управления тактический уровень объединяет в себе два подуровня:

– подуровень детектирование действий оператора и синхронизации системы с оператором (англ. detection/synchronization) в соответствии с режимом работы, определенном на стратегическом уровне. Выполняемые этим подуровнем оценки позволяют определить такие параметры, как, например, фаза в режиме шагания и формирует информацию для следующего подуровня. Для решения задачи применяются методы машинного обучения [22], в том числе с применением нейронных сетей [23], метода опорных векторов [23], нечеткой логики [24], а также конечные автоматы [25];

– подуровень действия экзоскелета, на котором формируется управляющее воздействие для оперативного уровня. Этот подуровень характеризуется наибольшим разнообразием применяемых методов и моделей: формирование траекторий движения для позиционного управления приводами, необходимых моментов для удержания элементов экзоскелета в нужном положении (например, в режиме импедансного управления или усиления мышечной активности путем преобразования ЭМГ в моменты на приводах). К этому подуровню также относятся методы управления, обеспечивающие сохранение равновесия в процессе ходьбы.

Оперативный уровень управления

Оперативный уровень (англ. low-level) реализует движения приводных систем, поэтому в большей степени зависит от типа привода, применяемого в экзоскелете. Применяемые подходы оперативного уровня не являются уникальными и применяются во многих областях робототехники. Поэтому количество работ, посвященных этому уровню управления также относительно мало. Подробные обзоры приводов рассматриваются в работах [26-27]. Системы управления оперативного уровня реализуют такие режимы управления как:

– позиционное/скоростное управление [28-30];

– силомоментное управление [31], при этом реализуются такие варианты контуров управления как управления силой/моментом с использованием обратных связей [32-33] и без них [34], а также циклические режимы управления силой/моментом [35] (в установившемся режиме, например, в процессе ходьбы).

Особенности управления промышленными экзоскелетами

Отличительной особенностью промышленных экзоскелетов является применение в составе устрой-

ства элементов, усиливающих как работу верхних конечностей, так и нижних. Существующие публикации [36-40] посвящены исследованию отдельных частей экзоскелетов, в большей степени – нижних конечностей, а также их характеристикам. При этом публикации качественно не отличаются от аналогичных исследований экзоскелетов других типов. В связи с этим основной отличительной особенностью разработки промышленного экзоскелета является выбор структуры и блоков управления.

В рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России FNRG-2022-0020 1021101316102-1-2.2.2 № 075-01623-22-01 «Промышленный экзоскелетный комплекс с активными приводами и пассивными элементами разгрузки для повышения функциональных возможностей оператора при работе с тяжелым инструментом» предлагается гибридный экзоскелет, состоящий из активных и пассивных элементов, использующий на верхнем уровне управления ручной ввод для задания основных режимов работы, на подуровне детектирования и синхронизации – нейронная сеть в паре с конечным автоматом для выбора паттернов траекторий и сил/моментов.

В работе выполнен обзор современной научно-технической литературы по теме управления активными экзоскелетами. Анализ литературы позволяет сделать вывод о том, что наиболее распространенной является трехуровневая система управления экзоскелетами, предлагаемая отечественными [1] и зарубежными авторами [2, 3]. Возможные варианты организации управления на каждом уровне сгруппированы по функциональному назначению. Несмотря на то, что реализация каждого отдельно взятого метода в группе может сильно отличаться, их общие функции остаются неизменными.

Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России FNRG-2022-0020 1021101316102-1-2.2.2 № 075-01623-22-01 «Промышленный экзоскелетный комплекс с активными приводами и пассивными элементами разгрузки для повышения функциональных возможностей оператора при работе с тяжелым инструментом».

Литература

1. Юревич Е. И. Основы робототехники, 4 изд. – БХВ-Петербург, 2018

2. Tucker M. R. et al. Control strategies for active lower extremity prosthetics and orthotics: a review // Journal of neuroengineering and rehabilitation. – 2015. – Т. 12. – №. 1. – С. 1-30.

3. Baud R. et al. Review of control strategies for lower-limb exoskeletons to assist gait // Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation. – 2021. – Т. 18. – №. 1. – С. 1-34.

4. Gull M. A., Bai S., Bak T. A review on design of upper limb exoskeletons // Robotics. – 2020. – Т. 9. – №. 1. – С. 16.

5. Yan T. et al. Review of assistive strategies in powered lower-limb orthoses and exoskeletons // Robotics and Autonomous Systems. – 2015. – Т. 64. – С. 120-136.

6. Chen B. et al. Reference joint trajectories generation of CUHK-EXO exoskeleton for system balance in walking assistance // IEEE Access. – 2019. – Т. 7. – С. 33809-33821.

7. Mineev S. A. Multimodal control system of active lower limb exoskeleton with feedback // Proceedings of the Scientific-Practical Conference" Research and Development-2016". – Springer, Cham, 2018. – С. 3-10.

8. Hyun D. J. et al. Walking propulsion generation in double stance by powered exoskeleton for paraplegics // Robotics and Autonomous Systems. – 2019. – Т. 116. – С. 24-37.

9. Yang M. et al. Development and control of a robotic lower limb exoskeleton for paraplegic patients // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. – 2019. – Т. 233. – №. 3. – С. 1087-1098.

10. Choi J. et al. Robust semi-synchronous bci controller for brain-actuated exoskeleton system // 2020 8th international winter conference on brain-computer interface (BCI). – IEEE, 2020. – С. 1-3.

11. He Y. et al. Brain–machine interfaces for controlling lower-limb powered robotic systems // Journal of neural engineering. – 2018. – Т. 15. – №. 2. – С. 021004.

12. Tariq M., Trivailo P. M., Simic M. EEG-based BCI control schemes for lower-limb assistive-robots // Frontiers in human neuroscience. – 2018. – Т. 12. – С. 312.

13. Auberger R. et al. Patient motion using a computerized leg brace in everyday locomotion tasks // IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics. – 2019. – Т. 1. – №. 2. – С. 106-114.

14. Xue T. et al. Adaptive oscillator-based robust control for flexible hip assistive exoskeleton // IEEE Robotics and Automation Letters. – 2019. – Т. 4. – №. 4. – С. 3318-3323.

15. Xie L. et al. Knee-braced energy harvester: Reclaim energy and assist walking // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2019. – Т. 127. – С. 172-189.

16. Alaoui O. M. et al. Using generic upper-body movement strategies in a free walking setting to detect gait initiation intention in a lower-limb exoskeleton // IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics. – 2020. – Т. 2. – №. 2. – С. 236-247.

17. Zhou B. et al. Accurate recognition of lower limb ambulation mode based on surface electromyography and motion data using machine learning // Computer Methods and Programs in Biomedicine. – 2020. – Т. 193. – С. 105486.

18. Gao S. et al. A smart terrain identification technique based on electromyography, ground reaction force, and machine learning for lower limb rehabilitation // Applied Sciences. – 2020. – Т. 10. – №. 8. – С. 2638.

19. Khazoom C. et al. Design and control of a multifunctional ankle exoskeleton powered by magnetorheological actuators to assist walking, jumping, and landing // IEEE Robotics and Automation Letters. – 2019. – Т. 4. – №. 3. – С. 3083-3090.

20. Laschowski B. et al. Preliminary design of an environment recognition system for controlling robotic lower-limb prostheses and exoskeletons // 2019 IEEE 16th international conference on rehabilitation robotics (ICORR). – IEEE, 2019. – С. 868-873.

21. Liu D. X. et al. Vision-assisted autonomous lower-limb exoskeleton robot // IEEE transactions on systems, man, and cybernetics: systems. – 2019. – Т. 51. – №. 6. – С. 3759-3770.

22. Li D. Y. et al. Estimating system state during human walking with a powered ankle-foot orthosis //IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. – 2011. – Т. 16. – №. 5. – С. 835-844.

23. Kang I., Kunapuli P., Young A. J. Real-time neural network-based gait phase estimation using a robotic hip exoskeleton //IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics. – 2019. – Т. 2. – №. 1. – С. 28-37.

24. Zha F. et al. The exoskeleton balance assistance control strategy based on single step balance assessment //Applied Sciences. – 2019. – Т. 9. – №. 5. – С. 884.

25. Koller J. R., Remy C. D., Ferris D. P. Comparing neural control and mechanically intrinsic control of powered ankle exoskeletons //2017 International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR). – IEEE, 2017. – С. 294-299.

26. Veale A. J., Xie S. Q. Towards compliant and wearable robotic orthoses: A review of current and emerging actuator technologies //Medical engineering & physics. – 2016. – Т. 38. – №. 4. – С. 317-325.

27. Grosu S. et al. Driving robotic exoskeletons using cable-based transmissions: a qualitative analysis and overview //Applied Mechanics Reviews. – 2018. – Т. 70. – №. 6.

28. Rodriguez C. A., Ponce P., Molina A. ANFIS and MPC controllers for a reconfigurable lower limb exoskeleton //Soft Computing. – 2017. – Т. 21. – №. 3. – С. 571-584.

29. Li Z., Yin Z. Zhang dynamics based tracking control of knee exoskeleton with timedependent inertial and viscous parameters //International Journal of Control, Automation and Systems. – 2018. – Т. 16. – №. 2. – С. 904-911.

30. Li Z., Yin Z., Cheng H. Tracking control of knee exoskeleton system with time-dependent inertial and viscous parameters //IFAC-PapersOnLine. – 2017. – Т. 50. – №. 1. – С. 1322-1327.

31. Zhang J., Cheah C. C., Collins S. H. Torque control in legged locomotion //Bioinspired Legged Locomotion. – Butterworth-Heinemann, 2017. – С. 347-400.

32. Awad L. N. et al. A soft robotic exosuit improves walking in patients after stroke //Science translational medicine. – 2017. – Т. 9. – №. 400. – С. eaai9084.

33. Lee G. et al. Improved assistive profile tracking of soft exosuits for walking and jogging with off-board actuation //2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). – IEEE, 2017. – С. 1699-1706.

34. Lee G. et al. Improved assistive profile tracking of soft exosuits for walking and jogging with off-board actuation //2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). – IEEE, 2017. – С. 1699-1706.

35. Bae J. et al. A lightweight and efficient portable soft exosuit for paretic ankle assistance in walking after stroke //2018 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA). – IEEE, 2018. – С. 2820-2827.

36. Яцун С. Ф. и др. Промышленные экзоскелеты: моделирование, проектирование, управление. – 2021.

37. Яцун С. Ф., Яцун А. С. Модели и алгоритмы управления экзоскелетами промышленного назначения. – 2021.

38. Мальчиков А. В. и др. Требования к конструкции и системе управления промышленного экзоскелета // Юность и знания-гарантия успеха-2019. – 2019. – С. 238-241.

39. Яцун С. Ф. и др. Математическое моделирование системы управления промышленного экзоскелета // Завалишинские чтения 19. – 2019. – С. 130-134.

40. Орлов И. А., Грибков Д. А., Подопросветов А. В. Промышленный экзоскелет нижних конечностей: конструкция и модели // Перспективные направления развития отечественных информационных технологий. – 2016. – С. 79-80.

В.А. Поминова, И.К. Петушок

ПОДХОДЫ К ИССЛЕДОВАНИЮ МЕТОДОВ СОЗДАНИЯ ОТЛАДОЧНО-МОДЕЛИРУЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО И ПОВЕДЕНЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РТК И ГРУПП РТК

ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург, v.pominova@rtc.ru

Аннотация

В работе рассмотрен принцип построения отладочно-моделирующего комплекса (ОМК), предназначенного для проведения комплексных численных расчетов на основе различных способов моделирования РТК и внешней среды. Описаны способы структурного, функционального и поведенческого моделирования и их нотации. Предложено моделирование на ОМК поведения автономного необитаемого аппарата с помощью ОМК и проведение расчетов сложных физических процессов взаимодействия с внешней средой и другими объектами.

Ключевые слова

Отладочно-моделирующий комплекс, структурное моделирование, функционально моделирование, поведенческое моделирование, робототехнический комплекс (РТК), автономный необитаемый подводный аппарат (АНПА), трехмерная модель среды, визуализация обстановки.

V.A. Pominova, I.K. Petushok

APPROACHES TO THE STUDY OF METHODS FOR CREATING DEBUG AND MODELING COMPLEXES FOR FUNCTIONAL AND BEHAVIORAL MODELING OF RTC AND RTC GROUPS

Russian State Scientific Centre for Robotics and Technical Cybernetics, St. Peterburg, Russia, v.pominova@rtc.ru

Abstract

The article considers the principle of building a debugging-modeling complex (DMC), designed for complex numerical calculations based on various methods of modeling the RC and the external environment. The methods of structural, functional and behavioral modeling and their notation are described. It is proposed to simulate the behavior of an autonomous uninhabited vehicle with the help of the DMC and to perform calculations of complex physical processes of interaction with the external environment and other objects.

Keywords

Debugging-modeling complex, structural modeling, functional modeling, behavioral modeling, robotic complex (RC), autonomous uninhabited underwater vehicle (AUUV), three-dimensional model of the environment, visualization of the situation.

С целью повышения качества проектирования и разработки морских робототехнических комплексов, снижения затрат на обучение людей управлению и взаимодействию с техническими средствами, необходимо использование специально сконструированных искусственных сред человеческой деятельности с использованием цифрового прототипирования новых образцов техники и построения технических средств профессиональной подготовки специалистов различного профиля. Моделирования функционирования РТК позволяет принять решения о целесообразности и адекватности применяемых алгоритмов управления и выборе оборудования для РТК оптимизации и унификации научных, инженерно-технических, эргономических решений на всех стадиях жизненного цикла РТК в виртуальной среде с элементами искусственного интеллекта. Разработка технологий на отладочно-

моделирующим комплексе позволит выработать единый научный подход при создании новых РТК, сократить издержки на тестирование, отладку и внесение конструктивных изменений в ходе разработки, а также производить их валидацию и верификации РТК на ранних стадиях создания [1].

Моделирование процессов – это формализованная процедура, подразумевающая создание некоторой формальной модели процесса, описанной на математическом или любом другом формализованном языке. Основное отличие моделирования от описания в этом случае, что моделирование – это формальное представление процесса с помощью общеизвестных методологий, методов и нотаций. Методология моделирования в ОМК определяет системные основы исследования или проектирования, а также совокупность методов и принципов построения моделей процессов. При этом используются следующие способы моделирования в ОМК:

- структурное;
- функциональное;
- поведенческое;

Моделирование осуществляется с помощью графических элементов, применяемых для генерации описания системы с использованием соответствующих нотаций, или если более кратко – способ достижения какой-либо цели, то есть система условных знаков и правил их использования для описания различных категорий моделируемой системы, таких как объектов, процессов, взаимосвязей и т.п. Нотации – это формализованные графические модели РТК, которые используются, чтобы фиксировать процессы, анализировать их и оптимизировать.

В ОМК используется структурное моделирование, как область системного анализа и вид моделирования, который используется с целью исследования перспективных РТК и может служить для их разработки. С помощью структурного моделирования на ОМК представляется система элементов (РКТ, его оборудования) и подсистем (внешняя среда, объекты взаимодействия и т.д.) и отношений между ними (структура), а также с точки зрения свойств системы, которые позволяют достигать заданной цели (функции), производить верификацию и валидацию роботов на ранних стадиях разработки.

Функциональное моделирование подразумевает описание процессов в виде взаимосвязанных, четко структурированных функций. Главный элемент – это функция (операция), а процесс представляется в виде последовательности функций, преобразующих входы процесса в выходы с использованием определенных ресурсов.

Таблица 1 — Методы и нотации функционального моделирования

Вид моделирования	**Метод**	**Нотация**
Функциональное моделирование	SADT	IDEF0
	DFD	Гайна -Сарсона Gane / Sarson Йордана - Де Марко Yourdon / DeMarko
	WFD	IDEF3 (PFDD)
	ARIS	eEPC
		BPMN

Функциональное моделирование рассматривает процесс как функцию (лат. functio — совершение, исполнение) или иными словами «черный ящик». В функциональной модели функция не имеет временной последовательности, а только точку входа и точку выхода. Функциональное моделирование помогает рассматривать модель РТК с точки зрения результативности, т.е. при моделировании мы исходим из того, что имеем на входе, и того, что желаем получить на выходе.

Таким образом, в функциональной модели изначально известны точка входа и желаемый результат, а последовательность действий и является объектом разработки. При этом использование функциональных моделей как «черных ящиков» позволяет детализировать каждый этап по мере необхо-

димости. А вся работа при моделировании перспективных РТК направлена на поиск оптимального решения для достижения цели. Функциональные модели используются для демонстрации идей и вариантов решений. Это также очень удобно, ведь в процессе демонстрации вы можете двигаться от общего к деталям, по мере необходимости разделять и декомпозировать функции. Но декомпозировать будем при этом именно функции, разделяя одну функцию на несколько, вы не получите описание процесса рекомендую.

Поведенческое моделирование перспективных РТК

Представляет собой поведения системы во времени, описание поведения процессов при различных внешних и внутренних условиях с анализом как динамических характеристик процессов, так и с распределением ресурсов.

Таблица 2 — Методы и нотации поведенческого моделирования

Вид моделирования	Метод	Нотация
Поведенческое моделирование	STD*	CPN (Цветные сети Петри) IDEF3 (OSTN) GPSS SIMAN*

На самом деле, конечно, существуют и другие подходы, их много так же, как и языков моделирования. Но они большей частью являются гибридными решениями, объединяющих перечисленные подходы.

Целью создания отладочно-моделирующего комплекса (ОМК) является повышение эффективности производства за счет снижения затрат, унификация управленческих решений, и более качественная подготовке персонала РТК [2].

Разработка отладочно-моделирующего комплекса позволит:

− произвести перспективные исследования производственных площадок, по возможности и эффективности их разработки в различных природно-климатических зонах и метеоусловиях;

− произвести планирование и оптимизировать производственные процессы на реальных полигонах с целью снижения затрат и качественного управления ресурсами;

− более качественно подготовить специалистов к выполнению задач по управлению производственными объектами и техническими средствами, в том числе робототехническими;

− исследовать алгоритмы движения, выполнения технологических операций и систем технического зрения робототехнических средств.

− снизить затраты на испытания новой техники за счет системы моделирования виртуального окружения.

Одним из основных компонентов отладочно-моделирующего комплекса является моделирование различных сред и объектов. Большинство средств моделирования можно охарактеризовать как симуляторы пользовательского уровня – они позволяют моделировать поведение пользовательских процессов, эмулируя системные вызовы, исполняемые на целевой (моделируемой) системе, средствами системы, на которой запущен симулятор. Симуляторы РТК в составе ОМК целиком моделируют его вычислительный процесс [3, 4], включая отдельные части, такие как объекты и среды, как, впрочем, процесс моделирования взаимодействия выбранных структур. С другой стороны, ОМК может использоваться для таких целей как: анализ поведения задач, основанный на изменении поведения системы (например, сбор статистики по событиям, недоступный на реальной аппаратуре); возможность исполнения программного обеспечения в период, когда аппаратура еще не реализована; разработка и отладка, анализ особенностей различных архитектурных решений и их вклада в изменение производительности системы.

Текущий уровень развития технологий позволяет реализовать ОМК для проведения расчетов, нацеленных на суперкомпьютерное моделирование сложных физических процессов [5, 6]. Немало-

важным фактором стало то обстоятельство, что при создании полноценного графического интерфейса существует проблема производительности, а также качества предустановленного на нем программного обеспечения. Применение технологий исключает данные вопросы – для использования приложения достаточно наличия современного браузера. Вся тяжесть предобработки и графического представления данных ложится на сервер, в качестве которого может выступать вычислительный модуль, на базе которого были получены основные результаты моделирования. Помимо сказанного существуют дополнительные преимущества клиент-серверного подхода, которые включают:

– обновление программного обеспечения не зависит от конечного пользователя (оператора), так как данная проблема находится в области ответственности администратора сервера;

– возможность совместной работы операторов над одним расчетным проектом (многопользовательский режим);

– независимость прикладной программной среды в целом от состояния персонального компьютера пользователя, что особенно актуально при мониторинге прохождения задач на удаленных вычислителях и своевременной обработке расчетных данных;

– унификация доступа к вычислительным ресурсам различного типа в рамках единого подхода.

Основные существующие реализации подобных ОМК можно разделить на две категории. С одной стороны, это псевдо-лаборатории, такие как [7, 8], позволяющие проводить суперкомпьютерное моделирование в рамках отзывчивого пользовательского интерфейса. Однако подобные системы направлены на решение конкретного класса задач. Кроме того, они не предусматривают свободного динамического расширения интегрированных вычислительных устройств. Другой тип систем [9, 10] предлагает удобное администрирование вычислительных ресурсов и динамическое добавление прикладных программных частей. Однако в этом случае конфигурирование прикладных программ осуществляется посредством стандартных строковых и числовых полей, флагов. Кроме того, доступ к выходным данным прикладных приложений реализуется посредством стандартного файлового интерфейса, обеспечивающего простейший просмотр или загрузку для локальной обработки. В настоящей работе при создании ОМК были учтены все вышеуказанные обстоятельства и приняты решения, направленные на создание своего рода вычислительной среды, в которой будет возможно проведение полномасштабных компьютерных и суперкомпьютерных экспериментов по выбранной прикладной тематике на доступных гибридных вычислительных кластерах в режиме удаленного доступа. Для этого предпринята попытка объединения представленных подходов. Структурная схема ОМК представлена на рисунке 1.

В качестве первичной модели для демонстрации возможностей работы ОМК был выбран автономный необитаемый подводный аппарат (АНПА) и среды его тестирования (подводная и донная). Информационно-управляющая система модели робота, выполняющего такие операции, как картографирование, океанологические и экологические измерения и другие, требует наличия на борту развитой системы формирования поведения, которая, к тому же, должна иметь возможность гибкого наращивания функциональности по мере появления новых задач обследования и бортовых сенсоров. Программно-алгоритмический интеллект модели должен обеспечивать формирование и отработку рабочих миссий, автоматическое планирование траектории его движения в условиях априори неизвестной обстановки, обход препятствий и др. До установки на борт АНПА все функции и алгоритмы работы этой системы должны быть тщательно протестированы и отлажены.

Моделирование внешней среды для симулятора АНПА необходимо для получения близкой к реальности информационной картины для замещения данных, получаемых от бортовых сенсоров, - оптических и гидролокационных. Оно служит нескольким целям. Имитация акустического оборудования является одной из главных отличительных особенностей разработанного комплекса. Другой целью моделирования среды является получение наглядной картины движения и функционирования аппарата в процессе выполнения миссии. Не менее важным назначением моделирования среды явля-

ется и отладка методов/алгоритмов навигации и распознавания объектов подводной обстановки (трубопроводы, месторождения полезных ископаемых, затонувшие объекты).

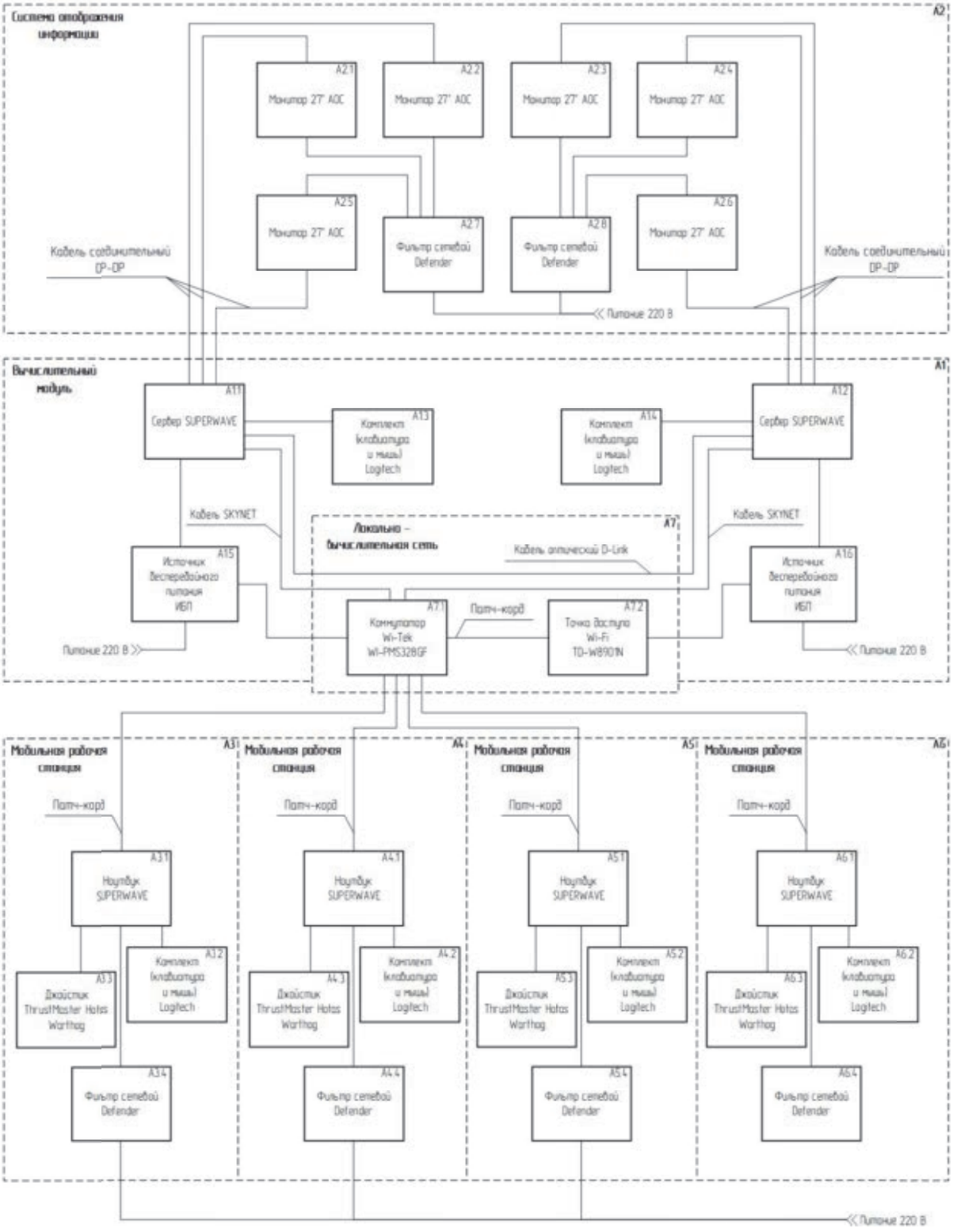


Рисунок 1 — Структурная схема ОМК

Модель внешней среды состоит из геометрических и атрибутивных данных, описывающих подводную обстановку в районе выполнения миссии АНПА. Составные части модели среды:

- полигональная модель рельефа дна.
- модели статических объектов на дне.

Реалистичность сцены достигается двояким образом, с одной стороны на рельеф может быть нанесена текстура, содержащая визуальные элементы, присущие морскому дну, а с другой пейзаж оживляется 3D объектами, «посеянными» на дне. Эти объекты являются объектами-деталями и могут встречаться на сцене как однократно (например, уникальный объект искусственного происхождения), так и получаться путем клонирования (естественные объекты морского дня: камни, звезды, ракушки и т.п.). Во втором случае применяется вариативность размеров и ориентаций объектов для достижения большей реалистичности.

Специфика функционирования АНПА в водной среде такова, что основную информацию о подводной обстановке он получает посредством гидроакустических сенсоров. Это связано с тем, что под водой дальность наблюдения оптическими средствами как правило на порядок меньше, чем акустическими. Поэтому АНПА оснащены множеством гидролокационных устройств, таких как эхолокационные системы (ЭЛС) и гидролокаторы бокового обзора (ГБО). ЭЛС используются для обнаружения препятствий и движения на определенной высоте над дном. На аппаратах обычно монтируется несколько датчиков ЭЛС, каждый из которых наблюдает обстановку в своем секторе. ГБО, как это следует из названия, отслеживает обстановку с правого или левого борта. С его помощью решаются исследовательские задачи. ГБО обладает шириной обзора в десятки и сотни метров и позволяет обнаруживать объекты различных размеров на фоне дна.

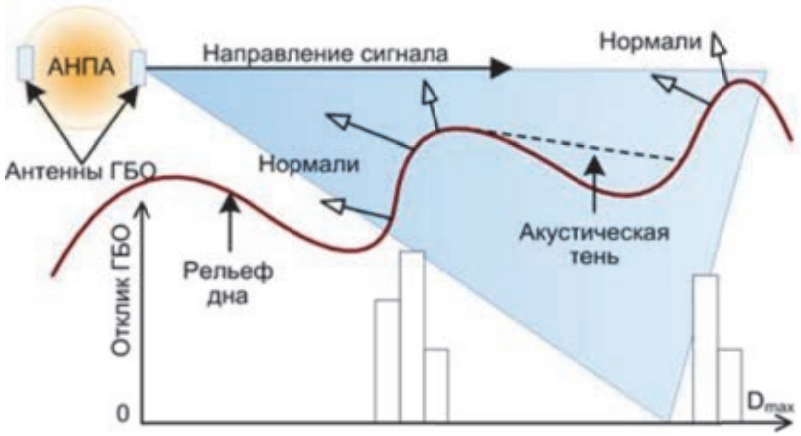


Рисунок 2 — Модель распространения ГБО-сигнала [11]

Применяемая модель гидролокатора базируется на методологии геометрической акустики, и поэтому мы сознательно избегаем некоторых вопросов моделирования явлений дифракции и интерференции, связанных с волновой природой упругих колебаний. Так как геометрическая акустика является предельным случаем волновой акустики при стремлении длины звуковой волны к нулю, то для нее в основном применимы те же законы, что и в геометрической оптике. Такое упрощение имеет определенные преимущества, так как позволяет нам применять методы и программное обеспечение машинной графики для формирования гидролокационных картин подводной обстановки.

Для моделирования излучателя и приемника однолучевого гидролокатора используется идеальная камера, совмещенная с источником света. Источник света помещается в фокус смоделированной камеры и направляется вдоль оптической оси камеры (рисунок 2). Внешние параметры камеры устанавливаются таким образом, чтобы ее положение и направление соответствовали месту бортового излучателя в мировой системе координат. Внутренние параметры камеры формируют необходимую диаграмму направленности излучателя и задают характеристики виртуального «сенсора» сигнала. Разрешение камеры устанавливаются из соображений качества принимаемого сигнала. Далее происходит рендеринг всей подводной среды. Таким образом, сцена освещается источником и все видимые полигоны сцены получают засветку «акустическим сигналом».

Моделирование распространения сигнала осуществляется согласно модели отражения Фонга, в которой используется только рассеянная (диффузная) составляющая [11, 12]. Сигнал точечного источника отражается от идеального рассеивателя по закону косинусов Ламберта: интенсивность отражённого сигнала пропорциональна косинусу угла между направлением сигнала и нормалью к поверхности (рис. 2):

$$I = I_t * K_d * \cos(n\hat{}l)$$

где I — интенсивность отражённого сигнала, It — интенсивность сигнала от точечного источника, Kd — коэффициент диффузного отражения, n — вектор нормали к поверхности, l — направление сигнала.

В работе рассмотрен принцип построения ОМК, предназначенной для проведения комплексных численных расчетов на основе различных способов моделирования РТК. Основным назначением разработанного прототипа ОМК системы являются упрощение и унификация взаимодействия с удаленными вычислительными ресурсами. Предложенная реализация может существенно облегчить подготовку исходных кодов и сборку ПО, позволяя наладить непрерывное взаимодействие между разработчиком прикладной программы и ее конечным пользователем – оператором РТК. Для проведения вычислительных экспериментов предусмотрены возможности генерации графического интерфейса для задания параметров и данных на основе файла-описания. Система управления и мониторинга позволяет осуществлять запуск и слежение за пользовательскими заданиями на разных вычислительных ресурсах в рамках единого решения. Анализ выходных данных предлагается осуществлять с помощью серверной отрисовки.

Дальнейшее развитие комплекса будет идти по пути:

– повышения достоверности имитации и расширения типов моделируемых перспективных роботов;

– совершенствования алгоритмической базы для повышения точности навигации РТК, повышения реализма виртуальной обстановки и более полному соответствию режиму реального времени работы бортового ПО;

– разработки и модификации методов для решения новых обследовательских задач (комплексная инспекция подводных коммуникаций с использованием данных от ГБО, фото и ЭМИ; интеллектуальный поиск объектов и т.п.).

Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России FNRG-2022-0008 1021051101732-4-1.2.1;2.2.2 № 075-01623-22-01 «Исследование методов и разработка технологий создания отладочно-моделирующих комплексов для функционального и поведенческого моделирования РТК и групп РТК».

Литература

1. Игнатиади Е.К. Петушок И.К. О подходах к проектированию информационно-логического сопряжения программного обеспечения РТК и отладочно-моделирующего комплекса: доклад / Международный военно-технический форум «АРМИЯ-2022». КВЦ «Патриот» (г. Кубинка, Московская обл.), 2022.

2. Игнатиади Е.К. Петушок И.К. Виртуальный полигон для морских робототехнических средств // доклад / XVI Всероссийская научно-практическая конференция «Перспективные системы и задачи управления» п. Домбай, Карачаево-Черкесская республика, 2021 – 18 с.

3. Magnusson, P. S., Dahlgren, F., Grahn, H., Karlsson, M., Larsson, F., Lundholm, F., Moestedt, A., Nilsson, J., Stenstrvm, P., Werner, B., SimICS/sun4m: A Virtual Workstation, in «Usenix Annual Technical Conference», 1998.

4. Rosenblum, M., Herrod, S. A., Witchel, E., Gupta, A., Complete Computer System Simulation: The SimOS Approach, IEEE Parallel and Distributed Technology, 1995.

5. Поляков С. В., Подрыга В. О., Пузырьков Д. В. Облачный сервис для решения перспективных задач нанотехнологии // Научный сервис в сети Интернет: труды XIX Всероссийской научной конференции (18-23 сентября 2017 г., г. Новороссийск). М.: ИПМ им. М. В. Келдыша, 2017. С. 379-388. URL: http://keldysh.ru/abrau/2017/54.pdf 29

6. Пузырьков Д. В., Подрыга В. О., Поляков С. В. Облачный сервис для масштабных молекулярно-динамических расчетов: от идеи до реализации // Научный сервис в сети Интернет: труды XIX Всероссийской научной конференции (18-23 сентября 2017 г., г. Новороссийск). М.: ИПМ им. М.В.Келдыша, 2017. С. 406-416. URL: http://keldysh.ru/abrau/2017/58.pdf

7. Sim Streamlined For Design: structural simulation and analysis in the cloud [Электронный ресурс]. URL: https://www.sim4design.com/index

8. Nucleonica [Электронный ресурс]. URL: https://www.nucleonica.com/ 1

9. Everest [Электронный ресурс]. URL: http://everest.distcomp.org/

10. Sukhoroslov O., Volkov S., Afanasiev A. A Web-Based Platform for Publication and Distributed Execution of Computing Applications // 14th International Symposium on Parallel and Distributed Computing (ISPDC). IEEE, 2015. pp. 175-184.

11. Багницкий А.В., Инзарцев А.В., Павин А.М., Мельман С.В., Морозов М.А. Модельное решение задачи автоматической инспекции подводных трубопроводов с помощью гидролокатора бокового обзора // Подводные исследования и робототехника, №1(11), 2011, С. 17-23

12. Бобков В.А., Морозов М.А. Моделирование работы гидролокационных устройств средствами машинной графики // Подводные исследования и робототехника. – 2012. – №1. – С. 46–51.

А.В. Сергеев

ПОПУЛЯРИЗАЦИЯ РОБОТОТЕХНИКИ С ПОМОЩЬЮ ВИРТУАЛЬНОЙ ЭКСПОЗИЦИИ

ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург, asergeev@rtc.ru

Аннотация

Данная работа посвящена проблеме популяризации робототехники посредством виртуальной экспозиции. Показаны преимущества использования виртуальной экспозиции по сравнению с классической музейной экспозицией. Показаны варианты решения этой задачи на примере виртуальной экспозиции Музея робототехники ЦНИИ РТК.

Ключевые слова

Виртуальная реальность, интерактивные технологии, взаимодействие, мультимерные интерфейсы.

A.V. Sergeev

POPULARIZATION OF ROBOTICS USING VIRTUAL EXPOSURE

Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, St. Petersburg, Russia, asergeev@rtc.ru

Abstract

This work is focused on the problem of popularization of robotics in term of virtual exposition. The advantages of using a virtual exposition in comparison with a classical museum exposition are demonstrated. The options for solving this problem are shown on the example of the virtual exposition of the Museum of Robotics of the Central Research Institute of the RTC.

Key words

Virtual reality, interactive technologies, interaction, multi-dimensional interfaces.

Виртуальная реальность создаётся техническими средствами и передается человеку через его органы чувств. Для придания убедительности ощущений реакции на действия человека создаются в реальном времени, но несмотря на это человек никогда не утрачивает окончательно связи с окружающей действительностью.

В 1994 году Пол Милгрем и Фумио Кисино описали модель континуума реальность-виртуальность (см. рисунок 1), на одном конце которого находится реальная среда, а на другом виртуальная реальность. Между ними располагается смешанная реальность (Mixed reality), которая может изменяться от дополненной реальности (Augemented Reality, AR), до дополненной виртуальности (Augumented Virtuality, AV) [1].

Рисунок 1 — Континуум реальность-виртуальность

Содержание смешанной реальности сочетает в себе как реальное, так и виртуальное и является трёхмерным пространством в котором пользователь может перемещаться. Смещение к той или иной

границе континуума зависит от соотношения реальных и виртуальных объектов. Например, использование мобильного телефона с приложением, отображающим трёхмерные объекты при наведении на QR-код, можно отнести к дополненной реальности, а использование шлема виртуальной реальности, в котором демонстрируется трёхмерная модель города с трансляцией изображений с реальных видеокамер наблюдения можно отнести к дополненной виртуальности.

Популяризация – это изложение чего-либо сложного в простой, доступной форме. Между тем, у специалистов и учёных существует предубеждение, что при популяризации теряется часть знания, и поэтому она способна представлять только видимую часть отражаемого объекта. Важную роль играет ситуативный контекст, условия окружающей среды, взаимосвязи с другими объектами или явлениями. Виртуальные музейные площадки не обладают главным свойством традиционного музея – они не содержат подлинников, виртуальная экспозиция представляет собой не более чем репрезентация, поскольку путем оцифровки сохраняются и транслируются не сами предметы, а только их виртуальные копии. Несмотря на это традиционные формы выставочного взаимодействия сегодня все в большей степени дополняются и даже замещаются новыми формами[2]. Очевидно, что данная тенденция имеет ряд плюсов. Так, распространение интерактивных технологий в музеях обеспечивает более глубокое погружение посетителя в экспозицию, позволяет некоторым объектам «заговорить» — предоставляет новые инструменты для рассказывания историй, а также помогает сделать посещение музея более индивидуальным [3].

Для организаторов мероприятий и музеев использование очков виртуальной реальности имеет ряд преимуществ по сравнению с обычными выставочными площадками. Площадь, необходимая для одного человека, занимает всего несколько квадратных метров, при этом другие посетители могут находиться рядом и наблюдать за действиями человека, погруженного в виртуальную реальность, с помощью дополнительного монитора или проектора. Площадь демонстрируемого виртуального полигона может быть любой, причем как в большую, так и в меньшую сторону, позволяя демонстрировать объекты микромира. Другим важным преимуществом является возможность запускать с помощью одного оборудования разные виртуальные демонстрации. Третьим преимуществом является относительная мобильность и дешевизна комплекта средств виртуальной реальности, который состоит из покупных изделий, поставляемых в упаковке и не требующих особых условий транспортировки. Утрата оборудования не приведёт к утрате виртуальной демонстрации.

В целом посетители музеев воспринимают использование интерактивных технологий положительно. Большинство людей регулярно взаимодействуют с интерактивными сенсорными киосками, тогда как с другими видами интерактивных технологий, такими как очки виртуальной реальности, они либо взаимодействуют редко, либо никогда их не видели. При этом наблюдается прямая зависимость между частотой взаимодействия и восприятием использования интерактивных технологий: чем чаще посетители взаимодействуют с сенсорными киосками, тем лучше они воспринимают использование интерактивных технологий в музеях в целом. Также проведенный анализ показал, что на позитивное восприятие интерактивных технологий в музеях у их посетителей влияют полезность и удобство использования. Развлекательный фактор имеет обратную зависимость, чем больше посетитель полагает, что использование интерактивных технологий в музеях выполняет развлекательную функцию, тем хуже он относится к их использованию в музеях. Восприятие отношения к интерактивным технологиям в музеях не зависит от таких социально-демографических характеристик, таких как пол, возраст, уровень дохода, уровень образования, семейное положение и количество детей. [4].

В ЦНИИ РТК уже несколько лет ведутся разработки виртуальных интерфейсов для управления робототехническими системами [5, 6, 7]. Человеко-машинные интерфейсы разрабатываются методами инженерно-психологического проектирования с учетом когнитивных особенностей человека. В процессе разработки особое внимание уделяется вопросу снижения уровня сложности алгоритмов управления. Это связано с тем, что сложные алгоритмы ведут к периодическим нарушениям опера-

торской деятельности, приводящим к ошибкам и сбоям в функционировании, в том числе критических систем и технологий [8].

Несмотря на то, что полученные в результате разработки интерфейсы человек-машина позволяют управлять реальными образцами робототехники, в процессе разработки используются программные симуляторы, которые имитируют сигналы, получаемые от реального робота. Такие симуляторы могут включать как полный набор цифрового моделирования физических процессов робота и окружающего пространства вокруг него, так и быть лишь программой, отправляющей заранее созданные ответы при получении определённых запросов. Выбор конкретного решения зависит от необходимого объема отработки интерфейса. Недостатки виртуальной экспозиции, о которых упоминалось ранее, могут быть полностью компенсированы посредством симулятора, поскольку он отражает не только внешний облик, но и свойства реального объекта, а также взаимосвязи с объектами окружающего пространства.

Другим способом добиться реалистичности виртуальной экспозиции является использование реального объекта управления, связь с которым осуществляется посредством каналов связи. Поскольку виртуальный пульт управления обычно используют для дистанционного управления, то в систему управления при проектировании закладывают такую возможность. В таком случае в экспозиции музея или выставки присутствует только пультовая часть робототехнической системы, удаленно подключаемая к роботу, расположенному на подготовленном для него полигоне.

В 2021 году в ЦНИИ РТК был разработан виртуальный интерфейс для дистанционного управления манипулятором. Для его отработки был создан программный имитатор, для которого были разработаны трёхмерные модели манипулятора и окружающего пространства, разработан программный код, определяющий поведение манипулятора, и разработан протокол обмена данными между пультом оператора и программным имитатором. Для передачи данных видеокамер, расположенных в рабочей зоне манипулятора, был реализован программный компонент, который запрашивает изображение с камеры по её номеру и отправляет датаграмму. Датаграмма с изображением передаётся по протоколу UDP в пульт оператора. Физические объекты вокруг манипулятора моделируется с помощью встроенных функций физической среды Unity3D. Каждый объект состоит из его отображаемой трёхмерной модели и коллайдера, отвечающего за взаимодействия с другими объектами. Таким образом объекты, взаимодействуя с манипулятором, ведут себя реалистично: отталкиваются при столкновении, падают на вниз под действием силы тяжести и т.п. В результате использования программного имитатора пользователь виртуального интерфейса может управлять цифровой копией манипулятора и контролировать результат своих действий посредством искусственно сгенерированного видеоизображения в соответствующем окне интерфейса.

Виртуальная экспозиция направлена на широкую аудиторию и должна ориентироваться на неспециалистов без опыта управления робототехническими средствами. Она должна представлять посетителям не только рабочее место оператора, но и самого робота, его функциональное назначение, особенности и технические характеристики. Таким образом, к виртуальной экспозиции, как самостоятельной форме представления робототехнической системы, предъявляются требования отличные от требований к человеко-машинному интерфейсу рабочего места оператора.

Исходя из опыта проведения выставочных мероприятий, можно сказать, что виртуальная экспозиция должна иметь собственный упрощенный интерфейс, посредством которого посетители могут самостоятельно управлять демонстрацией [9, 10]. Особенностью виртуальной экспозиции является ограниченность времени взаимодействия с посетителем. В отличие от тренажеров или обучающих систем, виртуальная экспозиция должна быть рассчитана на визит длительностью всего 3-5 минут, за которые можно сформировать только общие представления. Если времени на ознакомление будет больше, то должны быть предусмотрены дополнительные информационные ресурсы, которыми посетитель может воспользоваться самостоятельно для более глубокого изучения представленной робототехнической системы.

Таким образом, чтобы быть эффективным средством коммуникации виртуальная экспозиция должна опираться на предыдущий пользовательский опыт вероятного посетителя, который как уже говорилось ранее, никогда не пользовался или мало пользовался очками виртуальной реальности. В данном случае можно воспользоваться двумерными интерфейсами, которыми большинство людей пользуется регулярно. Интеграция в виртуальную реальность плоских поверхностей на которых располагаются привычные всем элементы управления (кнопки, переключатели и выпадающие меню), а также минимизация количества требуемых действий позволяет решить проблему необходимости в обучении. Пример такого решения представлен на рисунке 2.

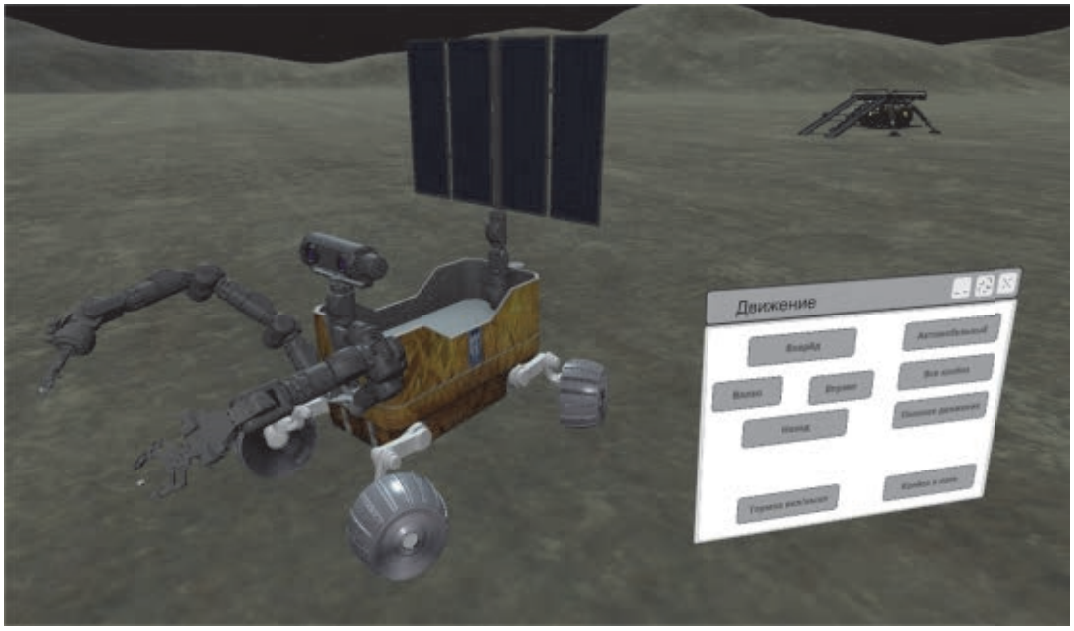


Рисунок 2 — Интеграция двумерных интерфейсов управления в виртуальную реальность

Посетителю необходимо лишь устно рассказать во время надевания гарнитуры виртуальной реальности о доступных ему способах взаимодействия. Далее, используя свой предыдущий опыт взаимодействия с компьютерной техникой, посетитель уверенно использует эти возможности по своему усмотрению. Таким образом, общее время обучения занимает незначительную часть времени погружения в виртуальную реальность.

Важным выбором, который должен сделать разработчик виртуальной экспозиции, является вариант реализации взаимодействия с элементами интерфейса. Наиболее интуитивно понятным является способ, при котором посетитель касается виртуальной рукой необходимого элемента интерфейса. Такой способ соответствует опыту взаимодействия человека с окружающей средой. Элементы интерфейса могут быть частью трёхмерных моделей, что ещё больше повысит иммерсивность, т.е. посетитель глубже погрузится в виртуальную экспозицию. Например, пользователь будет руками разделять робот на составные части касаясь элементов крепежа и таким образом лучше «прочувствует» геометрические размеры робота и его структуру. Но у такого способа есть ряд недостатков, главным из которых является необходимость дотягиваться до элементов управления, распределенных по виртуальному пространству. Другим существенным недостатком является то, что такие элементы управления могут восприниматься как пассивные изображения и не вызывать желания с ними взаимодействовать.

Другим способом взаимодействия с интерфейсом является использование «лазерных указок». Они выглядят как тонкие лучи, исходящие из указательных пальцев левой и правой руки. В месте пересечения луча с элементами управления появляется точка, которая выполняет функцию указателя мыши. Рукоятки виртуальной реальности обычно имеют несколько кнопок, которые ассоциируются с привычными кнопками мыши. Таким образом, панели интерфейсов хоть и присутствуют в виртуальном

пространстве, но могут быть обособлены от «физических» объектов виртуального мира. Также этот способ позволяет управлять на гораздо большем расстоянии, лишь направляя луч в сторону элементов интерфейса.

С точки зрения архитектуры программного обеспечения, виртуальную экспозицию можно строить по принципу локальной программы на диске или как клиент-серверное многопользовательское приложение. В случае локального виртуального музея пользователь получает полную самостоятельность в виртуальном пространстве и свободу изучения материала. В случае использования многопользовательского виртуального музея посетитель дополнительно получает возможность взаимодействия с другими посетителями, становится возможно проведение групповых занятий или живого общения с экскурсоводами и экспертами. Однако многопользовательский вариант требует наличия устойчивого соединения с сервером музея, хотя на современном уровне развития это не является существенной проблемой.

Поскольку экспозиция виртуального музея будет постоянно расширяться, то разумным решением является применение загружаемого дополнительного контента. Локальная программа на диске позволит загружать дополнительные виртуальные экспозиции по мере их создания разработчиками. Также это даёт возможность создавать и распространять пользовательские демонстрации в виде файлов описания сцены и трёхмерных моделей. При запуске программы происходит поиск локальных папок с файлами, удовлетворяющими требованиям к виртуальной экспозиции, создаётся список доступных к запуску демонстраций.

Виртуальная экспозиция требует для своего запуска комплекта оборудования, которое использует компьютерную технику. В ЦНИИ РТК используется шлем HTC Vive Pro eye [11] для отображения рук оператора используются рукоятки Valve Index [12]. Программа виртуального музея запускается на персональном компьютере, к которому подключен шлем и комплект сенсоров, обеспечивающих отслеживание положение шлема и рукояток в пространстве.

Этот комплект виртуальной реальности отличается от других аналогичных систем наличием встроенного окулографа, который позволяет отслеживать направление взгляда, что в перспективе позволит проводить исследования поведения посетителей музея, оценивать к каким частям они проявляют наибольший интерес, а какие объекты остаются без внимания.

Поскольку разработка программного обеспечения ведётся в Unity3D, в проект импортирована библиотека OpenXR [13] которая обеспечивает независимость программного обеспечения от используемого оборудования. Разработанное ПО можно легко скомпилировать под комплект виртуальной реальности от другого производителя.

Виртуальная экспозиция является важным шагом на пути развития традиционного выставочного искусства, позволяющим раскрыть для широкой аудитории возможности перспективных робототехнических комплексов. При разработка виртуальной экспозиции должны использоваться методы инженерно-психологического проектирования. Разработчик виртуальной демонстрации может заимствовать результаты, полученные при разработке системы управления и тренажеров, но должен учитывать такие особенности, как ограниченное время взаимодействия с посетителем и необходимость сформировать общее представление о робототехнической системе. Для повышения реалистичности демонстрации могут использоваться симуляторы робота и окружающей среды, а также дистанционное управление реальными образцами роботов.

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 075-01623-22-02 от 03.06.2022 «Разработка и апробация типового формата, регламента, критериев, методик и образовательных комплектов для проведения соревновательных мероприятий по направлению «Мехатроника и робототехника» на федеральном и международном уровне. Методическое сопровождение проекта «Научный микроблог» в среде научных, научно-производственных и образовательных организаций высшего образования России» (№ 3128-22).

Литература

1. Paul Milgram, Fumio Kishino A TAXONOMY OF MIXED REALITY VISUAL DISPLAYS [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/231514051_A_Taxonomy_of_Mixed_Reality_Visual_Displays (дата обращения 12.10.2022)]

2. Шарапова Е. С., Растимешина Т. В. Виртуальный музей и рождение новой философии экспозиционного пространства // Экономические и социально-гуманитарные исследования. 2020. № 1 (25). С. 109-115. EDN: CTOKFO

3. Максимова А.С. Аудитория в цифровом мире: как изучать взаимодействие с искусством, опосредованное технологиями? // «Что-то новое и необычное»: аудитория современного искусства в крупных городах России. Екатеринбург, 2018. С. 290–303.

4. Коровина В.В., Долгова Е.М., Вершина В.С. Восприятие использования интерактивных технологий в музеях // Музей. Памятник. Наследие. 2019. №1(5). С. 61-68.

5. Сергеев А.В., Сергеев С.Ф. Редукция сложности в интерфейсах робототехнических и эргатических систем // Робототехника и техническая кибернетика. 2019.Том 7. № 2. С. 109-119.

6. Сергеев А.В., Гук М.Ю. Управление мобильным роботом космического назначения с применением виртуальной реальности и силомоментного очувствления // Пилотируемые полеты в космос. 2018. Вып. 4. С. 44-52.

7. Васильев А. В., Сергеев А. В., Гук М. Ю., Сергеев С. Ф., Кондратьев А. С., Даляев И. Ю., Balachandran R., Riecke C., Weber B., Рудакова О. В. Проект "Контур-3" - новый шаг к исследованию Луны с помощью напланетных роботов // Пилотируемые полеты в космос: Материалы XIII Международной научно-практической конференции. Звездный городок, 2019. С. 54-56.

8. Стрелков Ю.К. Инженерная и профессиональная психология / Ю.К. Стрелков. – Текст: непосредственный. – Москва: Академия. – 2001. – 360 с.

9. Сергеев А.В. Мультимерные интерфейсы в активной управляющей индуцированной виртуальной среде / А.В. Сергеев, А.Ю. Юсупова, С.Ф. Сергеев // Робототехника и техническая кибернетика. - Т. 10. - №4. - Санкт-Петербург: ЦНИИ РТК. - 2022.

10.Сергеев А.В Применение технологии виртуальной реальности для популяризации достижений космической робототехники / Сергеев А.В., Гук М.Ю., Даляев И.Ю // Материалы XIII Международной научно-практической конференции "Пилотируемые полеты в космос", ФГБУ "НИИ ЦПК", Звездный городок, 13–15 ноября 2019 г. – С. 16–18.

11.Шлем виртуальной реальности VIVE Pro eye [Электронный ресурс]. URL: https://business.vive.com/ru/product/vive-pro-eye/ (дата обращения 11.10.2022)]

12.Беспроводные контроллеры Valve Index [Электронный ресурс]. URL: https://www.valvesoftware.com/ru/index/controllers (дата обращения 11.10.2022).

13.Библиотека OpenXR [Электронный ресурс]. URL: https://www.khronos.org/openxr/ (дата обращения 11.10.2022)]

КРУГЛЫЙ СТОЛ «РОБОТИЗАЦИЯ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ»

И.Ю. Даляев[1], В.М. Копылов[1], А.А. Трутс[1], Ю.П. Зайков[2], В.А. Ковров[2], А.С. Холкина[2]

РОБОТИЗАЦИЯ ПИРОХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ОЯТ

[1]ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петерубрг, igor@rtc.ru; [2]Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН, г. Екатеринбург

Аннотация

В работе рассматриваются подходы по созданию специализированного манипулятора на участке пирохимической переработки отработанного ядерного топлива с учетом особенности данной технологии, которая заключается в наличии очень высоких уровней ионизирующего излучения и наличии инертной среды. Описывается технический облик и состав манипулятора, его особенности и подходы по управлению. Подобные манипуляторы должны обеспечить непрерывную работу пирохимического участка.

Ключевые слова

Внутрикамерный манипулятор, пирохимическая технология, переработка ОЯТ, роботизация.

I.Yu. Dalyaev[1], V.M. Kopylov[1], A.A. Truts[1], Yu.P. Zaikov[2], V.A. Kovrov[2], A.C. Kholkina[2]

PYROCHEMICAL TECHNOLOGY OF SPENT FUEL PROCESSING ROBOTIZATION

[1]The Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetic, St. Petersburg, Russian, igor@rtc.ru; [2]Institute of High Temperature Electrochemistry, Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russian

Abstract

The paper describes approaches to create a specialized manipulator at the site of pyrochemical processing of spent nuclear fuel, taking into account the peculiarities of this technology, which consists in the presence of very high levels of ionizing radiation and the presence of an inert environment. The technical appearance and composition of the manipulator, its features and management approaches are described. Such manipulators should ensure the continuous operation of the pyrochemical site.

Key words

In-chamber manipulator, pyrochemical technology, spent fuel processing, robotization.

Развитие ядерной энергетики невозможно без развития и внедрения современных технологий. Создание основ крупномасштабной ядерной энергетики при замыкании ядерного топливного цикла (ЯТЦ) на базе реакторов на быстрых нейтронах занимается проектное направление (ПН) «Прорыв», одним из направлений которого является пирохимическая технология переработки отработанного ядерного топлива (ОЯТ). Пирохимическая технология позволяет обеспечить короткие времена внешнего топливного цикла, а значит приступать к переработке ОЯТ без длительного периода выдержки [1].

При реализации чисто пирохимической технологии переработки ОЯТ после операции электролитического рафинирования катодный осадок подвергают потенциостатическому электролизу с растворимым анодом для полного разделения делящихся материалов и минорных актинидов. Полученный катодный продукт подвергается очистке от электролита и направляется на рефабрикацию. Специфика пирохимической технологии – возможность переработки ОЯТ с высоким излучением и тепловыделением, что позволяет в разы сократить время выдержки ОЯТ перед переработкой по сравнению с временем, необходимым при использовании водной технологии [2].

Определённые ограничения на подходы к использованию средств механизации или роботизации накладываются при работе непосредственно с ОЯТ короткой выдержки и, как следствие – при сверхкритических уровнях ионизирующего излучения. Второй особенностью является работа в специальной атмосфере инертных камер.

Технологический процесс пирохимического передела подразумевает передачу материала из одного аппарата в другой, а также обслуживание (включая замену блоков) самих аппаратов.

С целью реализации возможности технологического обслуживания аппаратов, предлагается использование специализированного внутрикамерного манипулятора с вынесенными приводами, чтобы обеспечить высокую радиационную стойкость принимаемых технических решений. Сервисная зона такого манипулятора имеет цилиндрическую форму и должна перекрывать практически весь объем инертной камеры. Основными задачами манипулятора будет обслуживание аппаратов в части передачи материала между ними, а также работа с шлюзовой системой для передачи контейнеров с материалом между камерами.

Возможность по использованию робототехники

Большинство технологических операций пирохимической переработки ОЯТ происходят в инертной атмосфере, с веществами, обладающими высокой радиоактивностью. Поскольку основная мощность излучения приходится на гамма-кванты с энергией более 0,5МэВ, ослабление излучения эластичными или тканеподобными материалами неэффективно, ввиду низкого коэффициента поглощения таких материалов в диапазоне высоких энергий. Таким образом, работа с ОЯТ в перчаточных боксах невозможна, поскольку бокс не обеспечивает сколько-нибудь заметного ослабления радиоактивного излучения. Единственным возможным решением является использование манипуляторов – копирующих либо управляемых.

Традиционно в инертных камерах используются копирующие манипуляторы, управляемые операторами. Основным ограничением в использовании таких манипуляторов является их грузоподъемность, как правило, не превосходящая 10 кг. Для обслуживания и ремонта технологических аппаратов желательно иметь манипулятор с грузоподъемностью порядка 100 кг.

Для увеличения безопасности производства, рекомендуется обслуживание и ремонт всех технологических аппаратов пирохимического передела производить с помощью манипулятора с программным управлением. Для выполнения операций в недетерминированной среде (например, при падении одного из технологических аппаратов в результате нештатной сиутации) необходимо предусмотреть ручное управление манипулятором с контролем положения конечного звена по показаниям видиконов, установленных внутри инертной камеры.

Манипулятор для инертных камер должен решать следующие задачи:

- перенос грузов массой порядка десятков килограмм,
- отвинчивание и завинчивание болтов со специальным исполнением головки,
- изъятие и установка в аппараты корзин с продуктами переделов, электродов, датчиков.

Краткое описание пирохимической технологии

Пирохимическая схема включает следующие базовые технологические операции:

- высокотемпературная обработка порошка окисленного СНУП ОЯТ или волоксидированного МОКС ОЯТ,
- восстановление оксидов актинидов до металла («металлизация»),
- рафинировочный переплав продуктов «металлизации»,
- электролитическое рафинирование металлического сплава для получения конечного продукта - сплава металлических актинидов,
- «мягкое» хлорирование для переработки анодного остатка.

Каждую технологическую операцию предлагается разбить на участки со своими установками. Высокотемпературная обработка включает две технологические установки: высокотемпературной обработки ОЯТ и изготовления шашек. Участок металлизации включает две установки: «металлизации» и отгонки электролита от продуктов «металлизации». Рафинировочный переплав включает две установки: рафинировочного переплава с узлом изготовления металлических анодов и установку электролиза. Участок электролитического рафинирования включает две установки: электролитического рафинирования и переплавки катодного продукта. Участок хлорирования включает три установки: «мягкого» хлорирования, оксидного осаждения, окислительной плавки.

Все установки располагаются в условиях защитной инертной атмосферы, часть функций у установок в процессе проектирования может объединяться, однако в целом видятся две основные группы операций, которые должна осуществлять манипуляционная система: транспортные по передаче продукта между установками и сервисные, по обслуживанию установок и замене элементов, фильтров. С учетом высоких уровней активности, было принято решение проектировать манипулятор с вынесеными приводами за теневую защиту, что позволит существенно увеличить их срок службы. Внутри камеры будет располагаться механическая часть манипулятора, стойкость которой к ионизирующему излучению крайне велика ввиду использования только конструкционных материалов.

Манипулятор внутрикамерный

Высокие требования к радиационной стойкости манипулятора приводят к единственно возможному техническому решению – удалению как управляющей электроники, так и самих приводных агрегатов. В качестве основной для внутрикамерного манипулятора была определена цилиндрическая система координат, т.к. предполагается расположить технологические установки вокруг рабочей зоны манипулятора.

Таким образом, манипулятор состоит из четырех основных компонент:

- колонны манипулятора,
- захватного устройства,
- коробки отбора мощности,
- комплекта приводов.

Колонна манипулятора с установленными на ней захватным устройством размещается в инертной камере. Коробка отбора мощности устанавливается на подготовленный фланец инертной камеры, в ее нижней части, и размещается снаружи камеры. Комплект приводов содержит шесть сервомоторов, оснащенных редукторами со сниженным люфтом и датчиками выходного положения вала. Сборка мотор-редуктора устанавливается на специально подготовленное место в коробке отбора мощности, причем предусмотрена возможность роботизированной установки каждого привода. Общий вид манипулятора и приведен на рисунке 1.

Колонна манипулятора и захватное устройство находятся внутри инертной камеры вместе с оборудованием, в то время как коробка отбора мощности располагается в подкамерном пространстве за теневой защитой, что позволяет снизить уровень ионизирующего излучения на привода. Грузоподъемность манипулятора в рабочей зоне до 150 кг позволяет поднимать узлы установок блоками.

Коробка отбора мощности принципиально состоит из двух частей – блока электромеханических приводов (мотор-редукторов с датчиками) и блока передачи момента, представляющего собой набор механических передач. Общий вид коробки отбора мощности приведен на рисунке 2.

Основное уплотнение главной колонны манипулятора состоит из двух частей – динамического и статического уплотнений. Первое расположено над узлом опорных подшипников, и является основным при штатной работе. Оно выполнено в виде щелевого уплотнения. Такое решение предохраняет от проникновения через него пыли и мелких предметов, способных повредить контактные поверхности в опорном подшипнике. Вторая часть уплотнения является статической, и представляет собой торцевое уплотнение, работающее только при неподвижности центральной колонны. Оно вводится в

качестве предосторожности на случай отказа насоса восполнения утечек, и приводится в действие пружиной сжатия, удерживаемой в сжатом открытом состоянии с помощью штифта. По сигналу датчика уровня о недопустимом снижении уровня жидкости в динамическом уплотнении срабатывает электромагнитное реле, втягивающее штифт торцевого уплотнения, и полость инертной камеры надежно герметизируется.

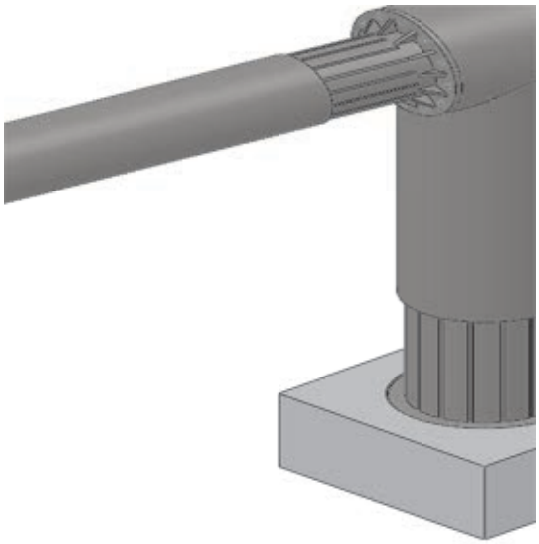
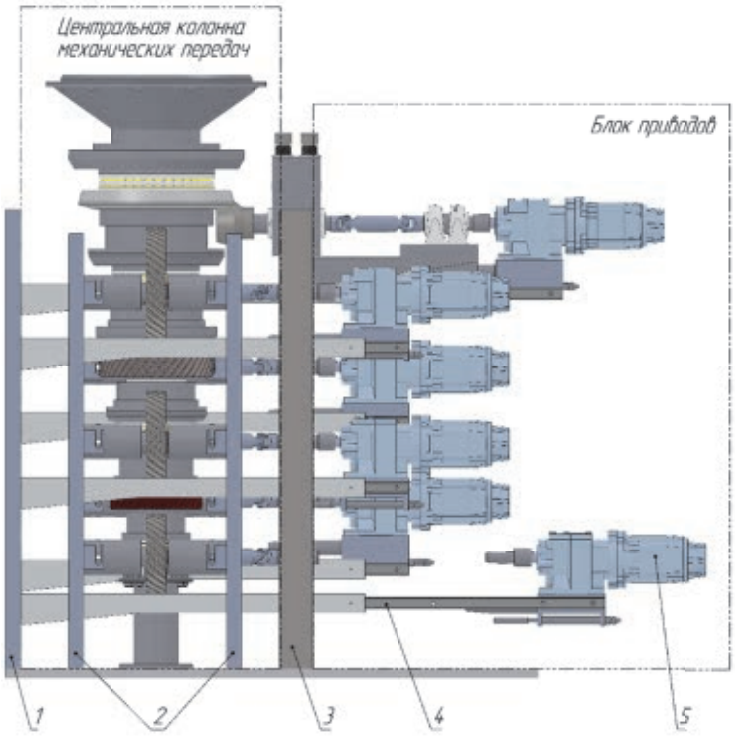


Рисунок 1 — Общий вид манипулятора



1 – Задняя стенка коробки отбора мощности, 2 – Перегородки для монтажа механических передач, 3 – Передняя стенка коробки отбора мощности, 4 – Телескопические направляющие, 5 – Мотор-редуктор

Рисунок 2 — Общий вид коробки отбора мощности

В качестве рабочей жидкости динамического уплотнения предполагается использование силоксанов. Эти кремний-органические масла обладают, с одной стороны, крайне низкой упругостью паров, что позволяет не беспокоиться о загрязнении инертной среды камеры парами смазки. С другой стороны, они обладают высокой радиационной стойкостью благодаря большой энергии связей кремние-

вой структуры. Основным назначением силоксанов в технике является смазывание узлов вакуумного оборудования, работающих при скоростях до 100 об/мин. Таким образом, утечка динамического уплотнения может быть направлена для смазывания подшипниковых опор и зубчатых передач в коробке отбора мощности.Восполнение утечки динамического уплотнения выполняется перистальтическим насосом, поскольку требуемый напор и расход удовлетворяют возможностям таких насосов

Манипулятор должен работать в автоматическом режиме по заранее известной циклограмме, однако должен обладать возможностью перехода в ручной режим управления при внештатных ситуациях. В качестве основной технологии при управлении манипулятором и формировании задач используется виртуальная среда. В виртуальной среде оператор имеет возможность беспрепятственно перемещаться по всему объему виртуального пространства (в пределах, установленных разработчиком системы управления), в том числе, проходить сквозь объекты, включать и отключать отображение отдельных объектов и групп объектов по типу, что позволяет ему подбирать наиболее удобные положения для наблюдения за происходящими процессами.

Основным предназначением виртуальной среды является предоставление оператору возможностей по планированию работы манипулятора. Запуск траектории на отработку в штатном режиме возможен только после проверки безопасности реализации траектории.

В ЦНИИ РТК создана индуцированная виртуальная среда управления манипулятором, предназначенным для выполнения технологических и транспортных операций внутри защитной камеры с инертной атмосферой. Для повышения надёжности работы системы через уменьшение неточностей модели был предложен способ обновления виртуальной среды по данным СТЗ, структурная схема которой также была представлена.

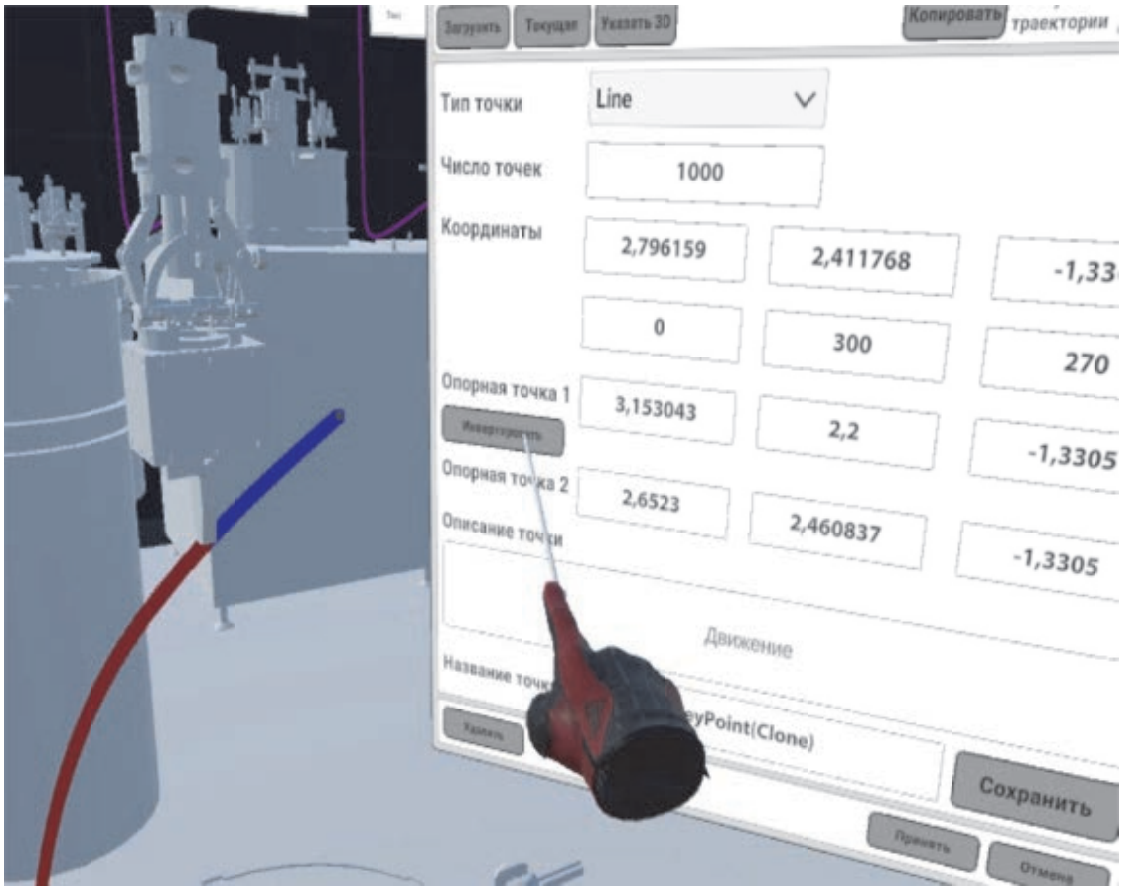


Рисунок 3 — Взаимодействие оператора и виртуального интерфейса

Для оценки качества разработанной среды управления было проведено экспериментальное исследование человеко-машинного взаимодействия на группе добровольцев. Проведенный эргономиче-

ский эксперимент подтвердил возможность использования индуцированной виртуальной среды для управления манипулятором и простоту адаптации новых операторов к условиям виртуальной среды [3, 4]. Взаимодействие оператора и виртуального интерфейса приведено на рисунке 3.

С целью роботизации пирохимической технологии, наряду с созданием макетов аппаратов и отработки самой технологии пирохимической переработки ОЯТ в ИВТЭ УрО РАН, в 2021 году в ЦНИИ РТК был разработан внутрикамерный манипулятор. Манипулятор обеспечивает работу оборудования, выполняя технологические (грузовые) и сервисные функции. Управлять манипулятором предполагается из среды виртуальной реальности, для чего был разработан интерфейс оператора и производится дальнейшая отработка подходов по управлению на моделях.

Основными задачами на 2022-2023 года является изготовление манипулятора и отработка его системы управления для последующей интеграции в инертные камеры и проведения экспериментальной отработки с макетами аппаратов.

Литература

1. Белая книга ядерной энергетики. Замкнутый ЯТЦ с быстрыми реакторами / под общ. ред. Проф. Е.О. Адамова. – М.: Изд-во АО «НИКИЭТ», 2020. – 502 с.

2. Повышая градус. Журнал Вестник атомпрома, №6 июль-август 2022.

3. Сергеев А.В., Титов В.В., Шардыко И.В. Индуцированная виртуальная среда для управления манипулятором, предназначенная для работы с радиоактивными материалами // Робототехника и техническая кибернетика, 2021 № 9. С. 32-41.

4. Сергеев А.В., Гук М.Ю. Управление мобильным роботом космического назначения с применением виртуальной реальности и силомоментного очувствления // Пилотируемые полеты в космос. 2018. Вып. 4. С. 44-52.

А.А. Волошкин[1], Л.А. Рыбак[1], А.В. Ноздрачева[2], В.В. Черкасов[1], Т.А. Семененко[2]

РОБОТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА НА БАЗЕ ДЕЛЬТА МАНИПУЛЯТОРА ДЛЯ АЛИКВОТИРОВАНИЯ В ЗАКРЫТЫХ КАМЕРАХ И БОКСАХ

[1]Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, voloshkin.artem.a@gmail.com; [2]ФГБУ «Национальный исследовательский центр эпидемиологии и микробиологии им. Н.Ф. Гамалеи» Минздрава РФ, Москва

Аннотация

В настоящее время потребность в создании роботизированных средств помощи людям в средах неблагоприятных для здоровья неуклонно растет, однако существуют среды, в которых затруднительна работа и манипулятора. Представлен обзор таких задач. Рассмотрены аналоги и предложено техническое решение на базе delta-робота с вынесенными за пределы бокса движителями, для манипуляции с биообразцами. Изложены результаты разработки оснащения выходного звена delta-робота, дозирующим устройством, которое позволяет роботизированной системе производить раскапывание сыворотки крови в пробирки в закрытом боксе. В отличии от известных аналогов, предложенное дозирующее устройство позволяет осуществлять забор жидкости и смены наконечников используя одни приводной вал. Построены 3D модель и макет дозирующего устройства. Приведен кинематический расчет Delta-робота с предложенной компоновкой.

Ключевые слова

Delta-робот, дозирующее устройство, пробоподготовка, закрытый бокс.

A.A. Voloshkin[1], L.A. Rybak[1], A.V. Nozdracheva[2], V.V. Cherkasov[1], A.V. Semenenko[2]

ROBOTIC SYSTEM BASED ON A DELTA MANIPULATOR FOR ALIQUATION IN CLOSED CHAMBERS AND BOXES

[1]Belgorod State Technological University V.G. Shukhov, Russia, voloshkin.artem.a@gmail.com; [2]National Research Center of Epidemiology and Microbiology N.F. Gamalei of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow

Abstract

Currently, the need to create robotic means of helping people in environments unfavorable to health is steadily growing, however, there are environments in which the work of the manipulator is difficult. The presented overview of existing tasks in which the operation of the manipulator is difficult. An overview of approaches to solving such problems is presented, analogs are considered and a technical solution based on a Delta robot with thrusters outside the closed chamber, designed for manipulating biological samples, is proposed. The results of the development of equipping the delta robot output link with a dosing device that allows the robotic system to dig up blood serum into test tubes in a closed box are presented. Unlike known analogues, the proposed dosing device allows for fluid intake and tip changes using a single drive shaft. A 3D model and a layout of the dosing device were built. The kinematic calculation of the Delta robot with the proposed layout is given.

Key words

Delta-robot, dosing device, sample preparation, closed box.

В настоящее время потребность в создании роботизированных средств помощи людям в средах неблагоприятных для здоровья неуклонно растет, однако существуют среды, в которых затруднительна работа и манипулятора. Такие манипуляторы чаще всего размещаются в закрытых камерах и

боксах, в которых на механизм действуют экстремальная температура, агрессивные химические соединения или радиоактивное излучение. Одним из примеров использования роботизированных комплексов является создание низкотемпературных хранилищ для нужд банков биологических образцов в биомедицине. В настоящее время на фоне пандемии Covid-19 отрасль биобанкирования стремительно развивается, и требует совершенствования и внедрения, прежде всего, высокотехнологических решений.

Биологические образцы, в том числе сыворотка крови, являются потенциальным источником контаминации оборудования, что сопровождается риском инфицирования обслуживающего персонала. В условиях биобанка образцы подвергаются первичной обработке (аликвотирование и пробоподготовка) и закладке на хранение в низкотемпературное хранилище (преаналитический этап исследования). По мере необходимости, созданные коллекции образцов, используют для проведения медицинских исследований в различных областях от изучения геномной патологии до оценки популяционного иммунитета в отношении актуальных инфекций. Основой таких исследований является определение уровня значимых маркеров в биообразцах. В этой связи ключевое значение имеет понятие стабильности. Стабильность - это способность биологического материала сохранять первоначальные свойства определенного маркера в течение некоторого периода времени в определенных пределах при хранении в заданных условиях. Наиболее оптимальным для поддержания стабильности маркеров и обеспечения сохранности биообразцов является использование высокопроизводительных автоматизированных систем хранения биологического материала, которые должны гарантировать поддержание температуры в диапазоне от -20°C и ниже, исключать влияние человеческого фактора при хранении, обеспечивать точность идентификации и эффективное управление движением биоматериала с высокой повторяемостью. [1, 2]. Таким образом, актуальным является создание роботизированных комплексов, осуществляющих манипуляции с биообразцами в неблагоприятных условиях потенциальной контаминации оборудования инфекционными патогенами и при низких температурах. Экспериментальное изучение влияния температуры и длительности хранения на сохранность специфических маркеров, используемых в популяционных сероэпидемиологических исследованиях, проводят специалисты Национального исследовательского центра эпидемиологии и микробиологии имени Н. Ф. Гамале́и Минздрава РФ [3, 4]. Результаты проведенных исследований позволят разработать научно обоснованные требования к организации технологического процесса биобанкирования.

Другая отрасль, в которой активно используется пробоподготовка в опасной для здоровья среде- это атомная промышленность. Так Семенов М.А., и Лукин С.А, начальник ЦЗЛ ФГУП «ПО Маяк» в своем докладе для конференции «Летняя школа робототехники в Сириусе», обозначили потребность в создании роботизированных средств для автоматизации операций дозированной фасовки в защитных камерах и боксах аналитической лаборатории (рис. 1а). Также из доклада следовало, что роботов использую для загрузки и выгрузки облучённых образцов материалов для изделий, используемых в атомной технике (рис. 1б).

а) б)

Рисунок 1 — Проекты ЦЗЛ ФГУП «ПО Маяк»: а) роботизация аналитических измерений; б) загрузка и выгрузка облученных образцов в закрытой камере

Один из способов работы манипулятора в неблагоприятной среде - это вынести движители за пределы защищенного бокса, что было описано в работе [5] для последовательного манипулятора МР-48. Однако для задач пробоподготовки достаточно 3 степени подвижности, в таком случае более перспективным решением может стать использование параллельного робота-delta. Это упростит конструкцию и позволит обеспечить большую скорость движения выходного звена, что является решающим при выполнении ряда операций. Предложенное решение апробировано при проведении исследования по разработке роботизированных станций по аликвотированию биологической жидкости на основе delta-робота в открытых камерах [6].

Этот робот был изобретен в 80-х годах Клавелем [7]. Представлен на рынке, первоначально для операций по сортировке и упаковке, а затем для тактильных задач и других целей (медицинские и фармацевтические), и не в последнюю очередь для 3D-печати [8, 9]. Кинематика delta-робота с вращающимися исполнительными механизмами предложена в работе M. López, et al, 2006 [10], Ряд авторов представили подробный кинематический анализ для delta-робота с поступательными приводными кинематическими парами [11, 12]. На основе выше указанных работ составим математическую модель delta-робота.

Кинематический расчет

Delta-робот представляет собой манипулятор параллельной структуры, состоящий из платформы соединенной с тремя опорами посредствам кинематических цепей типа P(SS)2 (рис. 2).

Поступательные приводные кинематические пары являются вертикальными и соединяют три ползуна с фиксированным основанием. Точки A_1, A_2 и A_3 являются средней линией коротких сторон параллелограммов (AP) соединенных с ползунами, а точки P_1, P_2 и P_3 - вершины подвижной платформы. Точки B_1, B_2 и B_3 - это вертикальные проекции точки A_1, A_2 и A_3 на плоскости основания. Неподвижная система координат OXYZ расположена в центре основания, ось X параллельна отрезку B_1B_2 и ориентирована от B_1 до B_2, а ось Y ориентирована на точку B_3.

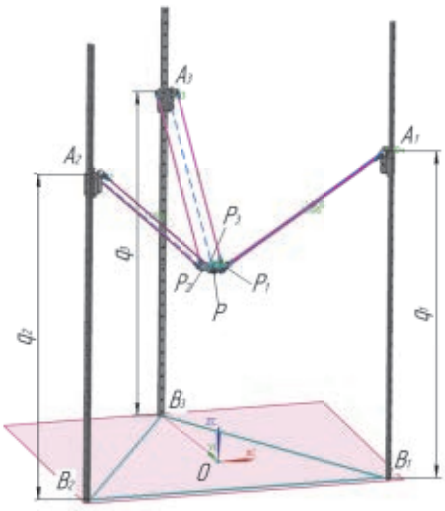


Рисунок 2 — Архитектура дельта-робота с призматическими шарнирами

Обе тройки $B_1B_2B_3$ и $P_1P_2P_3$ обозначены как равносторонние треугольники, прикрепленные к основанию и платформе соответственно. Длины сторон этих треугольников обозначены как S_B (треугольник в основании) и S_P. (треугольник подвижной платформы). Точка P находится в центре платформы.

Значения обобщенных координат робота обозначим как q_1, q_2 и q_3 и представляют координаты по оси Z точек A_1, A_2 и A_3 относительно фиксированной ссылки рамы. Вектор определяющий положение центра P подвижной платформы относительно неподвижной системе координат определим, как

$$OP = OB_i + B_iA_i + A_iP_i + P_iP \quad (1)$$

Предполагая, что длина сегментов A1P1, A2P2 и A3P3 постоянна во времени и равна l, возможно вывести следующие уравнения:

$$\begin{gathered}\left(x_P + \frac{S_B}{2} - \frac{S_P}{2}\right)^2 + \left(y_P + \frac{S_B}{2\sqrt{3}} - \frac{S_P}{2\sqrt{3}}\right)^2 + (z_p - q_1)^2 = l^2 \\ \left(x_P - \frac{S_B}{2} + \frac{S_P}{2}\right)^2 + \left(y_P + \frac{S_B}{2\sqrt{3}} - \frac{S_P}{2\sqrt{3}}\right)^2 + (z_p - q_1)^2 = l^2 \\ x_P^2 + \left(y_P - \frac{S_B}{\sqrt{3}} + \frac{S_P}{\sqrt{3}}\right)^2 + (z_p - q_1)^2 = l^2\end{gathered} \quad (2)$$

Обратная задача кинематики для этого механизма довольно проста, так как совместные параметры q_1, q_2 и q_3 могут быть выражены явным образом как функция координат платформы:

$$\begin{gathered}q_1 = z_p \pm \sqrt{l^2 - \left(x_P + \frac{S_B}{2} - \frac{S_P}{2}\right)^2 + \left(y_P + \frac{S_B}{2\sqrt{3}} - \frac{S_P}{2\sqrt{3}}\right)^2} \\ q_2 = z_p \pm \sqrt{l^2 - \left(x_P - \frac{S_B}{2} + \frac{S_P}{2}\right)^2 + \left(y_P + \frac{S_B}{2\sqrt{3}} - \frac{S_P}{2\sqrt{3}}\right)^2} \\ q_3 = z_p \pm \sqrt{l^2 - x_P^2 + \left(y_P - \frac{S_B}{\sqrt{3}} + \frac{S_P}{\sqrt{3}}\right)^2}\end{gathered} \quad (3)$$

Ввиду неоднозначности решения обратной задачи для одной координаты точки P существует 2 возможных положения приводных координат для каждой из трёх кинематических цепей.

$$\det(J_A) = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_1}{\partial x_P} & \frac{\partial Q_1}{\partial y_P} & \frac{\partial Q_1}{\partial z_P} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial x_P} & \frac{\partial Q_2}{\partial y_P} & \frac{\partial Q_2}{\partial z_P} \\ \frac{\partial Q_3}{\partial x_P} & \frac{\partial Q_3}{\partial y_P} & \frac{\partial Q_3}{\partial z_P} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где Q_i соответствуют формулам (3) координат q_i. При этом элементы матрицы Якоби будут иметь следующие формулы:

$$\frac{\partial Q_1}{\partial x_P} = \mp \frac{S_B - S_P + 2 \cdot x_P}{2 \cdot \sqrt{\left(y_P + \frac{\sqrt{3}}{6}(S_B - S_P)\right)^2 - \left(\frac{S_B}{2} - \frac{S_P}{2} + x_P\right)^2 + l^2}}, \quad \frac{\partial Q_2}{\partial x_P} = \mp \frac{S_P - S_B + 2 \cdot x_P}{2 \cdot \sqrt{\left(y_P + \frac{\sqrt{3}}{6}(S_B - S_P)\right)^2 - \left(\frac{S_P}{2} - \frac{S_B}{2} + x_P\right)^2 + l^2}},$$

$$\frac{\partial Q_3}{\partial x_P} = \mp \frac{x_P}{\sqrt{\left(y_P + \frac{\sqrt{3}}{3}(S_B - S_P)\right)^2 + l^2 - x_P{}^2}}, \quad \frac{\partial Q_1}{\partial y_P} = \pm \frac{2 \cdot y_P + \frac{\sqrt{3}}{3}(S_B - S_P)}{\sqrt{2 \cdot \left(y_P + \frac{\sqrt{3}}{6}(S_B - S_P)\right)^2 - \left(\frac{S_B}{2} - \frac{S_P}{2} + x_P\right)^2 + l^2}},$$

$$\frac{\partial Q_2}{\partial y_P} = \pm \frac{2 \cdot y_P + \frac{\sqrt{3}}{3}(S_B - S_P)}{\sqrt{2 \cdot \left(y_P + \frac{\sqrt{3}}{6}(S_B - S_P)\right)^2 - \left(\frac{S_P}{2} - \frac{S_B}{2} + x_P\right)^2 + l^2}}, \frac{\partial Q_3}{\partial y_P} = \pm \frac{2 \cdot y_P + \frac{2\sqrt{3}}{3}(S_B - S_P)}{\sqrt{2 \cdot \left(y_P + \frac{\sqrt{3}}{3}(S_B - S_P)\right)^2 + l^2 - x_P{}^2}},$$

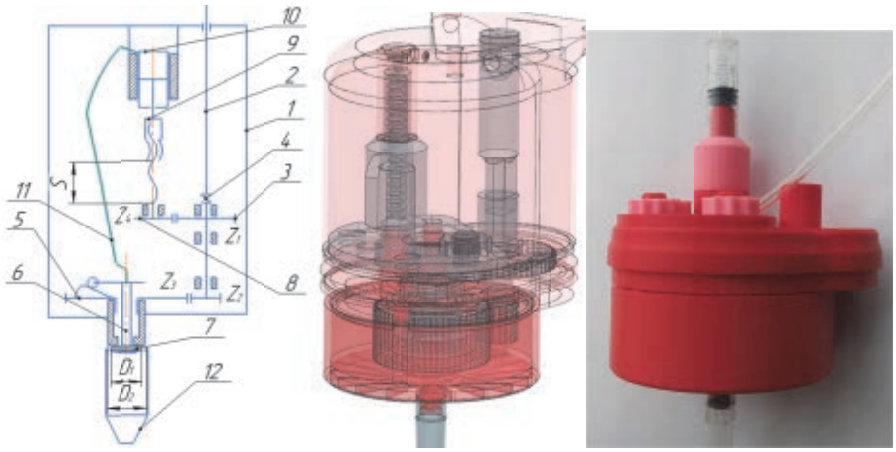
$$\frac{\partial Q_1}{\partial z_P} = 1, \quad \frac{\partial Q_2}{\partial z_P} = 1, \quad \frac{\partial Q_3}{\partial z_P} = 1$$

Верхний и нижний знаки в формулах элементов матрицы Якоби соответствуют верхнему и нижнему знаку в решении обратной задачи кинематики (3) для каждой из приводных координат.

Устройство и принцип действия

Для оснащения выходного звена delta-робота, было разработано дозирующее устройство, которое позволяет роботизированной системе производить аликвотирование (разделение образца сыворотки крови на пробирки меньшего объёма) в закрытом боксе. В отличии от известных аналогов, предложенное дозирующее устройство позволяет осуществлять забор жидкости и смену наконечников используя один приводной вал. Это достигнуто за счет использования кулачкового зубчатого колеса, которое в определенный момент вращения осуществляет поступательное движение вместо дополнительного привода, что позволяет осуществить захват наконечника.

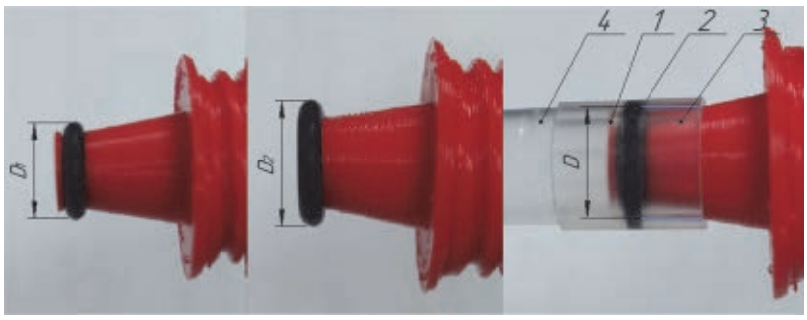
Дозирующее устройство приведено на (рис. 3) и состоит из корпуса 1, в котором установлен приводной вал 2, соединенный с ведущим зубчатым колесом 3, за счет муфты 4. Ведущее зубчатое колесо обеспечивает вращение зубчатого колеса с кулачком 5, которое в свою очередь обеспечивает поступательное движение штока 6 и раздавливание кольца уплотнительного 7, в результате чего обеспечивается фиксация наконечника 12. Пневматическая часть раскапывающей головки состоит из шестерни с винтом 8, поршня 9 и пневмоцилидра 10, которая связана со штоком стерильной трубкой 11.



а) б) в)

Рисунок 3 — Дозирующее устройство, а – схема, б – 3D модель, в) – макет

Был построен макет дозирующего устройства и проведены лабораторные испытания, для этого было подобрано уплотнительное кольцо из мягкой резины, диаметр D_1 которого был меньше одноразового сменного наконечника D, непосредственно контактирующего с сывороткой крови (рис. 4). При раздавливании резинового кольца происходит увеличение до диаметра D_2 и фиксация наконечника. Было проведен пробный забор жидкости, в результате которого было подтверждена герметизация при таком соединении.



а) б) в)

Рисунок 4 – Шток дозирующего устройства: а) – исходный диаметр,
б) – диаметр при втянутом штоке, в) – фиксация и герметизация наконечника: 1 – шток, 2 – уплотнительное кольцо, 3 – конус фиксатора, 4 - наконечника

Это техническое решение позволяет вынести движитель дозирующей головки за пределы бокса. Используя возможности компоновки delta-робота, разместим двигатели всей системы за пределами зарытого бокса (рис. 5).

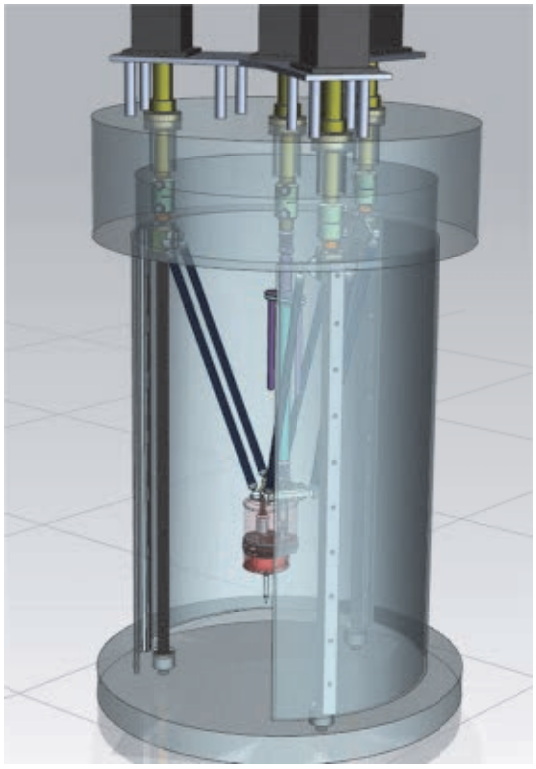


Рисунок 5 — 3D модель delta-робота.

Симуляция трехмерной кинематической модели.

С использованием САПР системы NX создана динамическая модель delta-робота, включающая дозирующее устройство. Результаты симуляции позволили определить требуемый момент на приводных валах движителей для компенсации инерции манипулятора при движении, определены пределы скорости и ускорения выходного звена в зависимости от мощности приводов. Для проведения симуляции заданы вращения каждого из двигателей (рис. 6).

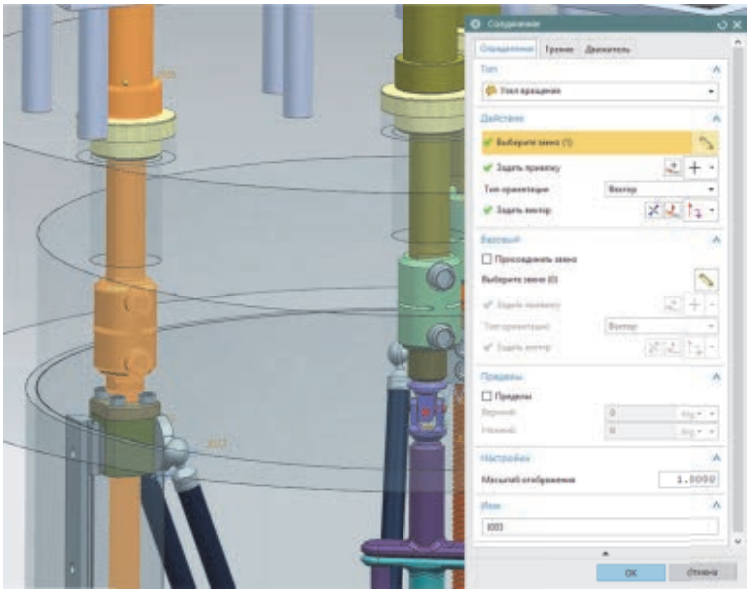


Рисунок 6 — Этап создания ограничений

После того как движения были заданы определяем параметры решателя. На данном этапе происходит назначение таких основных переменных как: время симуляции, количество шагов симуляции за отведенное время, сила тяжести и её направление. После того как решатель создан, происходит расчет симуляции. В результате была получена динамическая модель перемещения delta-робота на поступательных парах (рис. 7), при этом основные параметры динамического движения приведены в таблице 1.

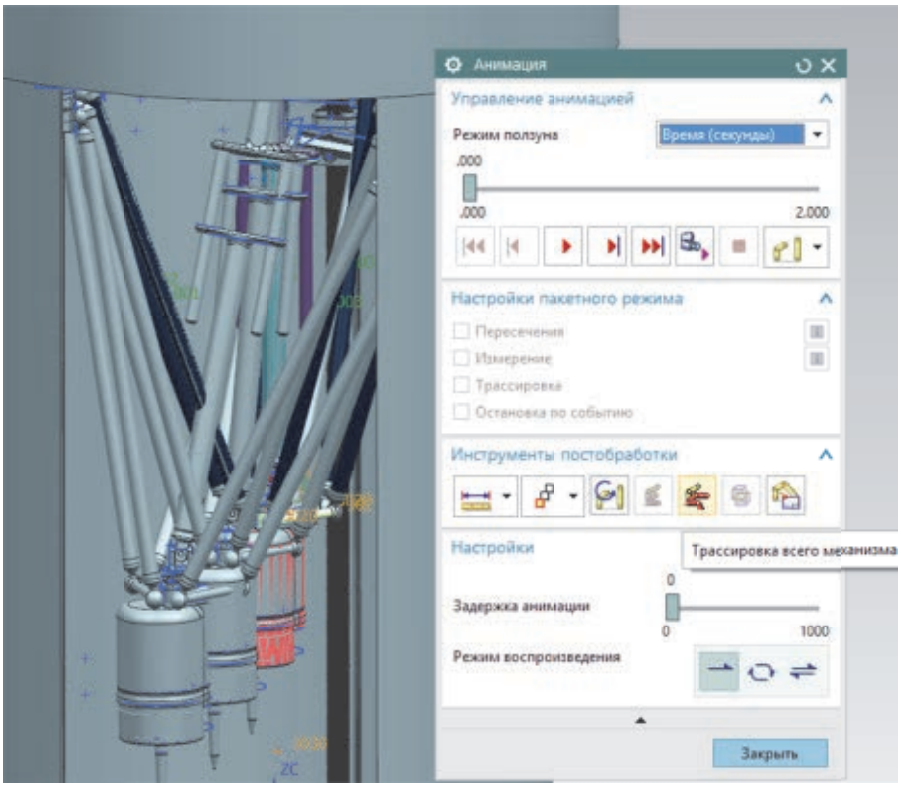


Рисунок 7 — Трассировка механизма во время движения

Таблица 1 — Параметры механизма

Момент инерции относительно каждой из осей, кг · мм ²			**Масса звеньев, кг**	**Начальная координата центра масс X, мм**	**Начальная координата центра масс Y, мм**	**Начальная координата центра масс Z, мм**	**Название**
I_X	**I_Y**	**I_Z**					
-	-	-	-	-	-	-	Корпус
72.889	67.644	64.287	0.263	143.735	-82.989	589.114	Ползуны
				0.002	165.973	589.114	
				-143.738	-82.984	589.114	
3165.369	3165.368	5.704	0.310	-62.487	-74.840	415.332	Звенья параллелограммного механизма
				-94.231	-17.640	415.570	
				62.392	-72.786	415.570	
				96.057	-16.695	415.332	
				-31.838	90.427	415.570	
				-33.569	91.536	415.332	
2463.27	2489.35	1039,86	852.53	-8.61	-10.71	-198.7	Дозирующее устройство

Одним из недостатков delta-робота является низкая несущая способность выходного звена, для этого были определены основные динамические параметры. Масса дозирующего устройства с заполненным наконечником составляет 1.3 кг. При движении выходного со скоростью 0.09 м/с сила, действующая на ползун 2, составила 34 Н. Траектория движения была задана таким образом, чтобы выходное звено достигла крайней точки рабочей области, в результате чего был пройден путь 0.03 м.

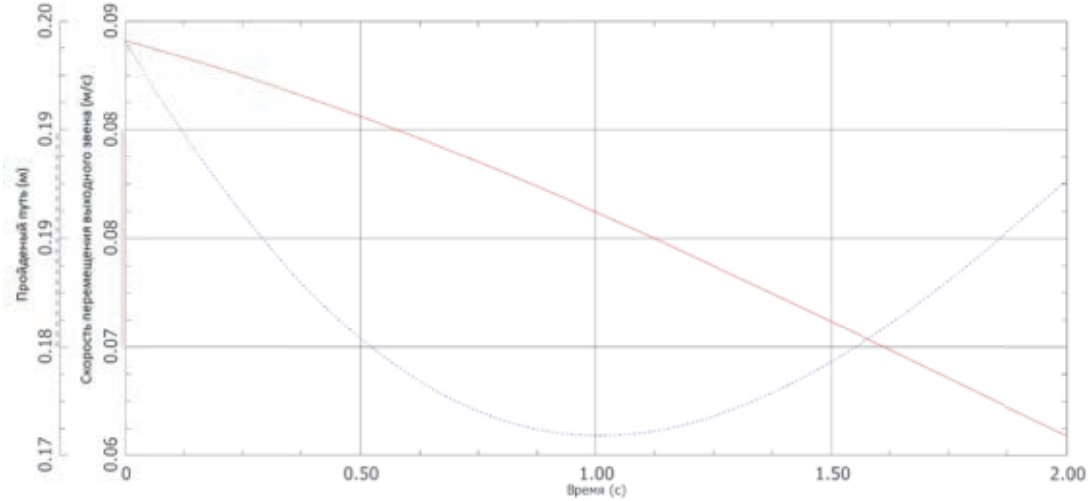


Рисунок 8 — График пройденного пути и скорости движения за время симуляции

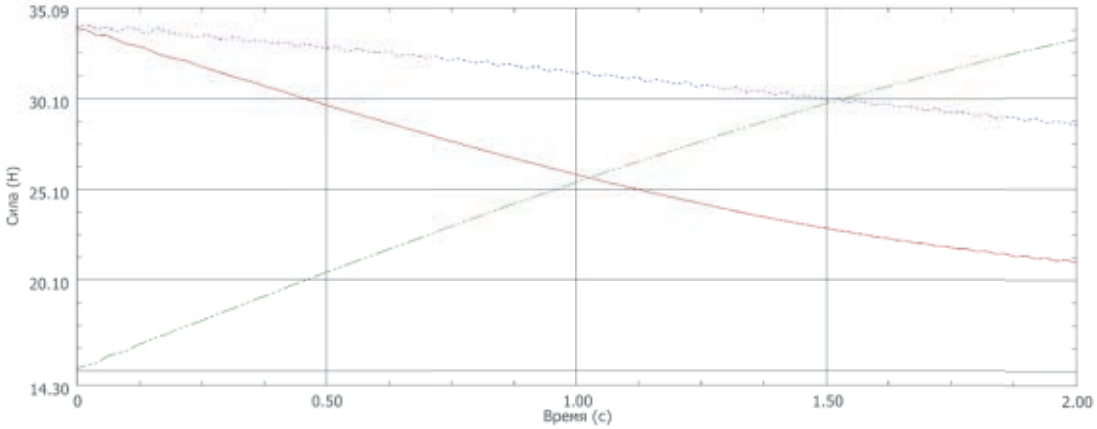


Рисунок 9 — График силы, действующей на ползун при заданной скорости

Таким образом, можно сделать вывод, что предложенное технологическое решение для манипулятора с установленным дозирующим устройством и вынесенными за пределы бокса движителями, позволяет выполнять манипуляции, а именно аликвотирование жидкости со сменой наконечников, в том числе в неблагоприятной среде. Это является весомым преимуществом относительно роботов последовательной структуры, движители которых находятся в боксе, подвергаясь воздействию негативной среды, и открывает перспективы использования в зоне радиоактивного и химического загрязнения.

Работа выполнена при поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по гранту FZWN-2020-0017

Литература

1. Биобанкирование. Национальное руководство.Анисимов С.В., Ахмеров Т.М., Балановский О.П., Баранич Т.И., Беляев В.Е., Борисова А.Л., Брызгалина Е.В., Воронкова А.С., Глинкина В.В., Глотов А.С., Гранстрем О.К., Долудин Ю.В., Драпкина О.М., Ершова А.И., Ефименко А.Ю., Ефимова И.А., Кондрацкая В.А., Мартынов А.Д., Метельская В.А., Мешков А.Н., Михайлова А.А., Муравьев А.И.,

Ноздрачева А.В., Покровская М.С., Пруцкий В.Ю., Семененко Т.А., Сухоруков В.С., Сысоева В.Ю. Москва, 2022. 308 с.

2. Козлова В. А., Метельская В. А., Покровская М. С. И др. Изучение стабильности биохимических маркеров при непрерывном длительном хранении сыворотки крови и при однократном размораживании. Кардиоваскулярная терапия и профилактика. 2020;19(6):2736. doi:10.15829/1728-8800-2020-2736

3. Ноздрачева А.В., Семененко Т.А., Гапоненко Е.В., Рыбак Л.А. Экспериментальные данные о влиянии температурных условий хранения образцов сывороток крови на результаты ИФА-анализа. Сборник трудов XII Ежегодного Всероссийского интернет-конгресса по инфекционным болезням с международным участием. Под ред. В.И. Покровского. Москва, 2020, с.168.

4. Ноздрачева А.В., Семененко Т.А., Гапоненко Е.В., Рыбак Л.А. Роль банков биологических образцов в обеспечении национальной безопасности. Сборник трудов XIII Ежегодного Всероссийского Конгресса по инфекционным болезням имени академика В.И. Покровского; IV Всероссийской научно-практической конференции; VI Всероссийского симпозиума. Москва, 2021. С.143.

5. Войнов И.В., Казанцев А.М., Носиков М.В. Робот-манипулятор МР-48 для атомной промышленности, IV Международная научно-техническая конференция “Пром-Инжиниринг”. 2018. С 270 – 275.

6. Malyshev D.; Rybak, L.; Carbone, G.; Semenenko, T.; Nozdracheva, A. Optimal Design of a Parallel Manipulator for Aliquoting of Biomaterials Considering Workspace and Singularity Zones. Appl. Sci. 2022, 12, 2070. https://doi.org/10.3390/app12042070

7. Clavel, R.: Delta, a fast robot with parallel geometry. In: Proceedings of the 18thInternational Symposium on Industrial Robots, 1988. P. 91–100.

8. Zhao, Y.: Singularity, isotropy, and velocity transmission evaluation of a three translational degrees-of-freedom parallel robot. Robotica 31(2), P. 193–202 (2013).

9. Biagiotti, L. Melchiorri, C.: Trajectory Planning for Automatic Machines and Robots. Springer, Heidelberg (2010)

10. López, M., Castillo, E., García, G., Bashir, A.: Delta robot: inverse, direct, and intermediate Jacobians. Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci. 220(1), 103–109 (2006)

11. Zhao, Y.: Singularity, isotropy, and velocity transmission evaluation of a three translational degrees-of-freedom parallel robot. Robotica 31(2), 193–202 (2013).

12. Biagiotti, L. Melchiorri, C.: Trajectory Planning for Automatic Machines and Robots. Springer, Heidelberg (2010).

М.В. Носиков, И.В. Войнов, Б.А. Морозов

МОБИЛЬНЫЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС МРК-65 ДЛЯ РАБОТ НА ОБЪЕКТАХ АТОМНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Филиал ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» в г. Миассе, г. Миасс Челябинской обл., nosikovmv@susu.ru

Аннотация

В настоящее время на предприятиях Госкорпорации «Росатом» при выполнении задач визуальной разведки, измерения значений радиационного фона в выведенных из эксплуатации зданиях и сооружениях, а также выполнения операций манипулирования объектами различной массы и габаритных размеров в условиях радиационных полей, требуется определенный состав мобильных робототехнических комплексов, оснащенных необходимым основным и вспомогательным оборудованием и инструментом.

Современные подходы к синтезу кинематических схем, компоновке дистанционно-управляемых и автономных мобильных робототехнических комплексов (РТК) и построению их систем управления позволяют реализовывать высокоэффективные РТК для широкого спектра задач. Применение в системах управления вычислительных устройств, системного и специализированного прикладного программного обеспечения, средств видеонаблюдения и визуализации информации, технических средств человеко-машинного интерфейса позволяют оператору в дистанционном режиме выполнять сложные транспортные и технологические операции.

В рамках работы представлен опыт создания современного мобильного дистанционно-управляемого РТК для работ на объектах атомной промышленности.

Ключевые слова

Мобильный робототехнический комплекс, дистанционное управление, ROS, человеко-машинный интерфейс.

M.V. Nosikov, I.V. Voinov, B.A. Morozov

MOBILE ROBOTIC SYSTEM MRK-65 FOR NUCLEAR INDUSTRY TASKS

Miass branch of South Ural State University (National Research University), Miass, Russia, nosikovmv@susu.ru

Abstract

At present, when performing tasks of visual reconnaissance, measuring the values of the radiation fields in decommissioned buildings, as well as performing operations of manipulating objects of various masses and dimensions in radiation fields, a set of mobile robotic complexes is required, equipped with the necessary basic and auxiliary tools.

Modern approaches to the synthesis of kinematic schemes, the layout of remote-controlled and autonomous mobile robotic complexes and the structure of their control systems make it possible to implement highly efficient robotic systems for a wide range of tasks. The use of processors, system and specialized application software, video surveillance and visualization tools, human-machine interface hardware in control systems allow the operator to remotely perform complex transport and technological operations.

The experience of development and manufacturing a modern mobile remote-controlled system MRK-65 for work at nuclear industry facilities is presented.

Key words

Mobile robotic system, remote control, ROS, human-machine interaction.

В настоящее время на предприятиях Госкорпорации «Росатом» при выполнении задач измерения значений радиационного фона в выведенных из эксплуатации зданиях и сооружениях, а также выполнения операций манипулирования объектами различной массы и габаритных размеров в условиях радиационных полей, требуется определенный состав мобильных робототехнических комплексов, различных по грузоподъемности, оснащенных необходимым перечнем основного и дополнительного оборудования.

Типовыми задачами для мобильных радиационно-стойких робототехнических комплексов, работающих в дистанционно-управляемом режиме, являются [1,3]:

- проведение визуальной разведки;
- мониторинг текущей обстановки с помощью дополнительного измерительного оборудования;
- захват, перемещение внешних объектов с помощью манипуляционных систем;
- транспортирование и доставка объектов и дополнительного оборудования, в/из радиационной зоны;
- выполнение механических операций инструментом (резка различных материалов и т.д.);
- гамма-локация окружающей среды, обнаружение источников сильного ионизирующего излучения (при необходимости – их экранирование).

Используя опыт разработки, изготовления и ввода в эксплуатацию радиационно-стойких мобильных робототехнических комплексов серии «Мустанг», филиалом ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» в г. Миассе в рамках опытно-конструкторской работы спроектирован и изготовлен мобильный робототехнический комплекс МРК–65.

В состав разработанного комплекса входят: подвижный аппарат с шасси изменяемой геометрии и установленным на нем манипулятором с шестью вращательными степенями свободы и дополнительное оборудование. Управление подвижным аппаратом осуществляется от передвижного пульта управления по оптическому кабельному каналу связи или радиоканалу. Для кабельного варианта управления на борту подвижного аппарата имеется катушка с кабелем и система его подачи и укладки в зависимости от режима движения машины (рис. 1).

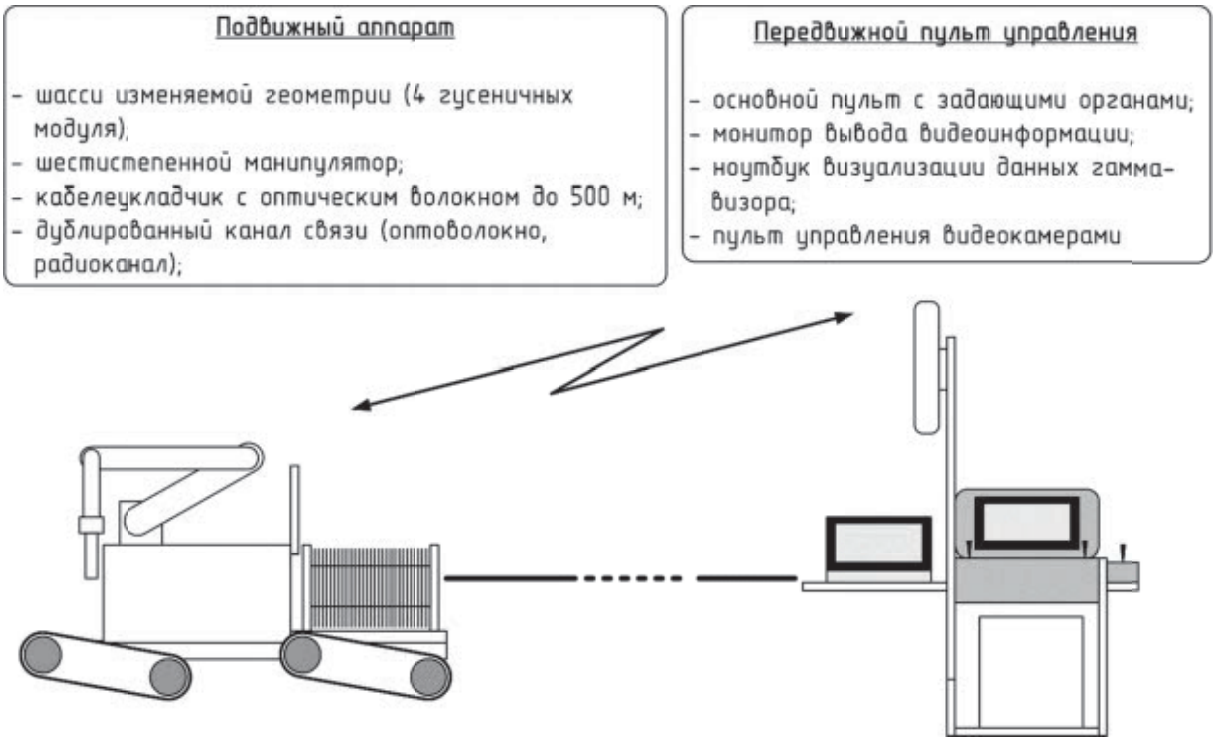
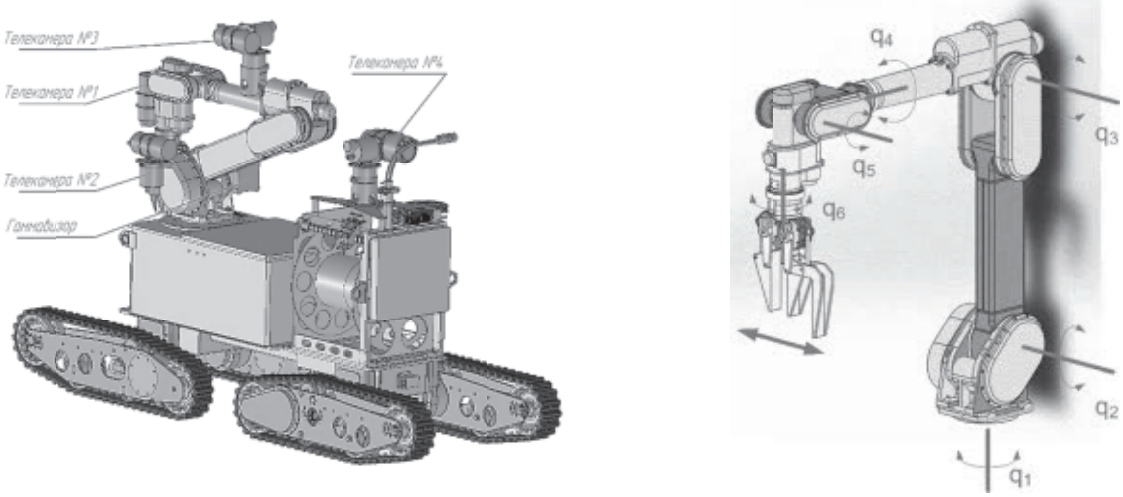


Рисунок 1 — Состав мобильного робототехнического комплекса

Основные характеристики подвижного аппарата (рис. 2):

- габаритные размеры: 1770x590x1100 мм;
- масса без кабеля: 180 кг;
- грузоподъемность: до 150 кг;
- скорость движения: 0–5 км/ч;
- преодоление подъемов на сухом грунте до 40°;
- преодоление эскарпов и контрэскарпов до 500 мм высотой;
- движение по водным преградам до 500 мм глубиной;
- время непрерывной работы: до 5 ч;
- Основные характеристики манипулятора (рис. 2):
- 6 вращательных степеней свободы;
- длина манипулятора без схвата: 1500 мм;
- грузоподъемность манипулятора: 30 кг на полном вылете (в горизонте);
- регулируемое (поддерживаемое) усилие схвата в диапазоне: от 5 до 160 Н;
- быстросменное байонетное соединение схвата или рабочего инструмента;
- компактный электропривод с планетарно-цевочными редукторами, резистивными датчиками угла, электромеханическим тахогенератором.



а) б)

Рисунок 2 – Внешний вид подвижного аппарата (а) и установленного на нем манипулятора (б)

При проектировании пульта управления учтен положительный опыт предыдущих разработок. Функции управления разнесены по отдельным устройствам и средствам видеовывода. Основной пульт позволяет осуществлять управление подвижным аппаратом (шасси и манипулятором) посредством одно- и двухстепенных задающих органов (джойстиков). Информация о состоянии подвижного аппарата выводится на встроенный видеомонитор. Для управления ориентацией видеокамер, настройки режима работы объективов и режима подсветки предусмотрен отдельный малогабаритный пульт в зоне правой руки оператора. Видеоинформация, поступающая от камер выводится на дополнительный монитор. Для управления и вывода информации с гамма-визора предусмотрен откидной столик для установки ноутбука, входящего в комплект гамма-визора (рис. 3).

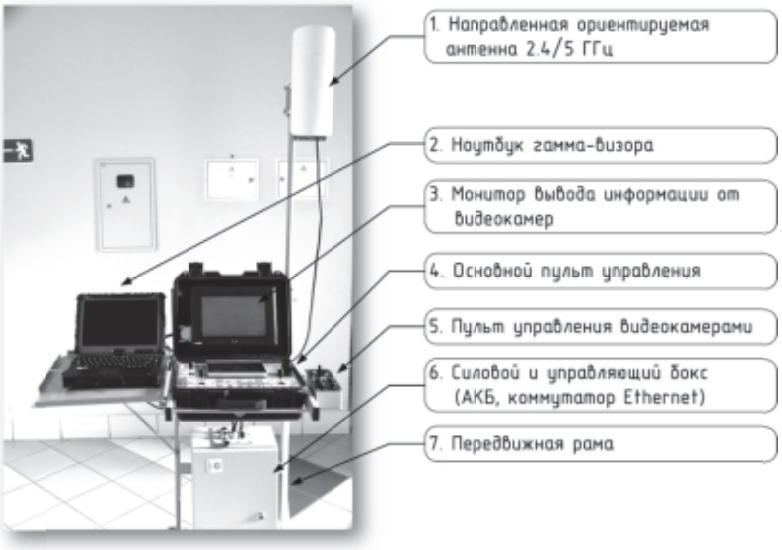


Рисунок 3 — Внешний вид пульта управления

При управлении манипулятором предусмотрен ряд режимов, в том числе управление в нескольких прямоугольных системах координат. При таком характере движения для манипуляторов с вращательными кинематическими парами неизбежно возникают зоны вырожденных конфигураций, при движении в которых угловые скорости в отдельных кинематических парах могут стремиться к бесконечности.

С целью предотвращения приближения манипулятора к зонам вырожденных конфигураций для манипуляционных систем рассматриваемого класса были разработаны и реализованы несколько алгоритмов. Один из них заключается в матричном преобразовании вектора состояния задающих органов в выходной вектор управляющих воздействий оператора [2]. Коэффициенты матрицы K в общем случае зависят от времени, вектора состояния манипулятора, режима управления. Преимущество предложенного способа – гибкость формирования выходного вектора управляющих воздействий, в том числе при использовании дополнительных дискретных каналов управления. Дальнейшим расширением данного способа стало введение и использование матрицы критериев ограничений C, компоненты которой представляют собой весовые коэффициенты в диапазоне от 0 до 1, каждый из которых назначен на определенный тип кинематических ограничений, и позволяющий плавно и безударно снижать коэффициент передачи вектора состояния задающего органа в вектор управляющего воздействия.

$$\mathbf{O}_{OUT}(t)=\begin{pmatrix} O_{OUT_1}(t) \\ \cdots \\ O_{OUT_j}(t) \end{pmatrix}=min\{\mathbf{C}\}\cdot\mathbf{K}\begin{pmatrix} O_{PC}(t) \\ O_{DC}(t) \end{pmatrix}= \tag{1}$$

$$=min\{\mathbf{C}\}\cdot\begin{pmatrix} k_{S_1O_{P1}} & k_{S_1O_{P2}} & \cdots & k_{S_1O_{Pn}} & k_{S_1O_{D1}} & k_{S_1O_{D2}} & \cdots & k_{S_1O_{Dk}} \\ k_{S_2O_{P1}} & k_{S_2O_{P2}} & \cdots & k_{S_2O_{Pn}} & k_{S_2O_{D1}} & k_{S_2O_{D2}} & \cdots & k_{S_2O_{Dk}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ k_{S_jO_{P1}} & k_{S_jO_{P2}} & \cdots & k_{S_jO_{Pn}} & k_{S_jO_{D1}} & k_{S_jO_{D2}} & \cdots & k_{S_jO_{Dk}} \end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix} O_{PC1}(t) \\ \vdots \\ O_{PCm}(t) \\ O_{DC1}(t) \\ \vdots \\ O_{DCk}(t) \end{pmatrix}$$

$$k_{S_iO_{Pk}}=\Phi\left(t,S(t),M(t)\right)$$

$$\mathbf{C}=\begin{pmatrix} C_{1,1} & \ldots & C_{1,n} \\ C_{2,1} & \ldots & C_{2,n} \\ C_{3,1} & \ldots & C_{3,n} \\ C_4 & \ldots & 1 \end{pmatrix}, \qquad C_{i,k}\in[0\ldots1],\ \forall i,k$$

$n-$ *число степеней подвижности*

где

$O_{OUT}(t)$ – выходной вектор управляющих воздействий;

C – матрица весовых коэффициентов кинематических ограничений;

K – матрица динамических коэффициентов передачи вектора состояния задающих органов в выходной вектор управляющих воздействий;

$O_{PC}(t)$ – вектор состояния пропорциональных каналов управления задающих органов;

$O_{DC}(t)$ – вектор состояния дискретных каналов управления задающих органов;

Архитектура видеоподсистемы

Для решения задач оперативного наблюдения за внешней обстановкой по техническому заданию заказчика сформирована структура видеоподсистемы подвижного аппарата.

В ее состав входят: 4 радиационно-стойкие видеокамеры оптического диапазона с разрешением матрицы 1920px x 1200px. Три из них установлены на манипуляторе: на основании, одном из его звеньев и в зоне схвата. На каждой из данных видеокамер установлен объектив с ручной регулировкой параметров фокусного расстояния (данные параметры юстируются и арретируются на этапе настройки системы). Четвертая видеокамера установлена в зоне кабелеукладчика, предназначена для панорамного обзора обстановки, имеет моторизованный объектив с регулировкой диафрагмы, фокусировки, трансфокатора. Три из четырех видеокамер имеют возможность автоматизированного (по команде оператора) ориентирования оптической оси в одной или двух плоскостях (рис. 4). Для каждой видеокамеры в конструкции корпуса предусмотрена светодиодная подсветка поля зрения, параметры подсветки регулируются оператором. Изображение от видеокамер передается в цифровом виде по интерфейсу Ethernet в формате MJPEG.

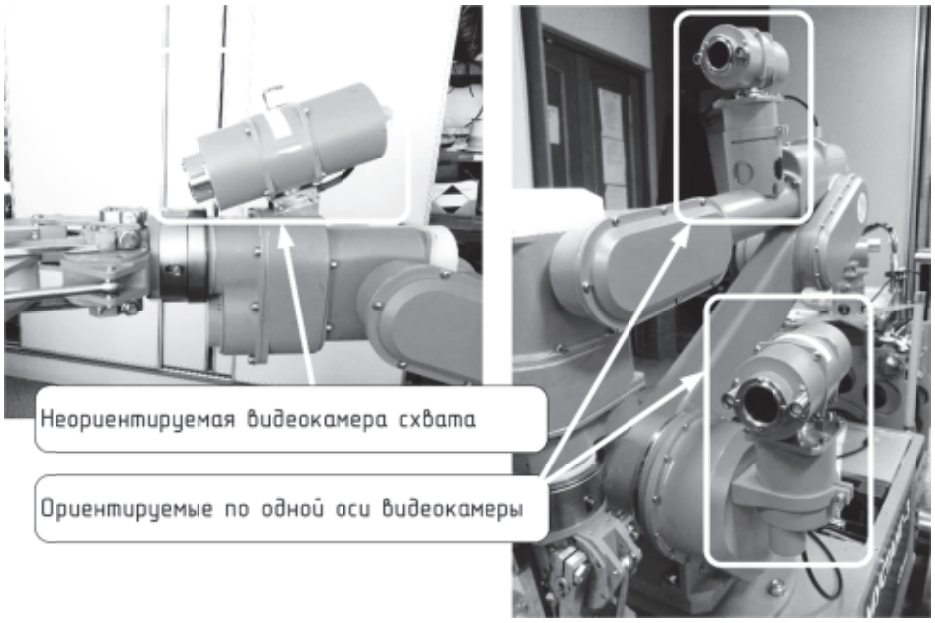


Рисунок 4 — Видеокамеры, установленные на манипуляторе

Программная архитектура комплекса

Важным элементом системы управления является ее программная архитектура, синтез которой выполнен исходя из следующих предпосылок: 1) Необходимости создания функционально масштабируемой системы управления; 2) Максимально возможного применения вычислительных платформ с открытым исходным кодом; 3) Функционирования системы управления в режиме, близком к режиму «мягкого» реального времени; 4) Возможности построения распределенных систем управления и мониторинга.

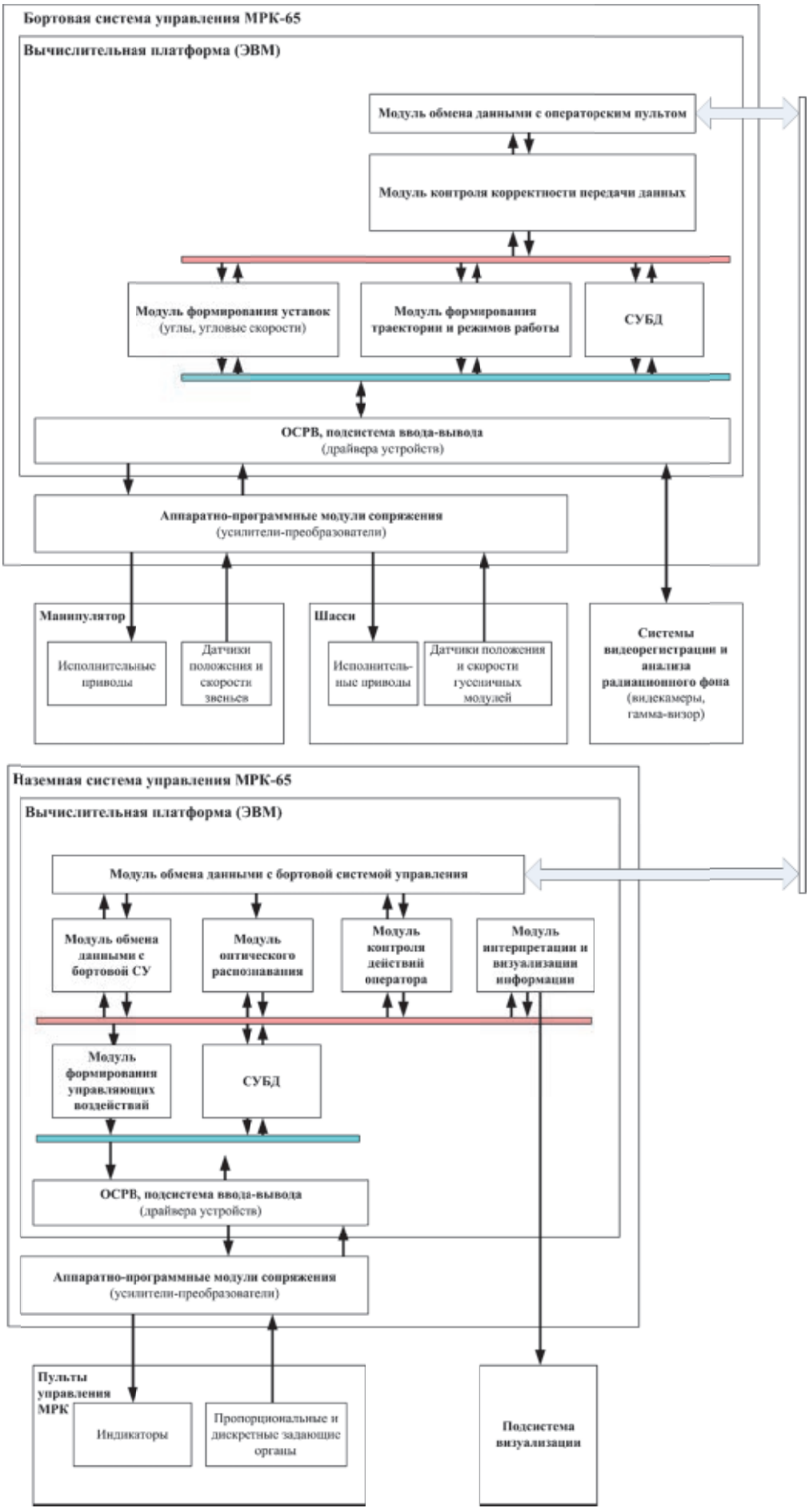


Рисунок 5 — Программная архитектура комплекса МРК-65

Успешный опыт применения фрэймворка Robotic Operating System в созданных ранее манипуляционных системах позволил остановиться на данном программном продукте. При этом базовой операционной системой подвижного аппарата и пульта управления является дистрибутив Ubuntu с модифицированных под задачи реального времени ядром. В среде ROS реализация алгоритмов возможна на уровне программных микромодулей, реализующих законченный функционал и осуществляющих информационный обмен с другими модулями посредством виртуальных информационных каналов и системы сообщений, в том числе и на распределенных, как в рассматриваемом случае, вычислительных системах. В рамках работы синтезирован необходимый состав программных модулей системы управления, сформирована структура их информационного взаимодействия, определены и реализованы протоколы обмена с локальными системами управления и системами верхнего уровня (рис. 5). Для задания режимов работы, помимо аппаратных органов управления, используется сенсорный ввод на встроенном в основной пульт промышленном компьютере. Он также используется для визуализации состояния подвижного аппарата и комплекса в целом. Данная часть программной архитектуры реализована с использованием системных и прикладных компонент библиотеки Qt 5. Визуализация трехмерных моделей выполняется средствами ROS на основе информации из файла описания кинематической структуры комплекса.

Изготовленный образец комплекса МРК-65 прошел этапы приемо-сдаточных испытаний по утвержденной программе (параметры движения и геометрии шасси, грузоподъемность манипулятора и подвижного аппарата в целом, дальность работы по каналу связи, работа сменным инструментом и т.д.). На рисунке 6 приведены этапы проведения испытаний – подъем по лестнице с уклоном 40° и работа сменным инструментом – перфоратором. По результатам испытаний определена программа дальнейшего использования комплекса.

а) б)

Рисунок 6 — Этапы испытаний МРК-65: подъем по лестнице (а) и работа перфоратором (б)

Литература

1. Динамика управления роботами / В.В. Козлов, В.П. Макарычев, А.В. Тимофеев, Е.И. Юревич – Москва : Наука, 1984.

2. Robot-Manipulator MR-48 for Nuclear Industry / I.V. Voinov, A.M. Kazantsev, M.V. Nosikov // Proceedings of the ICIEAM Conference, Moscow, 2018, pp. 1 – 6, DOI: 10.1109/ICIEAM.2018.8729125.

3. Радиационно–стойкие манипуляторы и методы расширения их функциональных возможностей / И.В. Войнов, А.М. Казанцев, Б.А. Морозов, М.В. Носиков // Экстремальная робототехника и конверсионные тенденции: труды 29-й Международной научно-технической конференции (Санкт-Петербург, 07–08 июня 2018 г.). – СПб.: ООО «Политехника Сервис», 2018. – С. 114–125.

С.А. Андреев, С.Ю. Касьянов

О РОБОТИЗАЦИИ ЯДЕРНО ОПАСНЫХ РАБОТ

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», г. Снежинск, Челябинская обл., dep5@vniitf.ru

Аннотация

Рассматриваются вопросы повышения безопасности и производительности ядерно опасных работ, проводимых в рамках интегральных критических экспериментов (ИКЭ) на критическом стенде ФКБН, за счет роботизации отдельных технологических операций. Основными требованиями к ИКЭ являются точность и информативность получаемых данных. Предлагается концепция роботизации ядерно опасных работ, обсуждаются преимущества роботизированной технологии. Даются основные требования к манипулятору и искусственному интеллекту.

Ключевые слова

Ядерно опасные работы, критический эксперимент, робот, искусственный интеллект.

S.A. Andreev, S.Yu. Kasyanov

ON THE ROBOTICS FOR CRITICAL EXPERIMENT

FSUE «RFNC-VNIITF named after Academ. E.I. Zababakhin», Snezhinsk, Chelyabinsk region, Russia, dep5@vniitf.ru

Abstract

Here discussed the issues of enhancement of nuclear safety and productivity for integral critical experiments (ICE) due to robotics in nuclear dangerous operations. ICE are being hold at FKBN facility and must be definitely precise and informative. The concept of robotics in nuclear dangerous operations is proposed. Advantages of robotics are discussed. Main requirements for mechanics and artificial intelligence are given.

Key words

Nuclear dangerous operations, critical experiment, robot, artificial intelligence.

Интегральные критические эксперименты (ИКЭ) остаются одним из важнейших инструментов для уточнения нейтронно-физических констант материалов и верификации компьютерных кодов для расчетов переноса излучения и характеристик критичности размножающих нейтроны систем [1]. Особенно актуальным является проведение ИКЭ для тестирования расчетов ядерных реакторов на быстрых нейтронах, создание которых направлено на замыкание ядерного топливного цикла.

ИКЭ проводятся на специальных критических стендах – устройствах, позволяющих контролируемо собрать заранее выбранные размножающие систем (РС), достичь околокритического состояния и экспериментально определить характеристики распределения поля нейтронов. Достижение критичности в эксперименте и в расчете (с использованием адекватной модели) является критерием «правильности работы» используемого кода и систем констант.

РС содержит в себе делящиеся (уран, плутоний и др.) и неделящиеся материалы и подбирается так, чтобы в наилучшей степени смоделировать активную зону проектируемого реактора (целевая система, ЦС). Сборка РС – это ядерно опасная работа. Первичная сборка РС производится вручную, затем дистанционно. В настоящей работе речь идет о компактных РС, собираемых на критических стендах типа ФКБН [2].

Основные требования к ИКЭ: безопасность (исключение неконтролируемого создания критической массы), точность (не хуже 0,1 мм по геометрии РС), разнообразие РС (для повышения достоверности и информативности результатов измерений).

Это обуславливает необходимость тщательного планирования ИКЭ, детальной проработки технологии из проведения, требует длительной подготовки, исключительной внимательности и осторожности персонала, производящего ручную и дистанционную сборку РС.

Ошибки людей в составлении технологии и проведении ИКЭ могут представлять угрозу ядерной безопасности и вносить погрешности (в том числе и не выявляемые) в результаты измерений.

Поэтому актуальной является автоматизация ИКЭ с применением робототехнической системы.

Целью настоящей работы является попытка определить достижимую в ближайшее время степень роботизации ИКЭ и интересах повышения их производительности, безопасности человека и достоверности получаемых результатов.

Физические объекты ИКЭ и измеряемые величины

РС состоит из двух пространственно и конструктивно разделенных частей (верхней – неподвижной (ВЧ) и нижней – подвижной (НЧ)). Части РС составляются из отдельных деталей путем их механического складывания друг на друга (или вкладывания друг в друга) по заранее заданному чертежу. ВЧ размещается на специальной неподвижной диафрагме, жестко закрепленной к опорной трубе. НЧ обычно размещается на конусной подставке, закрепляемой к подвижному штоку ФКБН (см. далее). Детали РС представляют собой диски или полусферические оболочки из делящихся (уран, плутоний и др.) и неделящихся (полимеры, металлы и др.) материалы. РС могут быть весьма разнообразны по конструкции и, как правило, обладают симметрией по оси подвижного штока ФКБН. Фотография одной из РС показана на рис.1, ее устройство – на рис.2. Характерный размер РС, приведенной на рис.1,2 – около 10 см, характерный максимальный размер РС – не более 70 см.

РС размещаются на ФКБН, который представляет собой электромеханический стенд, имеющий всего один привод – шток, перемещающий нижнюю часть (НЧ) РС. Кинематическая схема ФКБН показана на рис.3, фотография – на рис.4. Контроль работы и дистанционное управление ФКБН осуществляется с помощью системы управления и защиты, в состав которой входит аппаратура контроля нейтронного потока и датчик положения НЧ.

Рисунок 1 — Фотография одной из РС

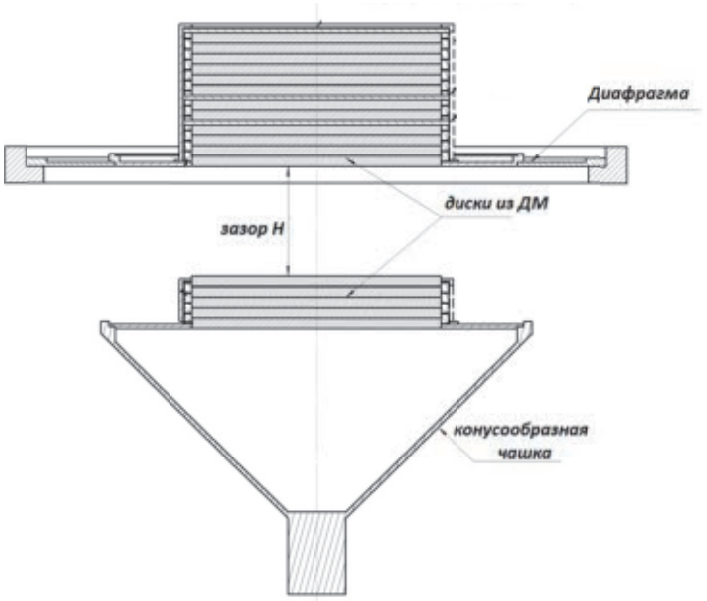
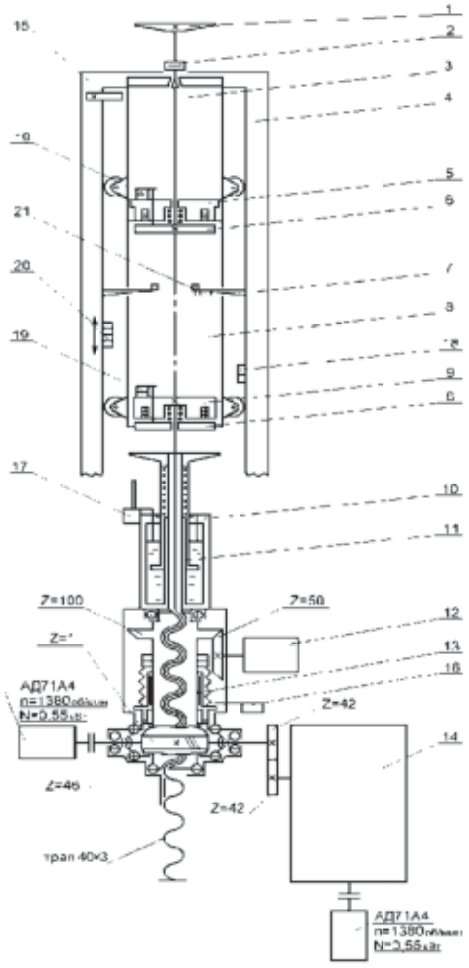


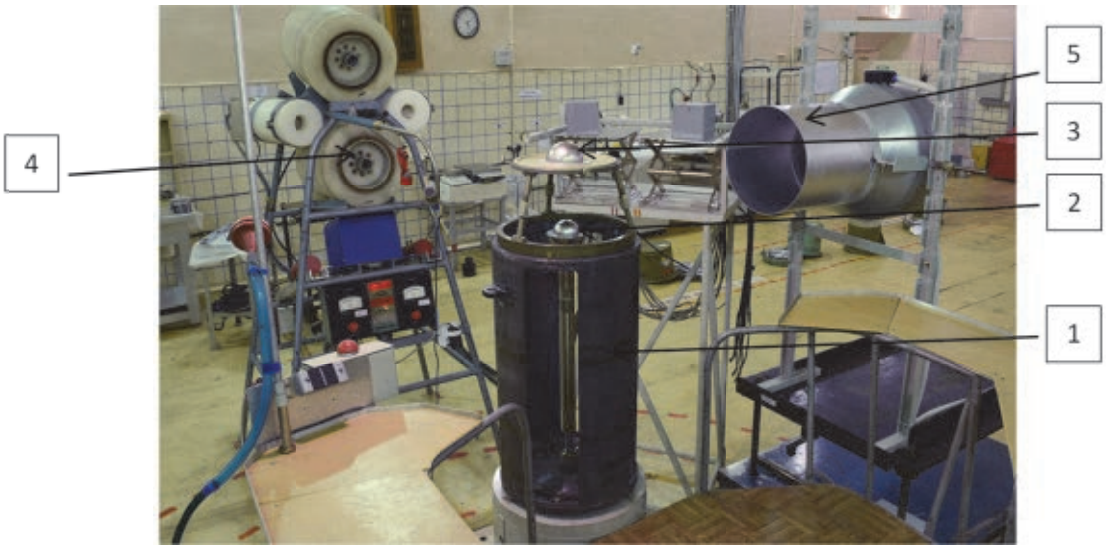
Рисунок 2 — Устройство одной из РС

В ИКЭ на ФКБН главный измеряемый параметр – значение зазора между частями РС, соответствующего состоянию критичности $H_{кр}$. Процедура его определения состоит в пошаговом сближении частей РС и измерении скорости счета нейтронов N(H). По получившейся зависимости вычисляется $H_{кр}$.



1 – чашка;
2 – гайка и контргайка;
3 – штанга;
4 – стойка-направляющая;
5 – магнит верхний;
6 – якорь;
7 – нижний упор РС;
8 – каретка;
9 – магнит нижний;
10 – демпфер масляный;
11 – винт ходовой;
12 – сельсин-датчик;
13 – муфта перегрузки;
14 – редуктор трехскоростной;
15 – верхний упор каретки;
16-21 – микропереключатели.

Рисунок 3 — Устройство электромеханического стенда ФКБН



1 – опорная труба; 2 – нижняя часть РС; 3 – верхняя часть РС; 4 –детекторная стойка; 5 – система вентиляции

Рисунок 4 — Фотография ФКБН со собранной РС

Анализ технологии ИКЭ

Действующая технология ИКЭ обобщенно представлена в таблице 1. Как следует из таблицы 1 технология ИКЭ существенно шире и сложнее, чем определение $H_{кр}$, как это описано в предыдущем разделе.

Таблица 1 — Действующая технология ИКЭ

№ шага	Содержание	Порядок выполнения
1	Формулирование задачи (состав, спектральные характеристики)	Поставляется заказчиком
2	Первичное определение состава, геометрии РС из имеющихся деталей	Коллегиально по согласованию с заказчиком
3	Расчеты в обоснование безопасности РС	Вручную
4	Разработка технологии сборки РС	Вручную
5	Экспертиза технологии сборки РС	Вручную
6	Получение и вскрытие упаковок с деталями РС	Вручную
7	Извлечение нужных деталей из упаковок	Вручную
8	Определение пригодности деталей (входной контроль)	Вручную
9	Подготовка деталей к сборке	Вручную
10	Первичная сборка частей РС, фиксации геометрии РС	Вручную
11	Сближение частей РС, проведение измерений в околокритическом состоянии РС	Полуавтоматизированно, дистанционно
12	Разборка частей РС	Вручную
13	Упаковка деталей и сдача упаковок	Вручную
14	Оформление результатов измерений, составление расчетной модели РС	Вручную

Рассмотрим технологию ИКЭ более подробно и определим шаги, для которых автоматизация и роботизация целесообразны.

Очевидно, что шаги 1 и 2 нецелесообразно автоматизировать. Шаги 3 и 4 являются трудоемкими и длительными, но, вместе с тем, содержат большое число рутинных операций. То есть, автоматизация для них целесообразна. Шаг 3 выполняется путем ручного ввода расчетной модели в программу ПРИЗМА, автоматического расчета по программе, ручной обработки результатов расчетов. Шаг 4 выполняется с учетом последовательности размещения деталей РС, ряда требований по обеспечению ядерной и радиационной безопасности. Альтернативой может являться использование специального автоматического кода, на входе которого - CAD-модель РС, на выходе -значения параметров ядерной безопасности и последовательность операций, необходимых для сборки и разборки РС.

Шаг 5 автоматизировать нецелесообразно, поскольку полное исключение человека из процесса разработки технологии ИКЭ может представлять опасность в случае ошибок в программных кодах или методике расчетов.

Шаги 6, 13 относится к рутинным операциям, не требует высокой квалификации персонала и его автоматизация должна основываться на технико-экономических оценках эффективности такой автоматизации.

Шаги 7-12 – это ядерно опасные работы (ЯОР) непосредственно с делящимся материалом – представляют наибольшую опасность, требуют осторожности и наибольшей концентрации внимания персонала. Эти шаги следует автоматизировать.

Наконец, шаг 14 – один из ответственных этапов ИКЭ, от подробности и точности описания результатов экспериментов зависит качество представляемых результатов. Во избежание ошибок со стороны человека, этот шаг целесообразно автоматизировать.

Очевидно, что такая автоматизация не состоит исключительно в том, чтобы создать манипулятор, который будет складывать детали «в стопки». Напротив, необходим программно-аппаратный (робототехничекий) комплекс (РТК), который включает в себя манипулятор, внешние сенсоры (поток нейтронов, температура, геометрия РС и ее окружения) и средства искусственного интеллекта.

Исходные требования к РТК для ИКЭ

Основные принципы создания и требования к РТК, задействованным в ИКЭ, можно сформулировать следующим образом.

1. Точность и воспроизводимость. Точность и воспроизводимость выполнения операций в трех измерениях должна быть не хуже 0,1 мм. Это требование следует из необходимой погрешности расчетной модели.

2. Надежность и безопасность не хуже, чем при традиционной сборке РС.

3. Приоритет человека и коллаборативность. То есть технологический процесс осуществляется совместно с человеком, имеющим возможность ограниченно влиять на действия РТК. Ограничение влияния человека состоит в запрещении тех операций, которые противоречат принципам безопасности, «зашитым» в программу РТК.

4. Искусственный интеллект, сопоставимый с человеческим. РТК должен иметь комплексную физическую модель объекта (с учетом его трансформации в ходе технологического процесса) и процессов для него характерных (перенос тепла, механика, источники и перенос излучений и проч.) и использовать ее для прогнозирования, идентификации и оценки рисков и взаимодействия с оператором («цифровой двойник»). Таким образом, робот должен обладать возможностями, сопоставимыми с таковыми у человека и необходимыми и достаточными для принятия самостоятельных решений по согласованию с человеком, а в случаях угроз безопасности – без согласования. Исходные данные должны поступать от средств объективного контроля значимых параметров технологического процесса. К этим параметрам можно отнести микроклимат, размеры, массы, радиационные характеристики и др. Сюда же можно отнести и машинное зрение для идентификации объектов, контроля геометрии деталей и РС по трем измерениям с точностью не хуже 0,1 мм.

5. Программирование высокого уровня и обучаемость. Программирование технологического процесса должно быть простым, понятным, однозначным и доступным оператору, не требовать от оператора глубинного знания языков программирования, и, в то же время надежным и консервативным (то есть предпочтение отдается наиболее безопасному действию). Должна иметься возможность обучения РТК: например, оператор учит робота на инертных макетах, а затем робот производит операции сам сначала на макетах, потом на штатных деталях.

Соблюдение перечисленных требований необходимо надежно проверить экспериментально до того, как доверять роботу выполнение ЯОР. Разработка способов и само подтверждение этих требований, по всей видимости, будет являться одной из самых трудных задач при создании РТК.

В таблице 2 сопоставлены возможности человека и РТК применительно к ЯОР на ФКБН.

Таблица 2 — Сопоставление возможностей человека и робота в ЯОР на ФКБН

Человек	**РТК**
Зрение	Машинное зрение, предупреждение столкновений
Измерительный инструмент	Машинное зрение, 3D сканеры и др.
Ограниченный объективный контроль (фокусировка внимания на ограниченном количестве объектов или органе чувств)	Полный непрерывный объективный контроль
Знания	Машинное обучение
Практические навыки	
Опыт	
Самоконтроль ограничен	Самоконтроль + контроль человеком
Принятие решений по согласованию с человеком	Принятие решений по согласованию с человеком

Роботизированная технология проведения ЯОР на ФКБН

Представим обобщенный полностью автоматизированный процесс опыта на ФКБН.

1. Человек загружает CAD-модель РС в РТК.
2. РТК производит разработку технологии работ по CAD-модели с помощью «цифрового двойника» и согласование технологии с человеком.
3. Человек располагает в рабочей зоне упаковки с деталями из делящегося материала и детали из нерадиоактивных материалов.
4. РТК под контролем человека производит вскрытие упаковок, извлечение деталей из ДМ, их идентификацию и входной контроль (масса, размеры, состав), перемещение нужных деталей в рабочую зону ФКБН.
5. РТК под контролем человека производит сборку РС при непрерывном объективном контроле, контроле геометрии РС (сопоставлении с CAD-моделью) и расчетом параметров безопасности по «цифровому двойнику».
6. РТК под контролем человека производит сближение частей РС и определение критических характеристик.
7. РТК под контролем человека производит разборку РС и упаковку деталей.
8. РТК производит построение расчетной модели РС на всех стадиях ее технологического передела.

Возможная технологическая схема показана на рис.5.

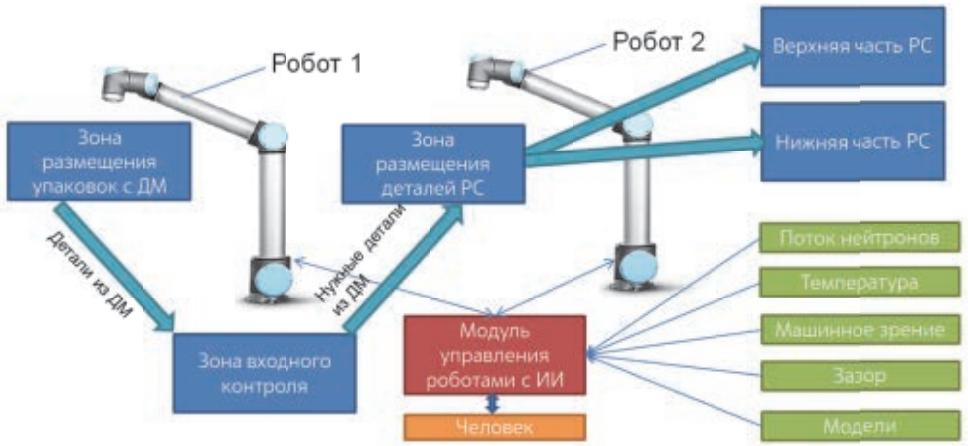


Рисунок 5 — Возможная технологическая схема роботизированных ЯОР на ФКБН

Безусловно, предлагаемая роботизация радикально улучшит безопасность человека в ЯОР. С другой стороны, возможно формирование у оператора привычки доверять РТК, что может отрицательно сказаться на уровне подготовки самого оператора и повысить риск появления неблагоприятных событий, которые ранее представлялись крайне маловероятными. Это предмет для будущего тщательного анализа и планирования.

Выявлены этапы технологического цикла ИКЭ, для которых роботизация видится оправданной. С учетом уровня современного развития технологий робототехники представляется вполне реализуемым создание робота «технолога-сборщика РС» для интегральных критических экспериментов на стенде ФКБН. Такой робот должен быть оснащен специальными программно-аппаратными решениями, а именно: машинным зрением (2D, 3D-модель), средствами контроля параметров РС (температура, поток нейтронов, зазор и др.), «цифровыми двойниками».

Необходимо разработать процедуры и по ним подтвердить точность, надежность и безопасность РТК для ИКЭ.

И.В. Шардыко, В.В. Титов, В.М. Копылов

СИСТЕМА ПОЗИЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРОМ С УПРУГИМИ ШАРНИРАМИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ТИПА

ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург, i.shardyko@rtc.ru

Аннотация

В последнее десятилетие резко расширилось применение механической упругости в шарнирах роботов. Основное внимание при этом уделяется манипуляторам на основе традиционных одностепенных шарниров с последовательной упругостью, однако ими данное направление не исчерпывается. В настоящей статье рассматривается пример манипулятора, содержащего шарниры дифференциального типа, отличающиеся высокой степенью связности в механической цепи. Разработана математическая модель манипулятора и регулятор, построенный на основе подхода с сохранением упругой структуры. Такой подход не меняет естественные инерциальные и упругие свойства манипулятора, добавляя демпфирование для быстрого затухания механических колебаний. Работоспособность алгоритма была показана посредством компьютерного моделирования, в ближайшем будущем ожидаются испытания на физическом образце манипулятора.

Ключевые слова

Робототехника, система управления, упругий шарнир, дифференциальный шарнир, регулятор с сохранением упругой структуры.

I.V. Shardyko, V.V. Titov, V.M. Kopylov

POSITION CONTROL DESIGN FOR A ROBOTIC ARM WITH DIFFERENTIAL-DRIVE ELASTIC ACTUATORS

Russian State Sctntific Centre for Robotics and Technikal Cybernetics, St. Petersburg, Russia, i.shardyko@rtc.ru

Abstract

Mechanical compliance has become a popular topic in robotics in the last decade. Robotic arms that comprise traditional series elastic actuators get much attention, however, there are other types of actuators. In this article one such case is considered, i.e. a robotic arm which contains strongly coupled differential-drive robotic joints. A mathematical model of this robotic arm has been designed as well as a control system based on elastic structure preserving approach. This approach keeps the natural inertial and elastic properties of the arm while appropriate damping is injected. The control algorithm has been successfully verified in simulation and is planned to be tested on a physical device.

Key words

Robotics, control system, series elastic actuators, coupled joint, elastic structure preserving control.

Развитие теории управления всегда естественным образом следовало за инженерно-технической практикой. В случае робототехнических систем вопросы управления в основном связаны с управлением отдельными шарнирами, обладающими одной степенью подвижности [1], либо цепочкой шарниров, то есть группой шарниров, связанных параллельным или последовательным способом [2]. Реже встречаются другие объекты управления: шарниры более высокого порядка [3] (двух- и трёхстепенные), шарниры с переменной упругостью [4], тросовые системы [5], а также шарниры с механической передачей дифференциального типа [6]. В настоящей работе рассматриваются особенности моделирования

и управления манипулятором, построенном из упругих двухстепенных шарниров дифференциального типа, примером которого является манипулятор, представленный в работе [7].

Стоит заметить, что те или иные особенности объектов управления могут быть и достаточно универсальными, и, наоборот, характерными только для конкретного объекта. Кроме того, так как любая модель содержит некоторые упрощения в сравнении с реальностью, то важно понимать, какие упрощения допустимы для тех или иных объектов. Например, так называемые допущения Спонга [8] общеприняты для моделирования манипуляторов с упругими шарнирами, если в шарнирах используется редукторы с высоким передаточным отношением. Такие допущения позволяют учитывать только один путь передачи энергии в шарнире из двух, что радикально снижает сложность модели и работы с ней.

Среди многочисленных подходов к управлению упругими манипуляторами можно отметить те, что получили наибольшее распространение. Во-первых, подход на основе теории сингулярного возмущения [9], который успешно применяется при управлении роботами со сравнительно высокой жёсткостью шарниров, таких как промышленные манипуляторы, но неприменим в случае с менее жёсткими шарнирами, которые, например, широко применяются в коллаборативных манипуляторах, где характерные значения жёсткости составляют менее 10 кН·м/рад. Другим распространённым подходом является применение обратной модели динамики в том или ином виде [10,11]. Данный подход может обеспечить в теории сколь угодно высокие показатели качества системы, однако на практике страдает высокой чувствительностью к неточностям модели, вследствие чего требует дополнительных мер, таких как точная идентификация модели или применение методов адаптивного управления в дополнение к основному регулятору. Указанные недостатки в особенности характерны для метода расчётного момента, основанного исключительно на модели, но также относятся к и методам, основанным на обратной связи, таких как линеаризация по обратной связи [12].

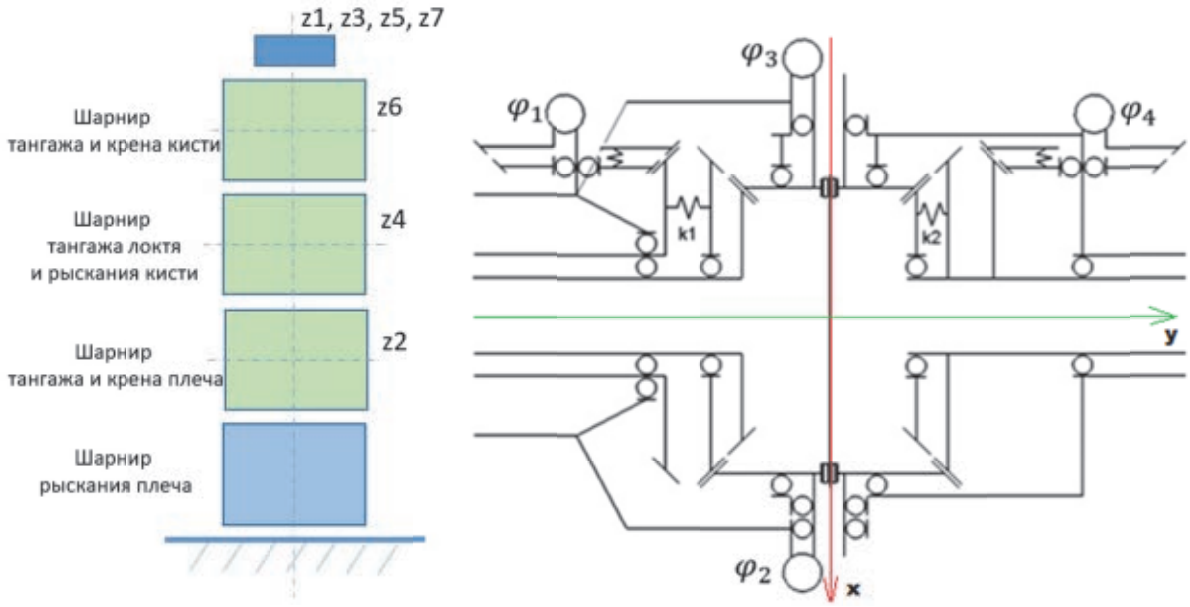


Рисунок 1 — Структура манипулятора и кинематическая схема шарнира

Напротив, подход к управлению, основанный на пассивности системы (УОП), зависит от параметров модели в значительно меньшей степени в части показателей качества, а в части устойчивости не зависит вовсе. Данный подход был успешно применён к управлению манипуляторами с упругими шарнирами [13], в том числе, к манипулятору с шарнирами дифференциального типа [14]. Последний во многом аналогичен манипулятору, рассматриваемому в настоящей статье, различия будут рассмотрены ниже. Дальнейшим развитием подхода УОП стал метод сохранения упругой структуры манипулятора (СУС) [15], который также обладает дополнительным преимуществом, а именно тем, что параметры

регулятора обладают выраженным физическим смыслом, что делает настройку регулятора интуитивно понятной.

Возвращаясь к объекту управления, рассматриваемому в настоящей статье, на рисунке 1 показана структурная схема манипулятора и кинематическая схема двухстепенного шарнира. В состав манипулятора входит один вращательный и три двухстепенных дифференциальных шарнира. Каждый двухстепенной шарнир содержит две пружины, представляющих основной источник упругости (*k1* и *k2*), назначением которых является снижение усилий при непредвиденных соударениях с объектами внешней среды и измерение контактных усилий. Для последней задачи шарнир включает датчики положения, обозначенные как φ на рисунке 1. Расположение пружин таково, что механика дифференциального шарнира перекрёстно связывает не только входы и выходы шарнира, но и выходные моменты с деформациями пружин. В последующих разделах будет рассмотрена математическая модель манипулятора, предложен регулятор манипулятора на основе метода СУС, а также представлены результаты компьютерного моделирования, проведённого для проверки работоспособности предложенного регулятора.

Разработка модели манипулятора

Для краткости, модель манипулятора выводится на основе манипулятора MIRO [5]. Данная схема обладает рядом преимуществ, в первую очередь, позволяя передавать движение механическим способом в любой конфигурации манипулятора. Кроме того, момент обоих приводов шарнира может складываться на одной из осей, повышая динамические характеристики в определённых ситуациях. Однако, связанность осей не позволяет использовать независимый контроллер для каждого привода, а движение по каждой из осей шарнира может быть реализовано только двумя приводами одновременно. Схема шарнира MIRO показана на рисунке 2.

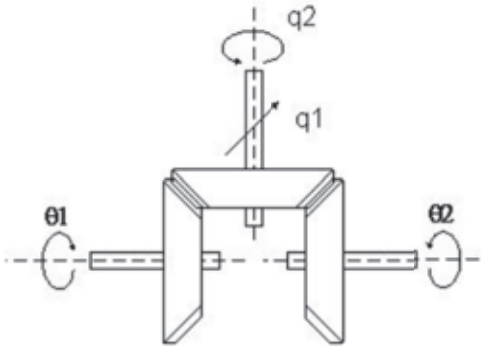


Рисунок 2 — Схема дифференциальной передачи шарнира MIRO

Без учёта упругости, преобразование координат и моментов в шарнире выглядит как

$$\theta = T_0 \theta_m \tag{1}$$

$$\tau_m = T_0^T \tau \tag{2}$$

где θ_m – положение привода (вход шарнира), θ – то же положение, приведённое к выходу шарнира, τ_m и τ – выходной момент (нагрузки), выраженный в координатах привода и выходного вала соответственно. Матрица преобразования механизма T_0 при этом строго определена:

$$T_0 = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \tag{3}$$

Как можно заметить, на схеме выходные координаты обозначены как q. Причина в том, что θ – координаты именно двигателей, только выраженные в иной системе координат, чем θ_m. Координаты q, напротив, являются другой переменной состояния, показывая положение выходных звеньев после упругого элемента, и также могут быть представлены в различных системах координат, за которые отвечает индекс. Отсутствие индекса показывает систему координат выхода, а индекс m – входа. Матрица преобразования для полного манипулятора будет иметь блочно-диагональный вид, где в качестве блоков выступают матрицы вида (3) для шарниров плеча, локтя и кисти. Система уравнений для полного манипулятора MIRO выглядит так:

$$\begin{cases} M(q)\ddot{q} + C(q)\dot{q} = K(T\theta_m - q) + g \\ B_m\ddot{\theta}_m + T^T\tau = u_m \\ \tau = K(T\theta_m - q) \end{cases} \quad (4)$$

где M – симметричная матрица инерции твердотельной системы, C – матрица кориолисовых и центробежных взаимодействий, K – положительно определённая матрица жёсткости, g – вектор моментов силы тяжести, B_m – диагональная матрица инерции двигателей, T –матрица преобразования всего манипулятора, для u_m – вектор входных моментов.

Однако, шарнир на рисунке 1 является более сложным. Во-первых, как видно из рисунка, в нём присутствуют дополнительные шестерни, связывающие сателлиты механизма со входными валами. Далее, различается диаметр шестерён, располагающихся в разных плоскостях, вследствие чего необходимо учесть соответствующее передаточное отношение r. Наконец, без учёта упругости предварительного редуктора и шестерён как таковых, механизм содержит два источника упругости (пружины с жёсткостью *k1* и *k2*). Тем не менее, выражения (1), (2), (4) остаются корректными, за исключением конкретного выражения для матрицы жёсткости, которое будет определено ниже. Матрица преобразования манипулятора (механизма) в данном случае будет обозначена как P (P_0), чтобы избежать пересечений, и определяется вместе с матрицей жёсткости.

Чтобы определить эти матрицы, нужно, во-первых, записать уравнение моментов:

$$\begin{cases} \tau_K = -\frac{1}{r}(\tau_{\varphi 2} - \tau_{\varphi 3}) = -(\tau_{e1} - \tau_{e2}) \\ \tau_T = \tau_{\varphi 2} + \tau_{\varphi 3} = r(\tau_{e1} + \tau_{e2}) \end{cases} \quad (5)$$

где τ_T и τ_K – выходные моменты по тангажу (ось x) и крену (ось y) соответственно, τ_φ – моменты на сателлитах, τ_{e1} и τ_{e2} – упругие моменты на соответствующих пружинах, равные

$$\tau_{ei} = k_i\delta_i \quad (6)$$

где δ_i - деформация соответствующей пружины, которую исходя из кинематических отношений, можно выразить через входные и выходные углы как

$$\delta_1 = \theta_{m1} + q_1 - rq_2 \quad (7)$$

$$\delta_2 = -\theta_{m2} - q_1 - rq_2 \quad (8)$$

Тогда, подставляя (6), (7) и (8) в (5), можно определить матрицы жёсткости и преобразования шарниров как

$$K_0 = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -r(k_1 - k_2) \\ -r(k_1 - k_2) & r^2(k_1 + k_2) \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$P_0 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ \frac{1}{2r} & -\frac{1}{2r} \end{bmatrix} \tag{10}$$

В свою очередь, матрицы жёсткости и преобразования для манипулятора в целом K и P являются блочно-диагональными, в который первый элемент равен соответственно жёсткости первого шарнира и единице, а последующие блоки представляют собой матрицы вида (9) и (10) соответствующих шарниров. Как можно заметить, матрица жёсткости сохраняет симметричность, а значит, регулятор можно построить так, как предложено в работе [14]. Однако, такой регулятор в значительной мере опирается на данные модели и потому плохо подходит для применения в слабо детерминированной среде. Перед тем, как предложить новый регулятор, представляет интерес рассмотреть движение системы без работы регулятора, под действием силы тяжести. На рисунках 3 – 5 показаны модель двухстепенного шарнира, модель полного манипулятора и модель всей системы с регулятором и блоком обработки сигналов. Модели являются достаточно простыми, стоит только отметить, что вычисление выходного момента, который определяется как $K_0(P_0\theta_m - q)$ для каждого шарнира, производится при помощи функции в блоке «Elastic Transform».

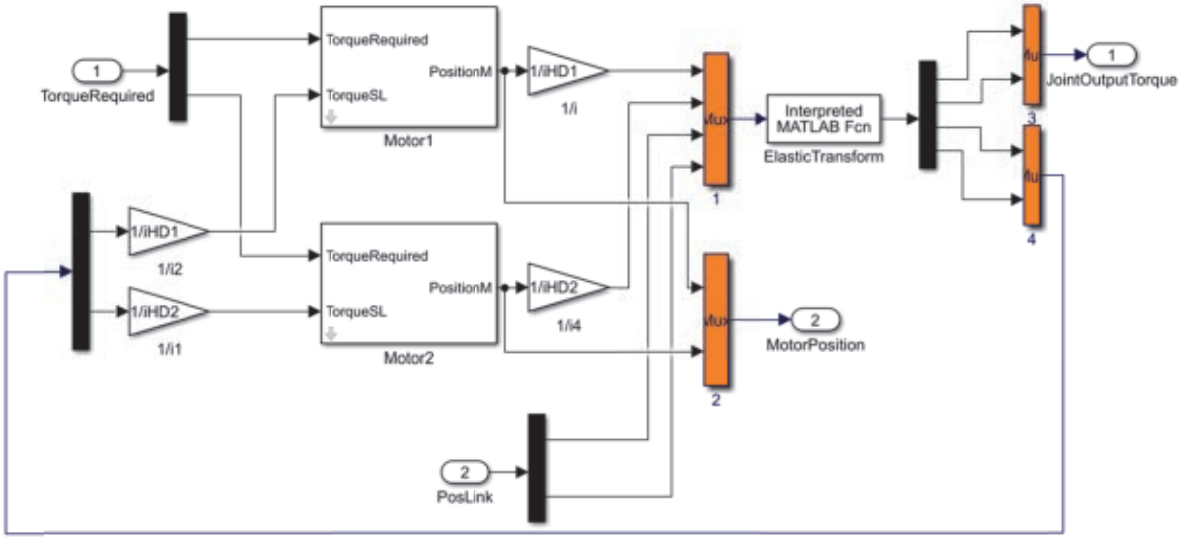


Рисунок 3 — Модель двухстепенного шарнира

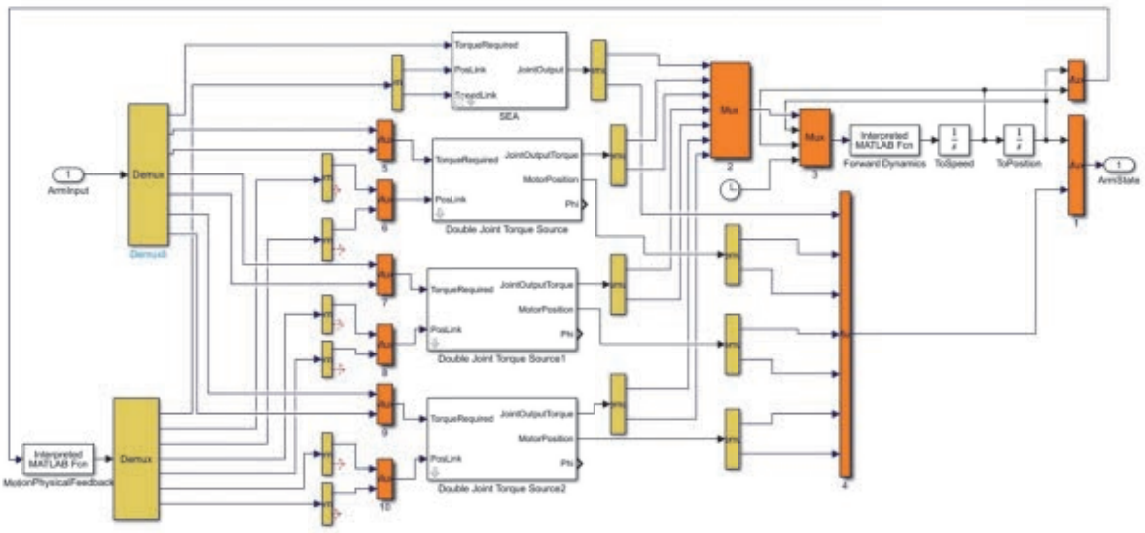


Рисунок 4 — Модель полного манипулятора

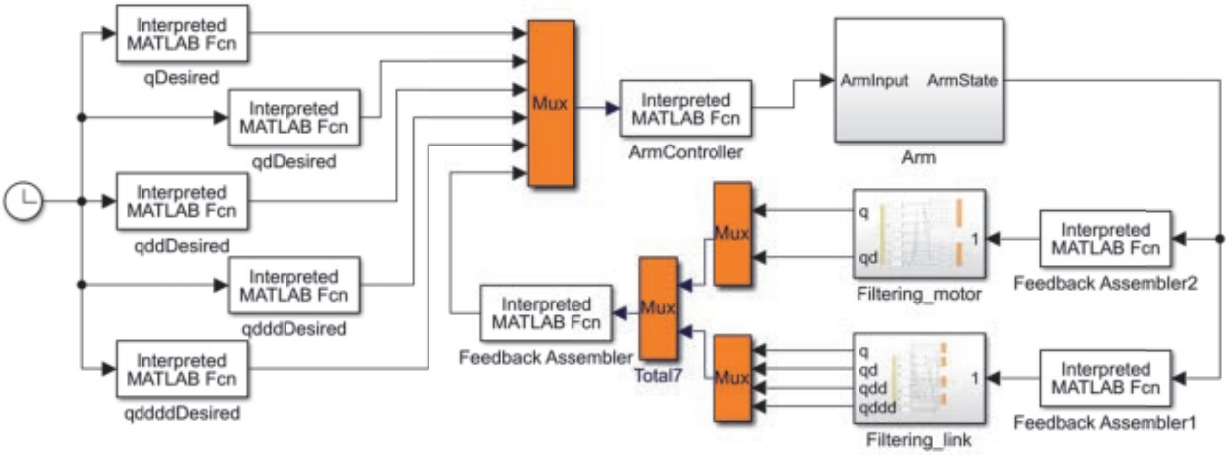


Рисунок 5 — Модель исследуемой системы

Разработка регулятора

Как уже было сказано выше, в основу регулятора положен подход с сохранением упругой структуры [15], основанный на свойстве пассивности системы. Идея в том, чтобы, не меняя инерционных и жесткостных свойств системы, реализовать демпфирование в уравнении выходных координат посредством системы управления, физическое демпфирование грубо принимается равным нулю, так как его величина несущественна и не способна самостоятельно демпфировать колебания пружин при их возникновении. Для разомкнутой системы вида (4), желаемый вид выходного уравнения замкнутой системы будет

$$M\ddot{q} + C\dot{q} = K(\eta - q) - D\dot{q} \tag{11}$$

где η – новая координата двигателя, чтобы получить желаемый вид уравнения, а D – желаемая матрица демпфирования. Тогда переход к новой переменной будет выражаться отношениями

$$\theta = P^{-1}(\eta + K^{-1}n) \tag{12}$$

$$\eta = P\theta_m - K^{-1}n \tag{13}$$

$$n = -D\dot{q} - g \tag{14}$$

При подстановке (13) во второе уравнение системы (4) получается следующее уравнение подсистемы привода:

$$B_m P^{-1}\ddot{\eta} + B_m P^{-1}K^{-1}\ddot{n} + P^T K(\eta - q) + P^T n = u_m \tag{15}$$

Если домножить (14) на P-T слева, и привести левую часть к виду второго уравнения (4), выражение примет вид:

$$B\ddot{\eta} + K(\eta - q) = P^{-T}u_m - BK^{-1}\ddot{n} - n = u_\eta \tag{16}$$

В работе [16] доказывается, что для управления замкнутой системой достаточно ПД-регулятора:

$$u_\eta = -K_P(\eta - q_D) - K_D\dot{\eta}, \tag{17}$$

где q_D - задающее воздействие в форме требуемого положения выходного вала. Тогда требуемый момент управления (на двигателе) составит

$$u_m = P^T(u_\eta + \bar{u}) = P^T(-K_p(\eta - q_D) - K_D\dot{\eta} + BK^{-1}\ddot{n} + n) \quad (18)$$

Стоит отметить особенности матриц K и B. Первая является блочно-диагональной, но симметричной при любых значениях жёсткости пружин. Вторая же после преобразования $B=P^{-T}B_mP^{-1}$ сохраняет диагональную форму. Благодаря этим фактам сохраняется правомерность всех выводов в работе [15]. Далее, для расчёта коэффициентов можно взять за основу формулы из работы [16], с тем отличием, что вместо скалярных величин следует использовать соответствующие матрицы и векторы, при этом в матрице демпфирования D приравнять к нулю все элементы, которые в матрице жёсткости K равны нулю.

Компьютерное моделирование

Для проверки работоспособности регулятора была проведена серия компьютерных экспериментов. Параметры модели, за исключением жёсткости, оставались постоянными. Относительно жёсткости рассматривалось два случая: равная жёсткость пружин внутри дифференциального шарнира (жёсткость всех пружин 2000 Н·м/рад) и различная жёсткость, когда жёсткость второй пружины в паре в 4 раза выше жёсткости первой. В этом случае большая жёсткость пружин составила 2000 Н·м/рад, а меньшая - 500 Н·м/рад.

До того, как исследовать работу регулятора, стоит рассмотреть собственное движение системы под действием силы тяжести, чему был посвящён первый эксперимент. Результаты представлены на рисунке 6. Показано только движение двух степеней шарнира плеча: слева – ось тангажа, справа - ось крена. Движение осуществлялось всем манипулятором. Сигнал управления был равен нулю, роторы двигателей заторможены. Рассмотрено четыре варианта, при этом варианты 1 и 2 – с равной жёсткостью, 3 и 4 – с различной; варианты 1 и 3 – без трения, в вариантах 2 и 4 было добавлено вязкое трение на выходном валу с постоянным коэффициентом D_m. Это не отражено в модели (4), данному эффекту соответствует добавление слагаемого $D_m(\dot{\theta} - \dot{q})$ в правую часть первого уравнения.

Результаты показывают, что в случае различной жёсткости амплитуда колебаний заметно выше, что связано с тем, что одновременно происходит инерциальное и механическое взаимовлияние, при равной же жёсткости сохраняется только инерциальное. При этом в варианте 3 видно, что процесс является колебательным без затухания, как того и следовало ожидать. При добавлении вязкого трения процесс становится затухающим. Данный случай не учтён в формулах и не будет рассмотрен в последующих экспериментах, так как дополнительное демпфирование упрощает работу регулятора.

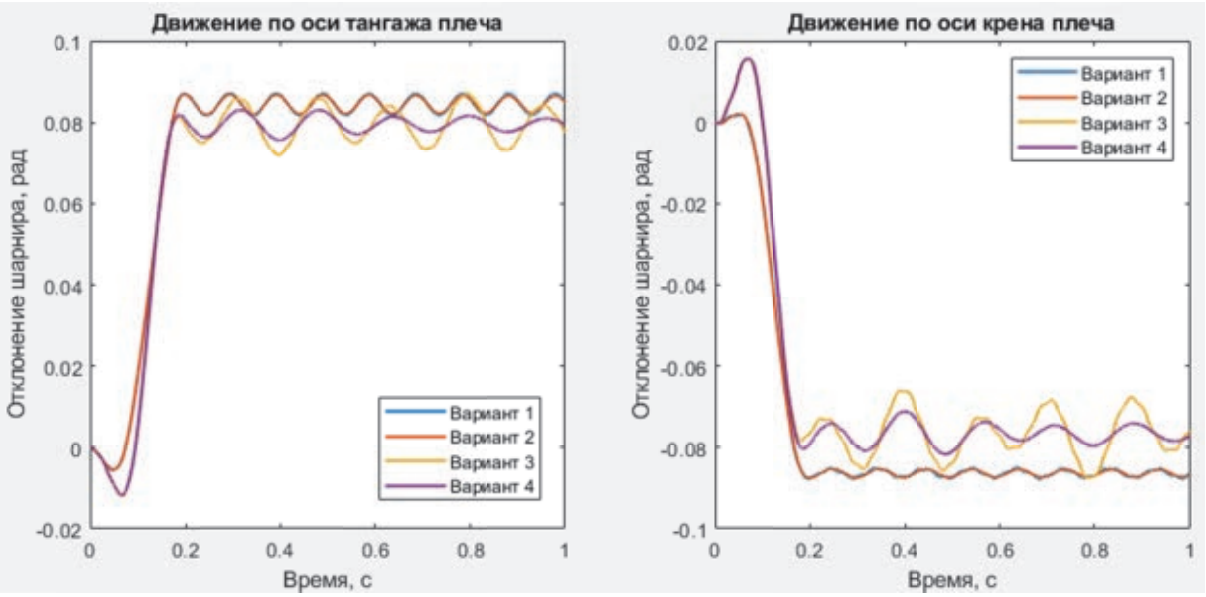


Рисунок 6 — Движение манипулятора под действием силы тяжести

В следующем эксперименте задача заключалась в исполнении полиномиальной траектории по наиболее нагруженной степени – степени тангажа плеча при различных значениях пропорционального коэффициента K_p и коэффициента затухания в уравнении выхода γ, в составе манипулятора, при равной жёсткости. На прочие степени подавалось задание поддерживать исходное положение. Результаты представлены на рисунке 7. Слева показано движение тангажа плеча при соответствующих наборах коэффициентов, справа – отклонение прочих степеней от исходного положения. Последний шарнир в рамках эксперимента был жёстко зафиксирован. На рисунке под шарнирами понимается не механический, а кинематический шарнир, то есть степень подвижности. Аналогичные условия были поставлены и в третьем эксперименте, но использовался вариант с различной жёсткостью пружин. Результаты представлены на рисунке 8.

Из рисунка 7 видно, что исполнение траектории осуществляется успешно, при этом отклонение прочих шарниров от заданного положения минимально. Динамическая ошибка исполнения траектории уменьшается с ростом пропорционального коэффициента регулятора, величина которого ограничена насыщением в системе управления. В случае с различной жёсткостью, ошибка по поддерживающим степеням заметно выше, в частности, по связанной степени – крену плеча (Шарнир 3), однако, она не является критичной, а процесс сохраняет устойчивость.

Далее было исследовано исполнение полиномиальной траектории одновременно по четырём степеням, со второй по пятую, то есть двухстепенными шарнирами плеча и локтя. Рассмотрен только случай с различной жёсткостью как более сложный режим. Результаты приведены на рисунке 9. Из рисунков видно ожидаемое влияние коэффициентов на исполнение траектории, при этом есть возможность выбрать такие значения коэффициентов, чтобы обеспечить наиболее оптимальные для задачи показатели качества, устойчивость сохраняется при любых коэффициентах, до тех пор пока регулятор не уходит в насыщение.

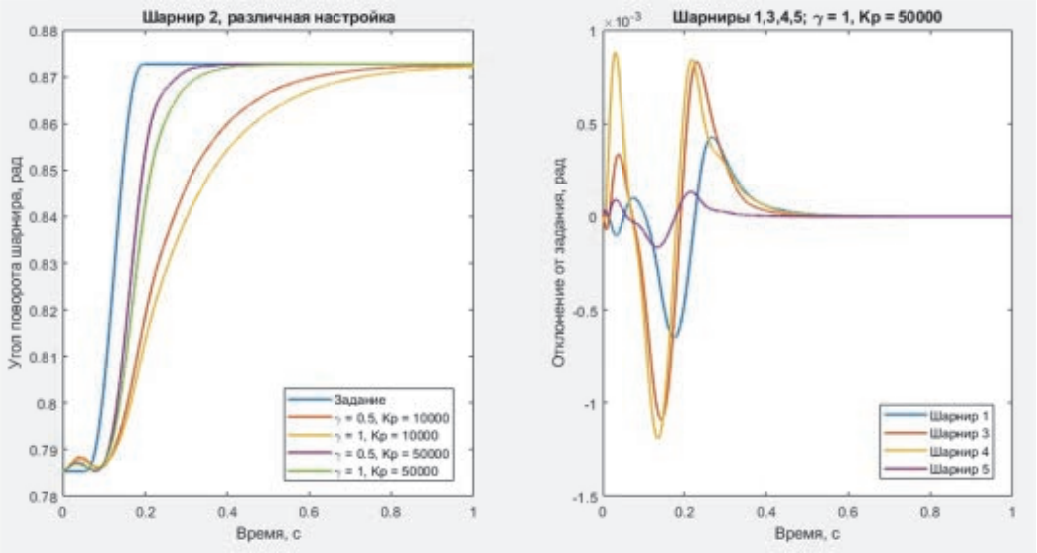


Рисунок 7 — Движение по степени тангажа плеча с поддержанием исходного положения по прочим степеням подвижности при равной жёсткости пружин

В настоящей работе была разработана математическая модель манипулятора, в состав которого входят двухстепенные упругие шарниры дифференциального типа и предложен регулятор для управления данной системой. Регулятор построен в рамках подхода с сохранением упругой структуры, на основе принципа пассивности системы, вследствие чего устойчивость системы сохраняется даже при отклонении параметров объекта управления от значений, использующихся системой управления.

Работоспособность предложенного регулятора была показана посредством компьютерного моделирования. Эксперименты заключались в исследовании собственного движения манипулятора, а

также в движении по заданной полиномиальной траектории при различной настройке регуляторов. Также рассматривались различные случаи относительно жёсткости упругих элементов. Во всех случаях наблюдалось устойчивое движение, в случае полиномиальных траекторий – отсутствие статической ошибки, и прямая зависимость динамической ошибки от пропорционального коэффициента, в пределах линейности регулятора. Случай с равными жёсткостями является наиболее простым для управления вследствие минимального взаимовлияния, однако, практические соображения могут диктовать выбор упругих элементов с различной жёсткостью. В дальнейшей работе планируется расширить позиционный регулятор до траекторного, где будут учитываться производные задающего сигнала, а также реализовать импедансное управление подобным манипулятором.

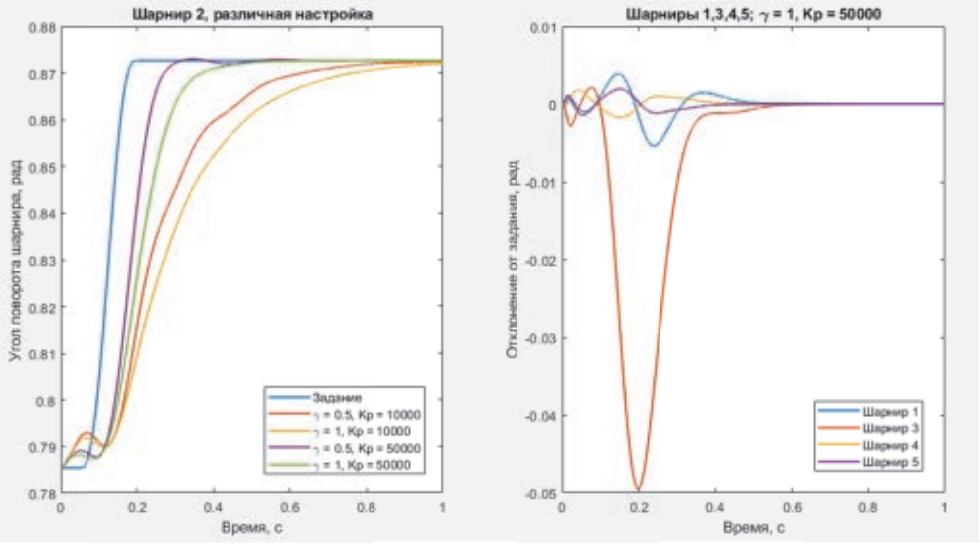


Рисунок 8 — Движение по степени тангажа плеча с поддержанием исходного положения по прочим степеням подвижности при различной жёсткости пружин

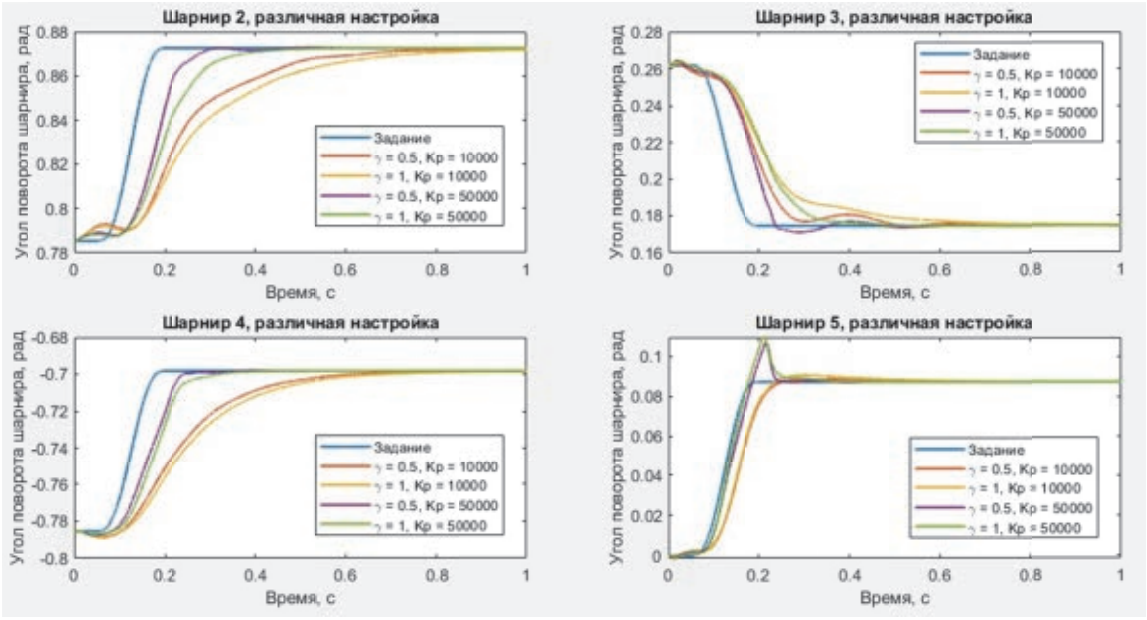


Рисунок 9 — Исполнение полиномиальной траектории группой шарниров

Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России FNRG-2022-0009 1021060307688-8-2.2.2 № 075-01623-22-00 «Исследования конструкций и разработка методов управления мехатронными узлами с переменной жесткостью».

Литература

1. J. Luh, M. Walker, and R. Paul, «Resolved-acceleration control of mechanical manipulators,» in IEEE Trans. Autom. Contr., vol. AC-25, No. 3, pp. 468–471, June 1980.

2. Huang S., Schimmels J. M. Geometric construction-based realization of spatial elastic behaviors in parallel and serial manipulators //IEEE Transactions on Robotics. – 2018. – Т. 34. – №. 3. – С. 764-780.

3. E. Barrett, M. Reiling, G, Barbieri, M. Fumagalli, and R. Carloni, «Mechatronic design of a variable stiffness robotic arm,» IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 4582 - 4588, 2017.

4. S. Wolf et al., «Variable stiffness actuators: review on design and components,» in Trans. on Mechatronics, vol. 21, No. 5, pp. 2418–2430, 2015.

5. Lens T. et al. Biorob-arm: A quickly deployable and intrinsically safe, light-weight robot arm for service robotics applications //ISR 2010 (41st International Symposium on Robotics) and ROBOTIK 2010 (6th German Conference on Robotics). – VDE, 2010. – С. 1-6.

6. U. Hagn et al., «The DLR MIRO: a versatile lightweight robot for surgical applications,» in Ind. Robot, vol. 35, No. 4, pp. 324–336, 2008.

7. V. Kopylov, I. Dalyaev, A. Vasiliev, and V. Titov, «Torque sensing in robotic joints with introduced elasticity for application in hazardous environments,» Robotics and Artificial Intelligence (RAI), pp. 12 - 17, Russia, 2021.

8. M.W. Spong, «Modeling and control of elastic joint robots,» in J. Dyn. Sys. Meas. And Control, vol. 109, No. 4, pp. 310–319, 1987.

9. M.W. Spong, Kh. Khorasani, and P.V. Kokotovic, «An integral manifold approach to the feedback control of flexible joint robots,» in J. Rob. And Autom., vol. 3, No. 4, pp. 291–300, 1987.

10. A.T. Massoud, and H.A. ElMaraghy, «Model-based motion and force control for flexible-joint robot manipulators,» in Int. J. Rob. Research, vol. 16, No. 4, pp. 529–544, August 1997.

11. De Luca, and F. Flacco, «A PD-type regulator with exact gravity cancellation for robots with flexible joints,» IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), pp. 317 - 323, 2011.

12. Müller, «Recursive second-order inverse dynamics for serial manipulators,» IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), pp. 2483 - 2489, 2017.

13. Albu-Schäffer, C. Ott, and G. Hirzinger, «A unified passivity-based control framework for position, torque and impedance control of flexible joint robots,» in Int. J. Rob. Research, vol. 26, No. 1, pp. 23–39, 2007.

14. L. Le Tien, A. Albu-Schäffer, and G. Hirzinger, «MIMO state feedback controller for a flexible joint robot with strong joint coupling,» IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), pp. 3824 - 3830, 2007.

15. Keppler M. et al. Elastic structure preserving (esp) control for compliantly actuated robots //IEEE Transactions on Robotics. – 2018. – Т. 34. – №. 2. – С. 317-335.

16. Shardyko I., M. Samorodova, and V. Titov, «Development of control system for a SEA-joint based on active damping injection,» IEEE Int. Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), pp. 615 - 620, 2020.

П.С. Григорьев, А.А. Трутс, П.А. Лошицкий, Е.А. Смирнов, Д.С. Костромин

О РЕЗУЛЬТАТАХ АПРОБИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В ОБЛАСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург, p.grigorev@rtc.ru

Аннотация

В настоящей работе приведены результаты анализа способов обеспечения радиационной стойкости РТС [1, 2], а также имеющиеся разработки по радиационно стойким РТС [3], представлены результаты разработки радиационно стойкого манипулятора (далее – РСМ), его характеристики, результаты испытаний РСМ, в том числе на стойкость к воздействию ионизирующего излучения. ЦНИИ РТК разработан РСМ, преимуществами которого являются: обеспечение сложных траекторных режимов работы, высокая точность позиционирования – до 0,25 мм (определяется точностью датчика положения и геометрией РСМ), применение отечественной компонентной базы в шарнирах РСМ, подтверждённая испытаниями стойкость к ионизирующему излучению, максимальная интегральная поглощённая доза 50 000 рад. Характеристики РСМ подтверждены в ходе проведения исследовательских испытаний [3, 4], также выявлены наиболее чувствительные к ионизирующему излучению компоненты системы управления РТС, подтверждена стойкость электромеханической части и измерительных устройств РСМ к интегральной поглощённой дозе ионизирующего излучения, определены фактические уровни стойкости электрорадиоизделий, смазочных и уплотнительных материалов к ионизирующему излучению.

Ключевые слова

Ионизирующее излучение, стойкость к радиации, манипулятор, робототехническая система, радиационно стойкий манипулятор.

P.C. Grigorev, A.A. Truts, P.A. Loshitskiy, E.A. Smirnov, D.C. Kostromin

THE RESULTS OF TECHNICAL SOLUTIONS TESTING IN THE FIELD OF ROBOTIC SYSTEMS RADIATION RESISTANCE ASSURANCE

Russian State Scientific Centre for Robotics and Technical Cybernetics, St. Peterburg, Russia, p.grigorev@rtc.ru

Abstract

This paper presents the results of an analysis of methods for ensuring the radiation resistance of robotic systems (hereinafter - RTS) [1, 2], as well as the existing developments on radiation-resistant RTS [3], presents the results of the development of a radiation-resistant manipulator (hereinafter - RRM), its characteristics, PCM test results, including resistance to ionizing radiation. Central Research Institute RTC developed the RRM, the advantages of which are: complex trajectory modes of operation, high positioning accuracy - up to 0.25 mm (depends on the accuracy of the position sensor and the RRM geometry), the use of native component base in the RRM hinges, test-proven resistance to ionizing radiation, maximum integral absorbed dose 50,000 rad. The characteristics of the RRM were confirmed during research tests [3, 4], the most sensitive to ionizing radiation components of the RTS control system were also identified, the resistance of the electromechanical part and measuring devices of the RRM to the integral absorbed dose of ionizing radiation was confirmed, the actual levels of resistance to ionizing radiation of electrical goods, lubricants and seals were determined.

Key words

Ionizing radiation, radiation resistance, manipulator, robotic system, radiation-resistant manipulator.

Развитие технологий использования атомной энергии открывает доступ к созданию источников доступной экологически безопасной электроэнергии, созданию новых технологических цепочек не только в энергетике, но и медицине, промышленности и т.д., исследованию новых технологий и зна-

ний. В то же время развитие этого процесса невозможно без организации промышленных технологических цепочек по переработке и подготовке ядерных материалов (в том числе топлива).

При этом нельзя не учитывать, что сами технологические процессы по переработке и подготовке ядерных материалов подразумевают работу с опасными для человека материалами и не могут быть реализованы с широким участием обслуживающего персонала без средств роботизации, обеспечивающих возможность выполнения операций в дистанционном режиме. Вопросы создания безлюдной технологии обслуживания специализированного оборудования для остекловывания высокоактивных отходов рассмотрены в [5].

Актуальность данной работы состоит в том, что на сегодняшний день отсутствует комплекс технических средств, позволяющий создавать технологические линии производства и переработки ядерных материалов желаемой производительности и обеспечивающие необходимую безопасность для обслуживающего персонала. Одним из ключевых элементов в данном комплексе технических средств являются стойкие к радиации робототехнические системы (далее – РТС).

Целью настоящей работы является разработка и изготовление макетного образца манипулятора в рамках обеспечения безлюдного производства для применения в условиях с повышенным радиационным фоном, предназначенного для выполнения различных технологических операций.

Задачи работы:

- анализ способов обеспечения радиационной стойкости РТС,
- анализ имеющихся разработок по радиационно-стойким РТС,
- разработка эскизной конструкторской документации манипулятора, стойкого к ионизирующему излучению (далее – РСМ),
- изготовление ключевых узлов РСМ,
- исследовательские испытания ключевых узлов РСМ, в том числе на стойкость к воздействию ионизирующего излучения.

Направления деятельности, в которых могут быть применены РТС, стойкие к радиации представлены на рисунке 1.

а), б) – «горячие» камеры для работы с радиоактивными материалами [6, 7]; в) – сортировка радиоактивных отходов [8]; г) – фрагментация радиоактивных отходов [9]

Рисунок 1 – Опасные производства, на которых требуется применять РТС, стойкие к радиации

В ходе выполнения работ проанализированы решения, обеспечивающие радстойкость РТС. Основными подходами являются:

– защита временем воздействия – при низкой непрерывной, либо низкой периодической интенсивности ионизирующего излучения возможна реализация РТС с использованием нерадстойких компонентов;

– защита расстоянием – в случае высокой чувствительности компонентов РТС к ионизирующему излучению, применяется конструкция, в которой управляющая часть РТС выносится из рабочей зоны РТС или размещается на значительном удалении от источника ионизирующего излучения;

– защита количеством – один из видов резервирования, при котором защита оборудования от ионизирующего излучения обеспечивается увеличением числа компонентов. Выход из строя одного или нескольких компонентов вследствие влияния ионизирующего излучения не приводит к критическим нарушениям в работе оборудования;

– применение радстойких компонентов и экранирование – защита РТС от воздействия ионизирующего излучения обеспечивается применением нечувствительных к ионизирующему излучению компонентов и/или экранированием чувствительных элементов. Данный тип защиты применяется в случаях, когда обеспечение иных видов защит невозможно по конструктивным, энергетическим, технологическим и иным параметрам.

В процессе работ по данной теме произведён обзор аналогичных манипуляторов, функционирующих в составе РТС. В результате выделены ключевые технические решения в данной области:

– копирующие манипуляторы в «горячих» камерах;

– нерадстойкие промышленные манипуляторы в составе РТС для рабочих зон с низкой мощностью ионизирующего излучения;

– аналоги нерадстойких промышленных манипуляторов, в радстойком исполнении, которое обеспечивается одним из описанных выше подходов. [10]

Создание РТС, стойких к ионизирующему излучению сопряжена с особенностями, которые возможно условно разделить на две группы: особенности разработки стойких к радиации РТС, а также особенности испытаний РТС на стойкость к ионизирующему излучению. К особенностям разработки стойких к радиации РТС следует отнести:

– ограниченная доступность данных о стойкости материалов и ЭРИ к ионизирующему излучению [1, 2];

– значительное увеличение массы и габаритов в условиях применения радстойких компонентов и экранирования;

– усложнение технологического оборудования при использовании интегральных компоновок и применении экранирования в качестве мер защиты.

При подготовке к испытаниям на стойкость РТС к ионизирующему излучению, а также в процессе их проведения требуется учитывать следующие особенности:

– трудности воспроизведения параметров ионизирующего излучения, характерных для работы РТС, в условиях испытательных центров;

– экономические ограничения на длительность проведения исследовательских испытаний;

– необходимость разработки средств автоматизированного контроля параметров РТС в процессе проведения испытаний.

По результатам анализа технических решений в области стойкости РТС к ионизирующему излучению принято решение о создании РСМ с шестью степенями свободы, без электронных компонентов в составе шарниров. Таким образом, разработанный РСМ представляет собой модульную конструкцию, стойкую к ионизирующему излучению за счёт отсутствия в ней компонентов чувствительных к радиации. В составе шарниров и звеньев манипулятора отсутствуют электронные блоки, все элементы управления и обработки показаний датчиков вынесены в блок управления.

Модульность конструкции обеспечивает возможность переконфигурирования РСМ под конкретную производственную задачу. В общем виде РСМ представляет собой стойкий к ионизирующему излучению аналог шестистепенного промышленного манипулятора. Отсутствие электронных компонентов в составе шарниров повышает ремонтопригодность, а также обеспечивает лучшие массогабаритные характеристики, по сравнению с вариантом экранирования электроники или применения стойких к ионизирующему излучению компонентов. Выбор компонентов, стойких к ионизирующему излучению, для узлов манипулятора и оборудования для проведения испытаний произведён с использованием источников [1, 2].

В ходе работ по теме ЦНИИ РТК разработан РСМ, внешний вид которого представлен на рисунке 2. Характеристики РСМ представлены в таблице 1.

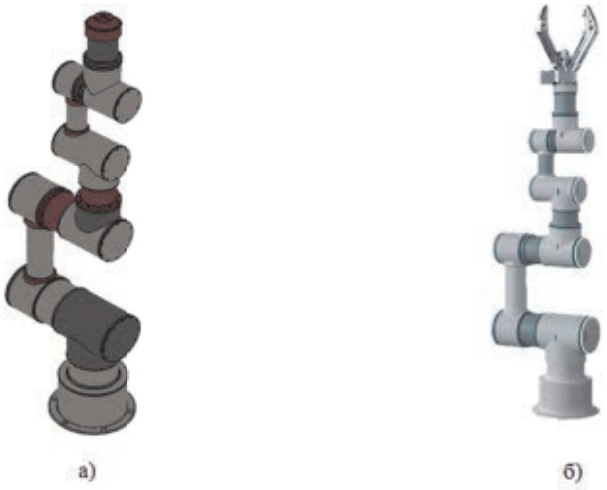


Рисунок 2 — Внешний вид РСМ, разработанного ЦНИИ РТК: а) общий вид;
б) РСМ с установленным инструментом

Таблица 1 — Характеристики РСМ, разработанного ЦНИИ РТК

Параметр	**Значение**	**Единицы измерения**
радиус рабочей зоны, не менее	1304,00	мм
точность позиционирования конечной точки	до 0,25*	мм
грузоподъемность манипулятора, не менее	10,00	кг
масса манипулятора, не более	122,50	кг
окружающая среда рабочей зоны манипулятора	воздух	–
диапазон рабочих температур	+10,00…+50,00	град. °С
относительная влажность воздуха при температуре +25 □ не более	80,00	%
стойкость к мощности дозы в 1 м от источника ионизирующего излучения, не более	0,55 (55,00)	грей/ч (рад/ч)
режимы управления шарнирами манипулятора	Скоростной позиционный моментный	–
режимы управления манипулятором	Траекторный «точка-точка»	–
возможность работы со сменным инструментом	есть	–

* – определяется геометрией манипулятора и типом применяемого датчика положения.

РСМ является стойким как к сухой дезактивации методом обдувки и/или шлифовки поверхности, так и к жидкостной дезактивации. РСМ предназначен для работы в условиях непосредственного воздействия радиации – мощность дозы в 1 м от источника ионизирующего излучения не более 55 рад/ч. РСМ является стойким к ионизирующему излучению – максимальная интегральная поглощённая доза ионизирующего излучения 50 000 рад (500 грей). [4, 10, 11] В шарнирах РСМ применяется отечественная компонентная база – электродвигатели синхронные трёхфазные с постоянными магнитами на роторах и вращающиеся трансформаторы в качестве датчиков положения выходного вала шарнира. В составе шарниров РСМ используются отечественные смазки следующих марок: смазка ВНИИНП-273 ТУ 38.1014767-74, смазка ВНИИНП-276 ТУ 38.1011062-81, смазка ЦИАТИМ-221 ГОСТ 9433-80. Перечисленные смазки также испытаны на стойкость к ионизирующему излучению.

С целью подтверждения параметров разработанного РСМ проведены испытания: проверка электрических и механических характеристик ключевых узлов РСМ, а также проверка их работоспособности до, после и во время воздействия ионизирующего гамма-излучения. На рисунке 3 представлено размещение испытуемого шарнира РСМ на «Стенде испытательном» Т14-0380 для подтверждения механических характеристик шарнира.

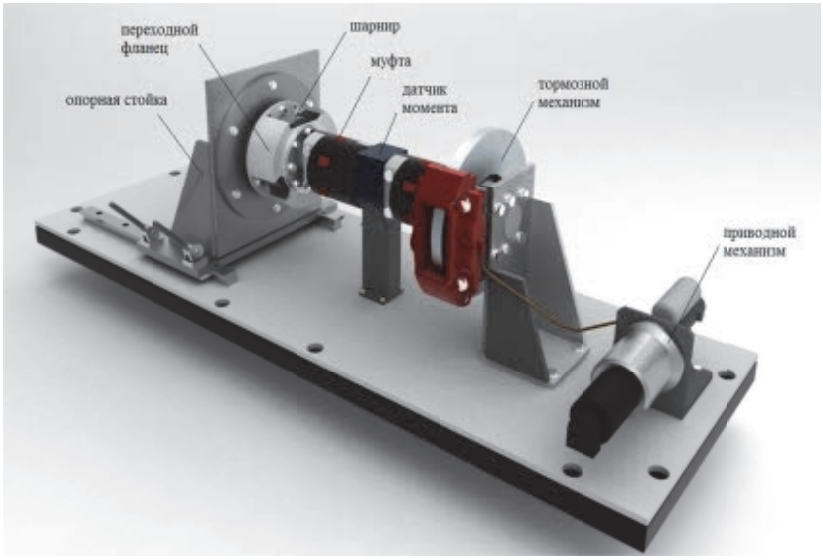


Рисунок 3 — Шарнир тангажа локтя РСМ на «Стенде испытательном» Т14-0380

Для исследования стойкости ключевых узлов РСМ к ионизирующему излучению проведены испытания на гамма-установке с изотопом Co^{60} (кобальт-60), наименование исследовательской установки – К-120000. Сведения об испытательной установке и средствах дозиметрии приведены соответственно в таблицах 2 и 3 [12].

Таблица 2 — Сведения об испытательной установке

Параметр	Значение
Наименование установки	К-120000
Номер паспорта установки	ГУ 042-30009-252-20 ПС
Номер протокола аттестации (ПА)	№ 2072/0009-21 от 20.01.2021 г.
Срок действия аттестации (действует до)	январь 2022 г.
Тип источника	Co^{60}
Максимальная энергия излучения, МэВ	1.33
Условия окружающей среды	Нормальные климатические условия

Таблица 3 — Сведения о штатных средствах дозиметрии испытательной установки

Параметр	Значение
Наименование	ДКС-АТ5350/1 с ионизационной камерой ТМ30010-10
Заводской номер дозиметра	10570
Заводской номер ионизационной камеры	000807

В ходе испытаний оценивалась стойкость к ионизирующему излучению не только электромеханической части РСМ, но также и электрорадиоизделий (далее – ЭРИ). Испытаниям на стойкость к воздействию ионизирующего гамма-излучения подвергались следующие элементы РСМ:

- шарнир тангажа кисти в составе: электродвигатель синхронный трёхфазный с постоянными магнитами на роторе, датчики эффекта Холла, датчик положения выходного вала шарнира;
- блок управления приводом в составе: сервоусилитель на импортных ЭРИ №1, сервоусилитель на импортных ЭРИ №2, сервоусилитель на отечественных ЭРИ;
- образцы смазок;
- образцы корпусных элементов;
- образцы уплотнительных элементов.

При этом для контроля состояния испытуемых элементов РСМ на пульте оператора размещены резервный шарнир тангажа локтя, а также блок управления и коммутации. Внешний вид шарнира тангажа кисти, блока управления приводом, шарнира тангажа локтя и блок управления и коммутации представлен на рисунке 4. Схема подключения ключевых узлов РСМ на испытательном стенде установки К-120000 представлена на рисунке 5.

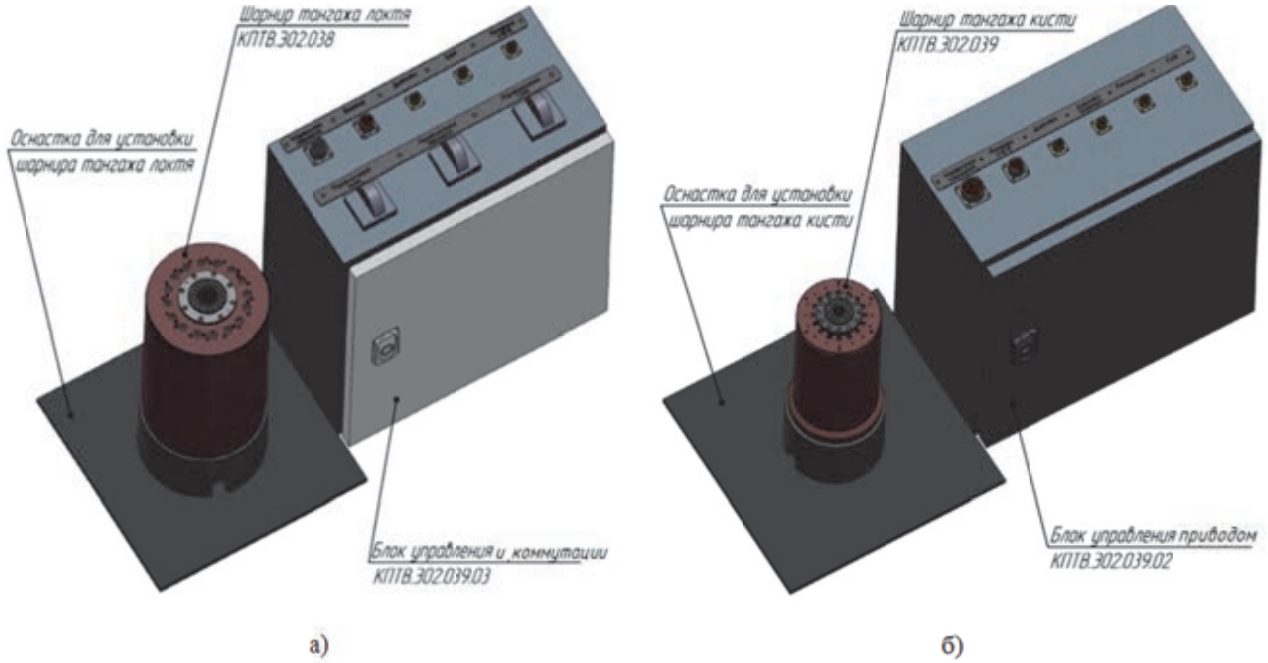


Рисунок 4 — Внешний вид ключевых узлов РСМ: а) шарнир тангажа локтя и блок управления и коммутации; б) шарнир тангажа локтя и блок управления приводом

Внешний вид рабочего места оператора представлен на рисунке 6 (а). Внешний вид пульта оператора представлен на рисунке 6 (б). Установка испытуемого оборудования в блоке управления приводом обеспечивает размещение испытуемого оборудования в одной плоскости и на одинаковом удалении от источников гамма-излучения, как это показано на рисунке 7. Таким образом, обеспечивается равномерное облучение испытуемого оборудования.

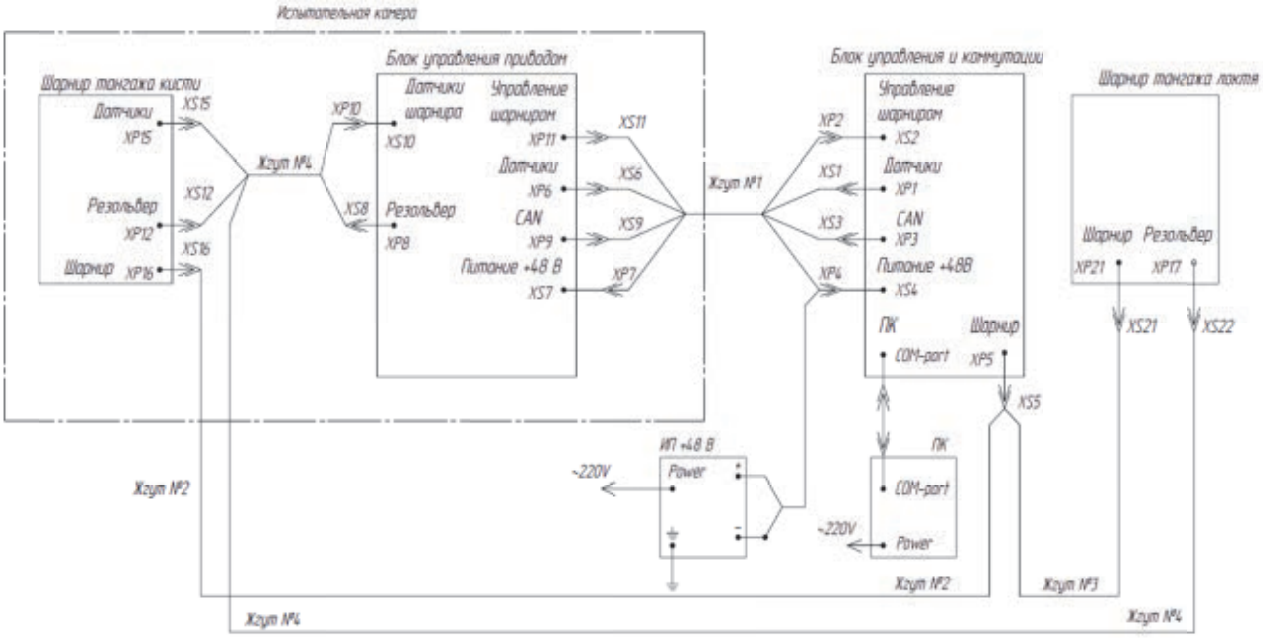
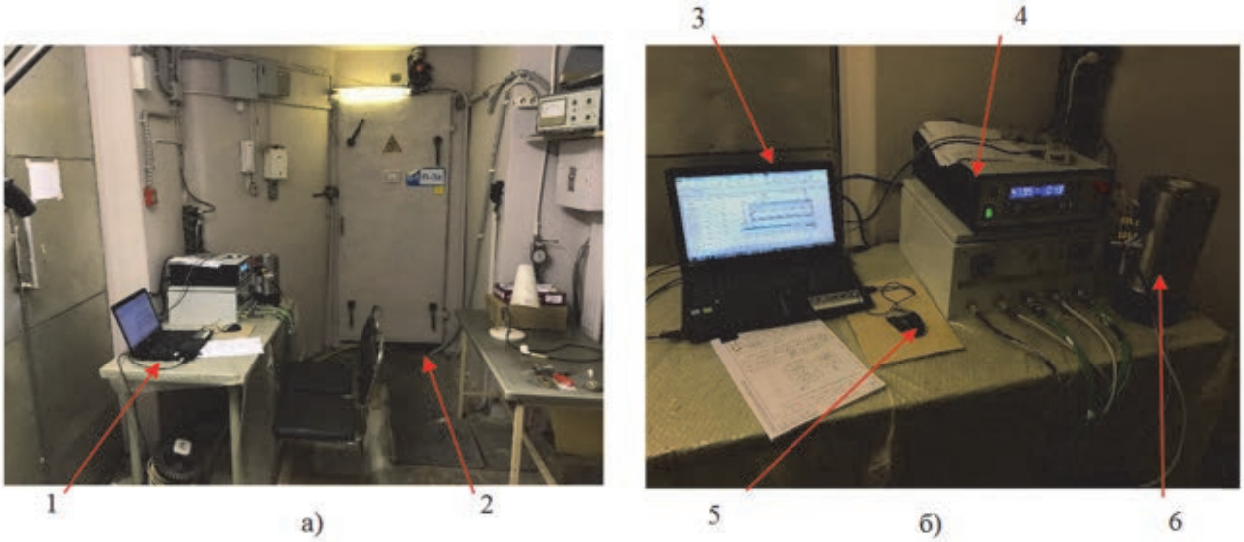


Рисунок 5 — Схема подключения ключевых узлов РСМ на испытательном стенде установки К-120000

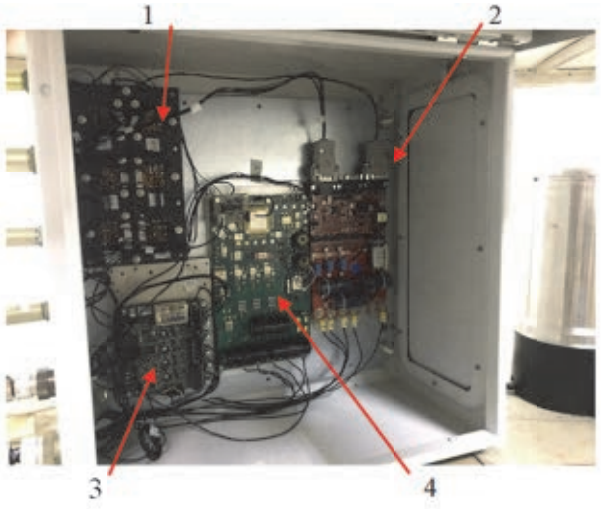


1 – пульт оператора, 2 – ввод кабелей в рабочий зал гамма-установки; 3 – программное обеспечение контроля параметров; 4 – источник питающего напряжения; 5 – блок управления и коммутации, 6 – шарнир тангажа локтя

Рисунок 6 — Размещение ключевых узлов РСМ и контрольной аппаратуры на испытательном стенде: а) внешний вид рабочего места оператора; б) внешний вид пульта оператора

Функциональная схема коммутации ключевых узлов РСМ представлена на рисунке 8. Данная схема обладает следующими преимуществами:

– проверка работоспособности испытуемых ключевых узлов РСМ во всех доступных режимах и от всех доступных устройств управления,
– резервирование всей управляющей электроники,
– резервирование шарниров,
– аппаратура коммутации на пульте оператора,
– коммутация каждого шарнира с каждым сервоусилителем.



1 – устройство коммутации шарниров; 2 – сервоусилитель на импортных ЭРИ №1; 3 – сервоусилитель на импортных ЭРИ №2; 4 – сервоусилитель на отечественных ЭРИ

Рисунок 7 — Размещение испытуемых сервоусилителей внутри блока управления приводом

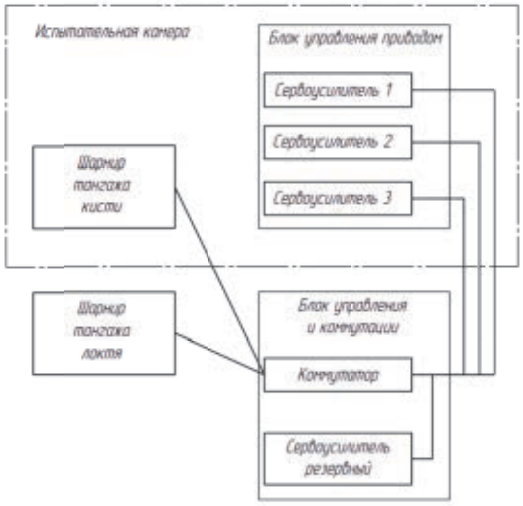


Рисунок 8 — Функциональная схема коммутации ключевых узлов РСМ

Результаты испытаний ключевых узлов РСМ на стойкость к ионизирующему излучению приведены в таблице 4.

Таблица 4 — Результаты испытаний ключевых узлов РСМ

Объект	**Регистрируемая доза излучения, рад**	**Воспринимаемая доза излучения, рад**	**Признаки наступления отказа**
Сервоусилитель на импортных ЭРИ №1	9 720	4 209	отсутствие энергопотребления
Сервоусилитель на импортных ЭРИ №2	26 418	11 440	отсутствие энергопотребления
Сервоусилитель на отечественных ЭРИ	91 747	39 730	отсутствие связи, снижение энергопотребления
Двигатель шарнира	более 116 640	50 509	не выявлено
Датчик Холла	более 116 640	50 509	не выявлено

Объект	Регистрируемая доза излучения, рад	Воспринимаемая доза излучения, рад	Признаки наступления отказа
Вращающийся трансформатор	более 116 640	50 509	не выявлено
Образцы смазок	более 116 640	50 509	не выявлено
Образцы корпусных элементов	более 116 640	50 509	не выявлено
Образцы уплотнительных элементов	более 116 640	50 509	не выявлено

Фактический уровень стойкости образцов определяется по формуле (1) в соответствии с РД В 319.03.31-99:

$$D_{\text{ТР}} = D_{\text{ОТК}} \times K_1 \times (1 - \Delta_{\text{ДОЗ}}) \quad (1)$$

где $D_{\text{ТР}}$ – подтвержденный уровень предельной накопленной дозы, рад[Si]; $D_{\text{ОТК}}$ – минимальное значение предельной экспозиционной дозы (дозы отказа) по выборке испытанных изделий, Р (рентген); K_1 – коэффициент пересчета от поглощенной дозы в кремнии к экспозиционной дозе, K_1 = 0,88 рад[Si]/Р; $\Delta_{\text{ДОЗ}}$ – относительная погрешность дозиметрии, в данном случае $\Delta_{\text{ДОЗ}}$=0,03 [4].

В столбце 2 таблицы 4 указывается значение дозы, пересчитанной от поглощенной дозы в кремнии к экспозиционной дозе. С учётом объёма выборки необходимо произвести пересчёт интегральной дозы, воспринимаемой оборудованием. В столбце 3 таблицы 4 указаны значения воспринимаемой дозы излучения, рассчитанные в соответствии с формулой (2):

$$D = D_{\text{ТР}} / K_2 \quad (2)$$

где D – воспринимаемая доза излучения, рад; K_2 – коэффициент, учитывающий объём выборки, для 1 ед. оборудования K_2=2,24.

Как следует из таблицы 4, наиболее продолжительное время работы в условиях непосредственного воздействия ионизирующего излучения демонстрирует отечественная электронная компонентная база. Влияние ионизирующего излучения на работоспособность комплектующих испытуемого шарнира не отмечено.

Выводы по результатам испытаний СЧ радстойкого манипулятора на стойкость к ионизирующему излучению:

– обновлены данные о стойкости к ионизирующему излучению для ЭРИ, ранее испытанных при мощности дозы излучения, равной 500 рад;

– выявлены наиболее чувствительные к ионизирующему излучению компоненты системы управления РТС;

– подтверждена стойкость электромеханической части и измерительных устройств к заданной мощности дозы ионизирующего излучения: электродвигателей синхронных трёхфазных с постоянными магнитами на роторах и вращающихся трансформаторов;

– определены фактические уровни стойкости ЭРИ к интегральной поглощённой дозе ионизирующего гамма-излучения;

– определены фактические уровни стойкости к интегральной поглощённой дозе ионизирующего гамма-излучения для смазок, корпусных и уплотнительных элементов, применяемых в составе шарниров РСМ: смазка ВНИИНП-273 ТУ 38.1014767-74, смазка ВНИИНП-276 ТУ 38.1011062-81, смазка ЦИАТИМ-221 ГОСТ 9433-80.

В результате анализа данных, полученных в ходе исследовательских испытаний ключевых узлов РСМ на стойкость к ионизирующему излучению, сформулированы рекомендации:

− необходимо применение радстойких ЭРИ для обеспечения максимального периода работы системы управления РТС;

− для обеспечения надёжной бесперебойной работы РТС в указанных условиях требуется экранировать чувствительные к ионизирующему излучению ЭРИ;

− в случае невозможности экранирования системы управления от излучения, требуется обеспечить безаварийную остановку РТС при отказе компонентов системы управления;

− рекомендуется вынесение системы управления за пределы зоны воздействия ионизирующего излучения с целью доступности для обслуживания и ремонта.

− Перспективы развития РТС с использованием разработанного ЦНИИ РТК РСМ:

− системы дистанционного обслуживания комплексов переработки радиоактивных отходов (сортировка, фрагментация, остекловывание), в том числе, системы с внедрением технологий виртуальной реальности;

− системы автоматического обследования объектов ядерной энергетики;

− системы автоматического и дистанционного обслуживания реакторных установок.

Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России FNRG-2022-0024 1021101316166-9-2.2.2 № 075-01623-22-03 «Разработка приводного модуля повышенной радиационной стойкости с изменяемым передаточным числом и использованием электромагнитной муфты».

Литература

1. Радиационные эффекты в космосе. Часть 2. Воздействие космической радиации на электротехнические материалы / И. П. Безродных, А. П. Тютнев, В. Т. Семёнов. – М.: АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2016. – 122 с.

2. Радиационные эффекты в космосе. Часть 3. Влияние ионизирующего излучения на изделия электронной техники / И. П. Безродных, А. П. Тютнев, В. Т. Семёнов. – М.: АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2017. – 64 с.

3. Протокол № 2НТО-13-5 от 30.09.2021 испытаний макетов ключевых узлов манипулятора КПТВ.Э02.020.

4. Протокол № 2НТО-13-5/2 от 29.09.2021 исследовательских испытаний макетов ключевых узлов манипулятора КПТВ.Э02.020.

5. Автоматическое обслуживание установки индукционной плавки в холодном тигле с помощью средств робототехники. Даляев И.Ю., Трутс А.А., Шавликов А.А., Жеребцов А.А., Мочалов Ю.С., Шадрин А.Ю. Робототехника и техническая кибернетика. 2022. Т. 10. № 3. С. 228-235.

6. LENTA.RU [Электронный ресурс]: По сусекам — на миллиарды. Как атомная госкорпорация России экономит на закупках. URL: https://m.lenta.ru/articles/2016/10/19/rosatom_sistemazakupok_economy (дата обращения: 05.06.2022).

7. Commons.Wikimedia.org [Электронный ресурс]: File:Alpha-Gamma Hot Cell Facility 001.jpg. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Alpha-Gamma_Hot_Cell_Facility_001.jpg (дата обращения: 05.06.2022).

8. Экспертный журнал о мусоре, отходах производства [Электронный ресурс]: Где и как хранят радиоактивные отходы в России: классификация ядерных отходов, способы дезактивации, хранения и захоронения отходов 1 и 2 класса опасности. URL: https://vseomusore.com/otkhody/gde-i-kak-hranyat-radioaktivnye-othody-v-rossii-klassifikatsiya-yadernyh-othodov-sposoby-dezaktivatsii-hraneniya-i-zahoroneniya-othodov-1-i-2-klassa-opasnosti (дата обращения: 05.06.2022).

9. ФГУП «РАДОН» [Электронный ресурс]: Установка “Бокс сортировки и фрагментирования твердых радиоактивных отходов”. URL: https://radon.ru/files/images/box.pdf (дата обращения: 05.06.2022).

10.Разработка многофункционального манипулятора для применения в условиях с повышенным радиационным фоном. Этап 2021 г. [Текст]: отчёт о НИОКР (промежуточ., этап 1) / ЦНИИ РТК; рук. Даляев И.Ю.; исполн.: Трутс А.А. [и др.]. – СПб., 2021. – 67 с. – Инв. № 1487.

11.Разработка многофункционального манипулятора для применения в условиях с повышенным радиационным фоном. Этап 2021 г. [Текст]: отчёт о НИОКР (заключ., этап 2) / ЦНИИ РТК; рук. Даляев И.Ю.; исполн.: Трутс А.А. [и др.]. – СПб., 2021. – 95 с. – Инв. № 1497.

12.Изотопная гамма-установка К-120000: профили мощности экспозиционной дозы и энергетический спектр фотонов / Е. В. Митин, Е. Н. Некрасова, В. Н. Ломасов [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2021. – № 4. – С. 28-33. – EDN BSUYHO.

М.В. Ремизов, О.В. Вольпяс

ПЕРСПЕКТИВНАЯ АППАРАТУРА РАДИАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ

ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург, m.remizov@rtc.ru; o.volpyas@rtc.ru

Аннотация

В статье представлен обзорный материал о перспективной аппаратуре радиационного мониторинга объектов в условиях повышенного гамма и нейтронного фона, в составе мобильных робототехнических комплексов (МРТК) в целях решения задач экстремальной робототехники.

Рассмотрены ключевые задачи экстремальной робототехники в области радиационной безопасности, приведен обзор современного оборудования радиационного мониторинга, обоснована необходимость использования средств радиационного мониторинга в качестве элементов МРТК, обоснована актуальность разработки высокоточной спектрометрической аппаратуры, включая рассмотрение соответствующих вопросов конструктивного и технологического характера. Приведены возможные варианты и схемы размещения оборудования радиационного мониторинга, разработанного в ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, в составе МРТК.

Ключевые слова

Экстремальная робототехника, МРТК, энергетическое разрешение, гамма-излучение, визуализация источников гамма-излучения, гамма-локатор, гамма-камера, блок детектирования гамма-излучения, гамма-спектрометр, СПО.

M.V. Remizov, O.V. Volpyas

ADVANCED RADIATION MONITORING EQUIPMENT FOR SOLVING PROBLEMS OF EXTREME ROBOTICS

Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, St. Petersburg, Russia, m.remizov@rtc.ru; o.volpyas@rtc.ru

Abstract

The article presents an overview of the use of radiation monitoring equipment equipped as part of mobile robotic complexes (MRTC) for solving problems of extreme robotics.

The key tasks of extreme robotics in the field of radiation safety are considered, an overview of radiation monitoring equipment equipped with SSW is given, the necessity of using radiation monitoring tools as elements of MRTC, including solving issues of a constructive and technological nature, is substantiated. The possible options and schemes for the placement of radiation monitoring equipment developed in the State Research Center of the Russian Federation of the Central Research Institute of the RTC, as part of the MRTC, are given.

Key words

Extreme robotics, MRTC, energy resolution, gamma radiation, visualization of gamma radiation sources, gamma locator, gamma camera, spectrometric gamma radiation detection unit, gamma spectrometer, special software (SSW).

Аппаратура радиационного мониторинга применяется на радиационноопасных объектах при их эксплуатации для контроля уровня радиации, также при исследовании радиационной обстановки в случае возникновения внештатных ситуаций. При осуществлении работ в области ядерной энергетики и атом-

ной промышленности для более точного и быстрого анализа радиационной обстановки желательно использование устройств детектирования ионизирующего излучения с высоким энергетическим разрешением и с возможностью работы в непосредственной близости от радиационноопасных объектов. Поэтому с целью снижения дозовой нагрузки на персонал широко применяются мобильные робототехнические комплексы (МРТК), несущие на борту дозиметрическую и спектрометрическую аппаратуру.

Решение вопросов разработки данной аппаратуры в составе МРТК, включая их конструирование и оснащение необходимым специальным программным обеспечением, актуально для обеспечения безопасности при выполнении работ на атомных и космических станциях, при утилизации ядерных отходов и работе в радиоактивно загрязненных районах.

Для решения задачи мониторинга радиационной обстановки могут быть применены различные типы устройств от обычных дозиметров, отслеживающих уровень мощности дозы, до гамма-локаторов, позволяющих определять угловое распределение регистрируемого излучения и гамма-спектрометров, измеряющих энергетическое распределение гамма-излучения.

Принцип работы гамма-спектрометров основан на способности примененных в них детектирующих элементов определять энергию регистрируемой гамма-частицы. Так как каждый радионуклид имеет свои характерные линии (энергии) гамма-излучения, полученный спектр гамма-излучения дает возможность определять состав радионуклидов, создающих исследуемое гамма-излучение. Основной характеристикой гамма-спектрометра является его энергетическое разрешение – способность разделять близко расположенные линии (энергии), или другими словами, погрешность в определении энергии регистрируемой частицы [2]. Существуют различные типы гамма спектрометров: на газоразрядных счетчиках, работающих в пропорциональном режиме, на сцинтилляционных неорганических кристаллах или полимерных сцинтилляторах, на основе полупроводников кремния или германия. Преимуществом гамма-спектрометров на основе полупроводниковых детекторов, где в качестве детектирующих элементов используется особо чистый германий (ОЧГ), по сравнению со сцинтилляционными, является их высокое энергетическое разрешение – порядка 0,2 %, позволяющее различать гамма-линии, разница между которыми составляет ~ 3 кэВ.

Такая точность делает гамма-спектрометры на основе ОЧГ одним из основных измерительных инструментов при проведении радиационного мониторинга, анализе и контроле ядерного топлива, сортировке и переработке радиоактивных отходов. Поэтому обеспечение оперативности и точности измерений ставит перед разработчиками задачу по разработке высокоточной спектрометрической аппаратуры на основе ОЧГ детекторов для использования в составе МРТК. Однако, из-за сильной деградации кристалла ОЧГ при воздействии нейтронного излучения (возникающего при радиоактивном загрязнении), актуальным становится задача по повышению стойкости или защите детектора от нейтронного излучения.

В данном обзоре представлены основные задачи в области создания высокоточной аппаратуры радиационного мониторинга для размещения на борту МРТК и решения задач экстремальной робототехники (включая краткое описание современной аппаратуры в составе МРТК).

Ключевые задачи экстремальной робототехники в области радиационной безопасности

Ключевыми задачами экстремальной робототехники в области радиационной безопасности являются [1]:

- обнаружение и локализация источников ионизирующего излучения;
- определение количества источников гамма-излучения в условиях радиационного загрязнения;
- измерение мощности и локализация ионизирующего излучения;
- сбор и утилизация источников ионизирующего излучения;
- изотопное определение источников ионизирующего излучения (при необходимости).

На решение вышеперечисленных задач оказывают влияние следующие факторы:

- широкий спектр измерения мощности дозы: от фонового излучения до опасного для человека;

– эксплуатационные условия (под влиянием различных климатических факторов): низкая или высокая температура, осадки, и т.д.;

– высокие требования к оборудованию и надежности измерений.

Основная задача средств радиационного мониторинга как элементов робототехнических комплексов

На рисунках 1 и 2 представлены современные МРТК, оснащенные спектрометрической аппаратурой.

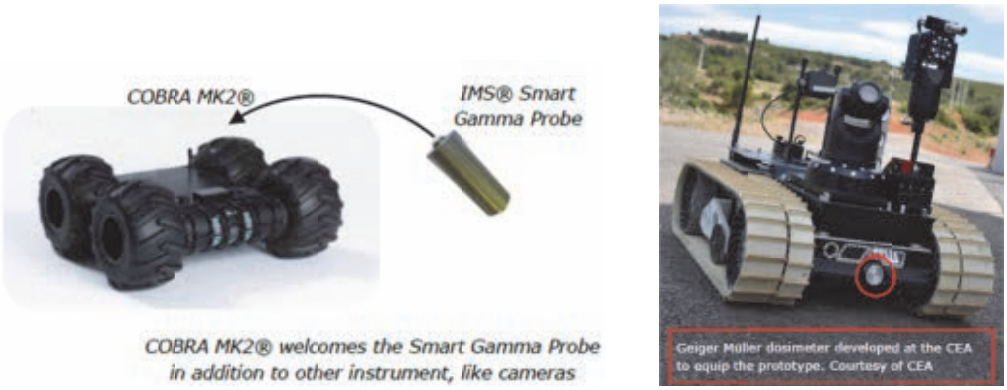


Рисунок 1 — COBRA MK2: интеллектуальное гамма исследование (дозиметр)
Innovation & measurement systems IMS, France

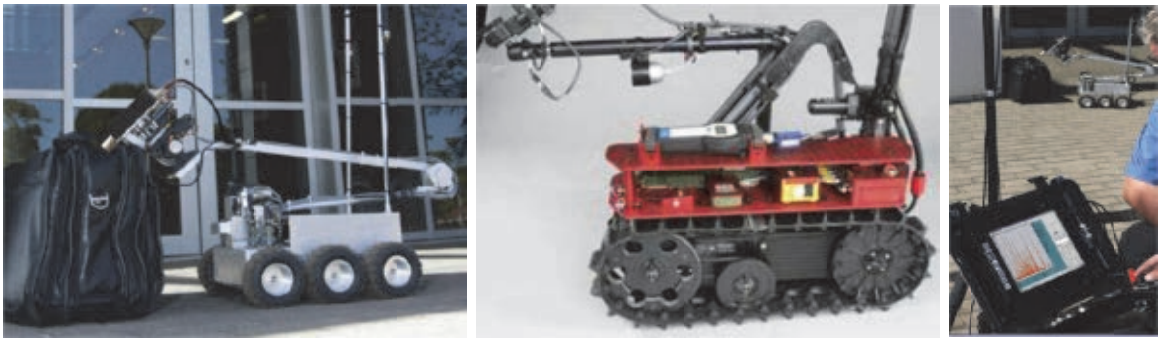


Рисунок 2 — Remote Advanced Sensor PlatformRASP: спектрометр
Defence Science and Technology Organisation DSTO, Australia

Основной задачей средств радиационного мониторинга, как элементов робототехнических комплексов, является поиск и обнаружение источников ионизирующих излучений. Для ее решения в составе МРТК применяется оборудование с возможностью измерения направления на источник ионизирующего излучения (так называемые гамма-локаторы), с отображением данной информации в СПО. На рисунках 3 и 4 представлены варианты измерений ионизирующего излучения: динамическое (в составе МРТК) и статическое, соответственно.

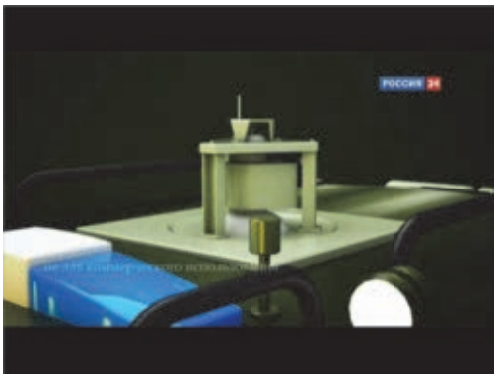


Рисунок 3 — Статическое измерение

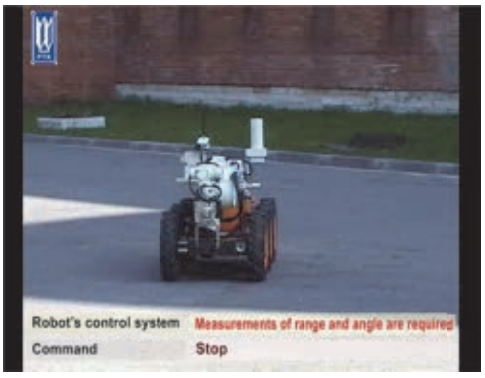


Рисунок 4 — Динамическое измерение

Блок детектирования гамма-излучения (гамма-локатор): устройство для поиска и локализации фотонных источников

Назначение:

– обнаружение и локализация источников гамма-излучения;
– определение направления обнаруженного источника гамма-излучения;
– контроль мощности дозы в точке измерения.

Отличительные особенности прибора, представленного на рисунке 5:

– датчик угла Азимута;
– многоэлементный детектор, расположенный вокруг зоны цилиндрического коллиматора;
– для определения направления источника излучения не требуется сканирование.

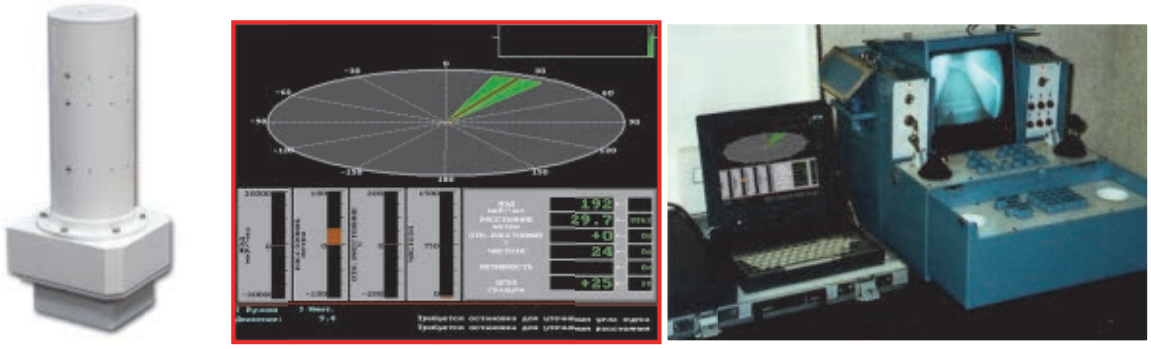


Рисунок 5 — Устройство для поиска фотонных источников: гамма-локатор

Гамма-камера: блок детектирования в составе МРТК для определения количества локальных источников гамма-излучения в условиях радиационного загрязнения

Назначение:

– визуализация нескольких источников гамма-излучения, расположенных в угловом поле зрения;
– совмещение изображения гамма-поля с видеоизображением исследуемого объекта.

Отличительные особенности:

– прибор рассчитан по принципу телескопа с кодированной апертурой;
– слияние с видеоканалом.

Прибор и его принцип действия представлены на рисунке 6.

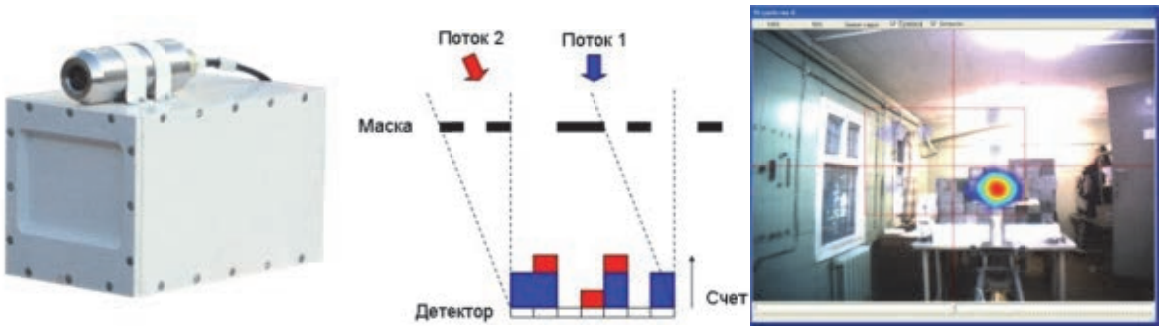


Рисунок 6 — Блок детектирования в составе МРТК

Блок детектирования для наведения на источники гамма-излучения

Назначение:

– наведение захватывающего устройства на источник гамма-излучения с целью его утилизации;
– контроль мощности дозы в точке измерения.

Принцип действия и отличительные особенности:

– коллимированная пара угол-метр: расположение источника в угловом поле зрения находит на основе разности сигналов детекторов;

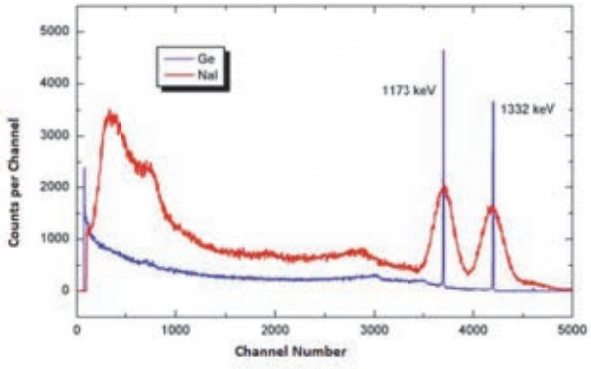
– диапазон работы расширения мощности дозы достигается применением счетчиков импульсного питания.

На рисунке 7 представлен внешний вид БД.

Рисунок 7 — Блок детектирования для наведения на источники гамма-излучения

а) сцинтилляционный гамма-спектрометр

б) полупроводниковый гамма-спектрометр на основе ОЧГ с электромеханической системой охлаждения



в) сравнение спектра ^{60}Co для полупроводникового и сцинтилляционного спектрометров

Рисунок 8 – Гамма-спектрометры

Спектрометрический блок детектирования гамма-излучения: гамма-спектрометр для изотопного определения источников ионизирующего излучения

Назначение:

– регистрация спектра гамма-излучения;

– идентификация источника гамма-излучения по измеренному спектру;

– контроль мощности дозы в точке измерения.

Отличительные особенности:

– коллимированный спектрометрический детектор гамма-излучения NaI(Tl);

– мощность дозы рассчитывается в точке измерения методом «спектр-доза».

Помимо сцинтилляционных спектрометров перспективным является использование полупроводникового гамма-спектрометра, выполненного из ОЧГ, который обладает энергетическим разрешением лучше на 2 порядка, что, при совмещении с электромеханической системой охлаждения, позволяет расширить область применения гамма-спектрометрической аппаратуры.

На рисунке 8а, 8б представлен внешний вид сцинтилляционного и полупроводникового гамма-спектрометров; на рисунке 8в – спектры полупроводникового и сцинтилляционного спектрометров.

Варианты размещения аппаратуры радиационного контроля в составе МРТК

Возможные варианты по размещению аппаратуры радиационного контроля в составе МРТК представлены на рисунке 9.

Рисунок 9 — Варианты размещения оборудования радиационного контроля для МРТК

Последовательность применения сенсорной системы для утилизации источников излучения

Последовательность применения сенсорной системы для утилизации источников излучения включает в себя:

– обнаружение источника гамма-излучения с помощью гамма-локатора по определению направления максимального потока гамма-излучения;

– оценка количественного состава источников излучения с помощью гамма-камеры путем визуализации гамма-поля и его интеграции с видеоизображением исследуемого объекта;

– измерение спектрального распределения излучения с помощью гамма-спектрометра и идентификация источника излучения;

– наведение захватывающего устройства на источник гамма-излучения для осуществления его утилизации.

На рисунке 10 представлен МРТК, предназначенный для поиска и утилизации источников излучения.

Рисунок 10 — МРТК для поиска и утилизации источников излучения

Робототехнический комплекс легкого класса для ведения радиационной разведки и проведения технологических операций в условиях радиационного воздействия РТК-08

Назначение РТК-8 (рис. 11):

– ликвидация последствий чрезвычайных ситуаций техногенного характера;

– производство работ в зонах с повышенным уровнем радиации;

– локализация источников гамма-излучения на труднодоступных участках местности, в промышленных и жилых помещениях, объектах транспорта и т.п.

Состав:

– робототехническое средство радиационной разведки (РТС-РР);
– робототехническое средство проведения технологических операций (РТС-ТО);
– средство доставки и управления на базе автомобиля Mercedes–Benz.

Рисунок 11 — РТК-8

Робототехнический комплекс легкого класса для ведения радиационной разведки и визуализации локальных источников гамма-излучения в интересах МЧС (РТК-10)

Назначение РТК-10 (рис.12): для проведения мониторинга в условиях возникновения чрезвычайных ситуаций техногенного характера, в зонах с повышенными уровнями радиации, в том числе локализации источников гамма-излучения на труднодоступных участках местности, в промышленных и жилых помещениях, объектах транспорта и т.п.

Рисунок 12 — РТК-10

Состав:

– робототехническое средство (РТС);
– модуль воздушного наблюдения;
– средство доставки-пункт управления на базе автомобиля Mercedes Sprinter;
– комплект автономной видеосистемы;
– вспомогательное оборудование.

Применяемая в составе РТК-10 аппаратура радиационной контроля представлена на рисунке 13а, 13б, 13в.

а) гамма-камера б) гамма-локатор в) гамма-спектрометр

Рисунок 13 — Аппаратура радиационного контроля в составе РТК-10

Специальное программное обеспечение аппаратуры радиационного мониторинга для решения задач экстремальной робототехники

Разрабатываемое СПО для аппаратуры радиационного мониторинга, используемой в составе МРТК, должно обеспечивать ряд требований, позволяющих решать ключевые задачи экстремальной робототехники.

Данное СПО должно работать в определенной программной среде и обеспечивать совместимость всех модулей аппаратуры радиационного мониторинга с управляющей ПЭВМ.

Кроме того, СПО должно обеспечивать автономную работу аппаратуры и режимы измерения, поиска, градуировки и настройки аппаратуры, а также режим обмена с управляющей ПЭВМ для передачи данных измерения на ПЭВМ и приема необходимых данных (например, включая таблицы для термокоррекции энергетической шкалы аппаратуры).

Применяемое для задач экстремальной робототехники СПО (в составе аппаратуры радиационного мониторинга) обеспечивает следующие основные режимы работы аппаратуры:

- индикацию включения питания;
- индикацию и установку экспозиции;
- индикацию режимов работы;
- индикацию величины заряда аккумулятора;
- индикацию и запись координат места применения прибора, полученного от встроенного ГЛОНАС (GPS) приемника;
- проведение контроля функционирования аппаратуры с выдачей информации о неисправностях;
- настройку энергетической шкалы с помощью контрольного источника ионизирующего излучения;
- автоматическую стабилизацию энергетической шкалы преобразования;
- автоматическую коррекцию энергетической шкалы преобразования от изменения температуры;
- регистрацию энергетических спектров ионизирующего излучения;
- запись в устройство энергонезависимой памяти результатов измерений в ручном и автоматическом режимах с указанием астрономического времени проводимых измерений, координат места, номера измерения, примечания;
- просмотр записанной в устройстве энергонезависимой памяти информации;
- удаление выбранной части записанной информации из энергонезависимой памяти;
- ввод и контроль параметров, используемых для проведения обработки спектров;
- отображение числа импульсов в заданных «энергетических окнах» спектра;
- предупреждение о приближении разряда аккумулятора к недопустимому уровню;
- индикацию предельно допустимого значения статистической загрузки;
- передачу результатов измерений и вычислений в управляющую ПЭВМ.

Использование аппаратуры радиационного мониторинга в составе МРТК позволяет осуществлять оперативное решение таких задач экстремальной робототехники, как обеспечение радиационной безопасности.

Использование в составе МРТК аппаратуры радиационного мониторинга, оснащенной СПО, обеспечивает высокую оперативность обнаружения и локализации источников радиационного излучения, в том числе за счет быстрого определения направления их излучения. Так, использование в составе МРТК гамма-камеры обеспечивает визуализацию локализации отдельных зон радиоактивного излучения; применение блока детектирования для наведения на источники гамма-излучения обеспечивает точное прицеливание захватывающего устройства на высокоактивные источники гамма-излучения для их дальнейшей утилизации; коллимация гамма-спектрометра позволяет увеличить верхнюю границу рабочего диапазона мощности дозы гамма-излучения.

Необходимость разработки и применения высокоточной спектрометрической аппаратуры, оснащенной СПО, для использования на борту МРТК связана с повышением опасности и сложности вы-

полняемых работ по локализации источников радиоактивного загрязнения (в том числе в условиях нейтронного фона).

Среди аппаратуры для установки на борт МРТК можно выделить два основных класса: гамма-локаторы, служащие для решения задачи локализации источников ионизирующего излучения и гамма-спектрометры для определения радионуклидного состава загрязнения.

Использование высокоточной спектрометрической аппаратуры обеспечит получение информации о природе радиационного загрязнения и позволит не только наиболее точно оценить его последствия и эволюцию, но и оптимизировать комплекс ликвидационных мероприятий. В качестве спектрометрической аппаратуры наибольшей размещающей способностью обладают гамма-спектрометры на основе ОЧГ детекторов.

Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России FNRG-2022-0018 1021063012570-0-1.3.4 № 075-01623-22-00 «Исследование методов повышения стойкости к нейтронному излучению гамма-спектрометров высокого разрешения на основе кристаллов из особо чистого германия».

Литература

1. Журнал «АНРИ»: с.34-44, «Портативная система визуализации источников гамма-излучения» Власенко А.Н., http://www.doza.ru/anry/archive/2016/5154/?print=yes

2. Труды 25-й юбилейной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника», «Устройство одновременной регистрации альфа-, бета- и гамма-излучения с выделением спектров бета-, гамма-излучений и радиометрической информации об альфа-, бета-излучениях для экспресс-анализа радиоактивного загрязнения» В.Г. Микуцкий, В.Е. Соловьев, И.И. Шишов, О.Е. Лапин https://www.elibrary.ru/contents.asp?id=34308319

КРУГЛЫЙ СТОЛ «МЕДИЦИНСКАЯ РОБОТОТЕХНИКА»

Д.Б. Смирнов[1], А.А. Воротников[1], Ю.В. Подураев[2]

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОТРАЖЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРА ДЛЯ МЕДИЦИНСКОГО РОБОТА

[1]МГТУ «СТАНКИН», Москва, smirnov2000.dmitry@yandex.ru, aavorotnikov90@gmail.com;
[2]МГМСУ им. А.И. Евдокимова Минздрава России

Аннотация

Для достижения наибольших преимуществ совместного использования лазеров с роботизированными системами необходимо использование обратной связи для повышения качества обработки. В данном исследовании проведен анализ сигнала отраженного излучения диодного волоконного медицинского лазера для будущего использования в качестве обратной связи для управления роботом. Для определения зависимости отраженного сигнала от расстояния до поверхности проводились эксперименты на моторизированной установочной скамье TESA TPS 500, обладающей высокой точностью позиционирования в 1 мкм. После чего проводились испытания на неровной поверхности, в качестве которой выступала распечатанная на 3Д принтере деталь с различными профилями, которые были предварительно проконтролированы на контурографе. В ходе сопоставления полученных результатов было выявлено, что значения стандартных отклонений от реальной поверхности не превышают 600 мкм. Однако, данное значение может быть уменьшено с помощью устранения выявленных проблем, влияющих на показания, решение или нивелирование которых будет приведено в дальнейших работах авторов. В целом, можно сделать вывод о том, что данный метод может применяться в роботизированной лазерной обработке.

Ключевые слова

Оптическая обратная связь, робот, лазер.

D.B. Smirnov[1], A.A. Vorotnikov[1], Y.V. Poduraev[2]

EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE REFLECTED LASER EMISSION FOR A MEDICAL ROBOT

[1]Moscow State University of Technology «STANKIN», Moscow, Russia, smirnov2000.dmitry@yandex.ru;
[2]A.I. Evdokimov Moscow State University of Medicine and Dentistry, Moscow, Russia, aavorotnikov90@gmail.com

Abstract

To achieve the greatest benefits of synergy of lasers with robotic systems, it is necessary to use feedback to improve the quality of processing. In this study, the reflected emission signal of a medical diode fiber laser was evaluated for future use as feedback for controlling a robot. To determine the dependence of the reflected signal on the distance to the surface, experiments were conducted on a motorized setting bench TESA TPS 500, which has a high positioning accuracy of 1 μm. After that, tests were set on an uneven surface, which was a detail printed on a 3D printer with different profiles, which were preliminarily measured on a contourograph. Comparing the obtained results, it was found that the values of standard deviations from the real surface do not exceed 500 μm. However, this value can be reduced by eliminating the identified problems that affect the sensor data, the solution or leveling of which will be given in the further works of the authors. In general, it can be concluded that this method can be applied in robotic laser processing.

Key words

Optical feedback, robot, laser.

На данный момент применение лазеров в хирургии очень распространено, особенно в таких областях как стоматология (удаление кариеса, резка десен), нейрохирургия (остеотомия), оториноларингология (тонзилэктомия, удаление опухолей на гортани), ортопедия (реконструкция коленных суставов) и т.д. [8]. Для повышения качества проведения этих операций различными исследователями осуществляются попытки совмещения лазеров с роботизированными системами [9-11]. Большой потенциал для таких робото-медицинских применений имеют оптоволоконные лазеры, так как оптоволокно довольно гибкое и позволяет доставлять излучение к оперируемым тканям без значительных потерь. Данная особенность актуальна для применения в малоинвазивной хирургии [12,13] а также избавляет от необходимости расположения всего лазера на фланце робота, а вместо этого лишь держателя для закрепления волокна [7] или набора фокусирующей оптики, что позволяет не сильно зависеть от грузоподъемности робота. Также, особенностью волокна является то, что оно может быть интегрировано в хирургическую иглу или эндоскоп, благодаря своему небольшому диаметру, что дает возможность для чрескожного [14] или трансорального [15] роботизированного проведения операций. В медицине также существует проблема забора материала для последующего исследования (биопсии), где также можно использовать роботизированные лазерные устройства [16]. Исследования роботизированных систем с медицинскими лазерами показывают, что результаты их работы не уступают, а иногда и превосходят традиционные мануальные методы проведения операций по таким показателям как точность траектории реза [2], поддержание требуемой скорости резанья [3,4] повторяемость [5] и поддержание требуемого расстояния от торца волновода до оперируемой ткани [6], повреждение соседних тканей [17]. Также значительные медицинские преимущества наблюдаются в сокращении времени постоперационного восстановления пациентов [18-20], что говорит о целесообразности их использования. В связи с этим, целью настоящего исследования является анализ показаний отраженного оптического сигнала лазера для оценки последующего использования в качестве обратной связи для управления роботом.

Определение зависимости показаний датчика обратной связи лазера от расстояния до поверхности различных материалов плоской формы

Опыты производились на установочной скамье Tesa TPS 500. На неподвижную часть 3 устанавливался материал 4 и закреплялся при помощи распечатанных на 3д принтере креплений (нескольких уголков 5, 6) и винтов с гайками. Аналогичным образом происходило крепление к подвижной части скамьи, оптоволокно 9 закреплялось в держателе 7, подробно представленного в [7], который, в свою очередь, прикреплялся к уголку 1 посредством прижима 8 и винтов с гайками (рис.1. а)). В начальном положении устанавливалось касание и далее, изменяя значения на скамье, регулировалось расстояние от торца до материала Управление лазером 11 и получение данных с датчика осуществлялось при помощи компьютера 10 со специализированным ПО. Мощность выходного сигнала лазера 11 варьировалась от 0.1 до 1.6 Вт, длина волны – 470 нм, диаметр сердцевины волокна – 400мкм.

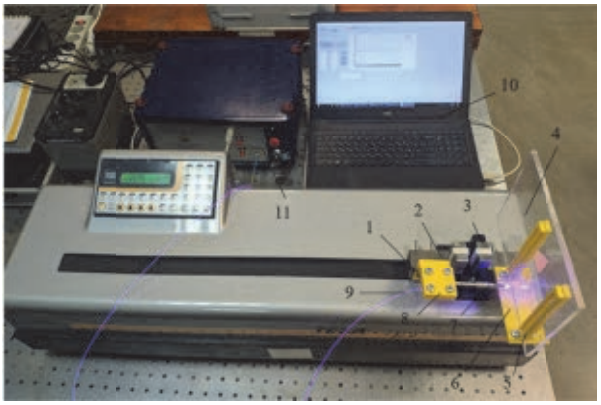


Рисунок 1 — Общий вид экспериментальной установки

При запуске лазера на дальнем расстоянии от поверхности производилось обнуление сигнала, для того, чтобы не учитывать составляющую отраженного сигнала от дистального торца волновода. Опытным путем было выявлено, что изменение показаний не происходит дальше 10 мм от поверхности. Это связано с тем, что доля излучения, попадающая обратно в волновод, слишком мала для детектирования. Поэтому анализ показаний целесообразно проводить именно с данного расстояния и до контакта торца волновода с поверхностью. Таким образом, при проведении экспериментов измерялись сигналы отражения относительно показаний обнуления.

На рисунке 2 приведены полученные зависимости отраженного сигнала от 3х типов поверхностей на различных мощностях выходного излучения лазера (a - металлической поверхности (твердый материал не пропускающий свет), b - прозрачное оргстекло (твердый, но хорошо пропускающий свет), c – желеобразный материал на основе $(C_{12}H_{18}O_9)_n$. (мягкий прозрачный материал). Показания представляют собой точки с координатами (L,), где L – величина расстояния от торца волновода до поверхности,– относительные единицы мощности отраженного излучения, выраженные в отчетах АЦП.

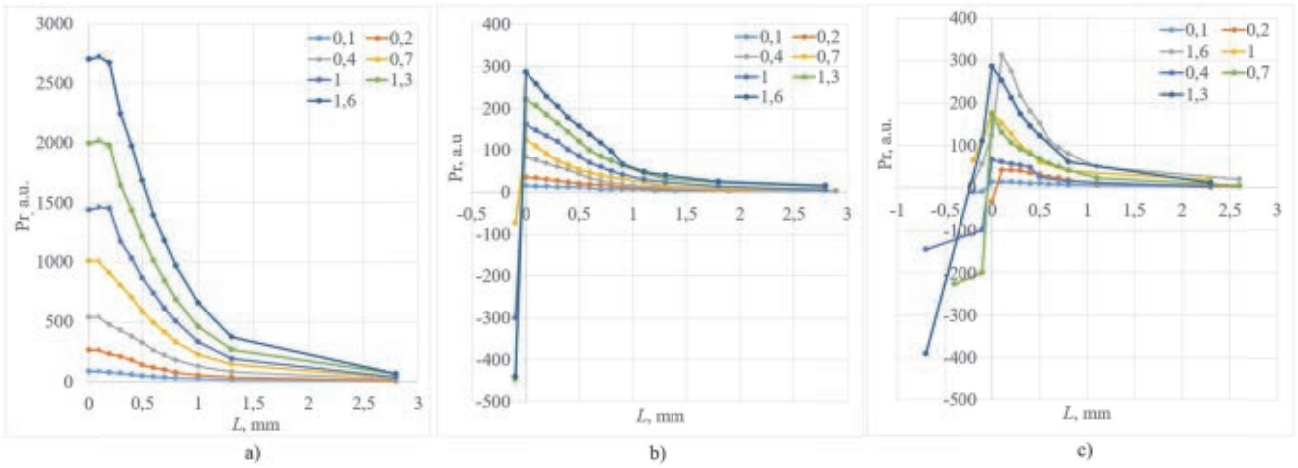


Рисунок 2 — Экспериментальные данные, полученные на разных материалах:
a) металлическая поверхность, b) оргстекло, c) состав на основе $(C_{12}H_{18}O_9)_n$.

При близком рассмотрении показаний для оргстекла и состава на основе $(C_{12}H_{18}O_9)_n$ заметно резкое снижение показаний в отрицательную область. Это обусловлено тем, что волновод проник в другую среду (в материал), где коэффициент пропускания выше, чем в воздухе. На оргстекле такое явление наблюдается лишь на мощностях выше 0.7 Вт, так как тогда происходит расплавление поверхностного слоя стекла и, соответственно, проникновение в другую среду.

По этим данным была выявлена зависимость, которая описывает взаимосвязь показаний датчика от расстояния до поверхности, что более подробно представлено в [1]. Общий вид разделен на 3 характерных интервала: 1 – от непосредственного касания с поверхностью до 0,2 мм, который не имеет выраженной зависимости; 2 – (от 0,2 до 1мм) наиболее предпочтительный для использования, так как имеет более линейный вид; 3 – (свыше 1мм) гиперболическая зависимость, обусловленная работой закона обратных квадратов, так как торец волновода с такого расстояния можно считать точечным источником [21].

Распознавание материала

Разные ткани обладают различными отражающими свойствами, поэтому также существует необходимость определения различий в зависимостях отражённого сигнала от поверхностей разных материалов. Допустив, что расстояние до поверхности известно, можно определить величину площади под кривой, которая может охарактеризовать материал по его отражающим свойствам. Так, в качестве критерия для определения отражающих свойств материала использовалась площадь под кривы-

ми, которая вычислялась методом прямоугольников по экспериментальным точкам, по следующей формуле:

$$S = \sum_{i=1}^{n} (L_i - L_{i-1}) P_{r_i}$$

После чего значения S были аппроксимированы линейно по величине подаваемой мощности лазера, аналогично предыдущему пункту со следующей функцией минимизации:

$$\sum_{i=1}^{n} (S_i - (a_1 P_i + a_2))^2 \to \min$$

где a_1 и a_2 - коэффициенты аппроксимации, значения которых приведены в таблице 1 для всех материалов.

Таблица 1 — Значения коэффициентов для всех материалов

	Значения коэффициентов		
Элементы	**Металлическая поверхность**	**оргстекло**	**Состав на основе $(C_{12}H_{18}O_9)_n$**
	1735.6	170.15	213.18
	-146.28	-0.3842	-1.1912

Эксперименты на неровной поверхности

Следующим этапом было, проведение экспериментов на неплоской поверхности и для этих испытаний была разработана деталь с 4 различными профилями (рис.3). Она была произведена на литографическом 3D принтере. В качестве исследуемого материала использовался пластик не случайно, а потому что он тоже легко режется под воздействием лазерного излучения аналогично мягким тканям, что дает возможность пронаблюдать, что происходит с показаниями непосредственно в момент проведения реза. После производства данная деталь была измерена на контурографе в местах предполагаемого проведения реза на 4 разных профилях. Спроектированные профили детали позволяли использовать для прохода на роботе простые траектории – линии.

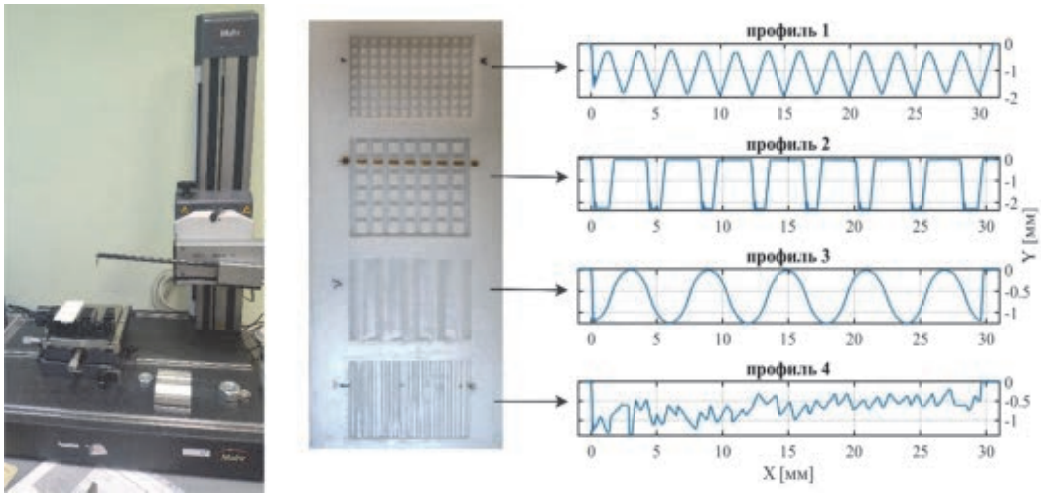


Рисунок 3 — Иллюстрация детали и профили, полученные в ходе измерений на контурографе

Робот перемещался по запрограммированной траектории – линии между двумя точками вначале и конце профилей с постоянной скоростью = 0.5 мм/с. Закрепление волокна осуществлялось с помощью рабочего органа, разработанного ранее в [7], который сопрягался с фланцем робота (рис.4). Управление лазером и считывание показаний с датчика проводилось с помощью компьютера.

Стоит отметить, что торец волновода в начале и конце траектории находился не в непосредственном касании с поверхностью, а на небольшом расстоянии от нее. Это было сделано для того, чтобы не сломать волокно при неточной установке детали, а также если сама деталь имеет бочкообразную или седлообразную форму, так как пластик не жесткий материал и такое искажение общей формы детали возможно.

Рисунок 4 — Проведение эксперимента на роботе-манипуляторе

Оценка результатов проведения экспериментов на неплоской поверхности с использованием робота

Для определения значений отклонений была решена обратная задача, решение которой представляет собой: определение расстояния от торца волновода до обрабатываемой поверхности по величине показаний датчика обратной связи лазера. На основе одностадийной аппроксимации для интервалов 2 и 3 можно вывести такое уравнение отражающее зависимость L(Pr); для 2 интервала было рассмотрено 2 случая: первый – при использовании линейной аппроксимации исходных данных, и второй – квадратичной. Такое решение было проделано лишь для низкой мощности в 200 мВт, так как было выявлено что при работе на высоких мощностях происходит расплавление материала, что сильно сказывается на показаниях. Наложение результатов преобразования показаний датчика с данными контурографа представлено на рисунке 5.

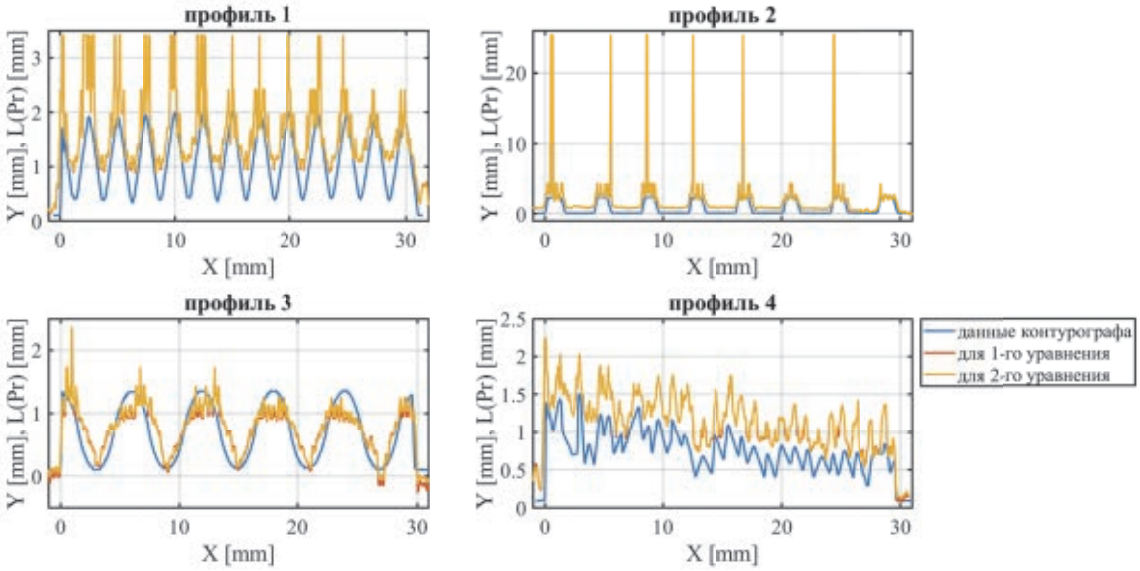


Рисунок 5 — Решение обратной задачи для данных, полученных на роботе при мощности 200 мВт

При сравнении результатов 1 и 2 выражения максимальная разница оказалась не более 50 мкм, а по среднему значению модуля разности менее 12 мкм, что и видно по графикам, представленным на

рисунке выше, они практически совпадают, что говорит о том, что можно в будущем использовать более простое выражение (линейную зависимость для второго интервала).

Нетрудно заметить, что все кривые находятся выше линии контурографа, это связано с тем, что показания становятся меньше на неровной поверхности относительно гладкой, из-за несовпадения оптической оси волновода с нормалью к поверхности, что и приводит к такой интерпретации (более дальнее расположение от поверхности).

Для оценки отклонений была произведена линейная интерполяция преобразованного сигнала лазера для возможности сопоставления с данными контурографа. Результаты, полученные на роботе, приведены в таблице 2 в виде таких показателей как среднее значение абсолютной погрешности решения обратной задачи, полученное на основе показаний L(Pr) и данных контургографа Y, вычисленное по формуле

$$abs_mean = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left| L(P_r)_i - Y_i \right|}{n}$$

и стандартного отклонения

$$std = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} \left| L(P_r)_i - abs_mean \right|^2}$$

Таблица 2 — Значения отклонений

Номер профиля	**Для 1 уравнения**		**Для 2 уравнения**	
	Abs_mean, mm	**Std, mm**	**Abs_mean, mm**	**Std, mm**
1	0,547	0,373	0,548	0,373
2	0,738*	0,596*	0,741*	0,596*
3	0,227	0,144	0,209	0,140
4	0,391	0,201	0,394	0,201

*значения для второго профиля получены без учета выбросов на 24мм.

На профиле 2 имеется несовпадение данных полученных на основе показаний и данных с контурографа, что говорит о неточной установке начального положения в 100мкм, что также повлияло на значение погрешности, как и столь большие выбросы до 24мм, вызванные гиперболической зависимостью. 3 Профиль имеет наилучшие значения погрешности, что связано с тем, что поверхность данного профиля наиболее сглаженная и не имеет высоту неровностей более 2мм. Судя по данным на профиле 1 и 4, отражение от столь неровных, имеющих заостренную форму, поверхностей имеет высокое рассеивание, что значительно снижает показания, равносильно нахождению гладкой поверхности под углом, что и приносит столь большие отклонения. Т.е. показания становятся все меньше и интерпретируются как более дальние точки для зависимости, полученной на гладкой части поверхности.

Такая особенность говорит о том, что данная зависимость не может быть использована при одновременной работе как на плоских, так и неплоских поверхностях с резкими неровностями. Однако, несмотря на это, показания довольно хорошо отражают рельеф (профиль) облучаемой поверхности относительно исходной точки на низких мощностях при отсутствии реза.

В связи с вышесказанным можно выделить факторы, влияющие в наибольшей степени на показания датчика обратной связи лазера.

1. Гиперболическая зависимость (этим объясняются большие отклонения в зоне дальше чем 2мм). Так как на таком расстоянии полезный сигнал перестает быть отличим от флуктуаций. Что еще раз подтверждает необходимость использования лишь второго хорошо аппроксимируемого интервала с линейной или квадратичной формой зависимости.
2. Неоднородность материала или его загрязнения, что хорошо видно на профиле 2.

3. Наличия налипания материала или обгорания торца волновода, что влечет за собой несоответствие в начальных показаниях при решении обратной задачи по одной и той же кривой для разных профилей.

4. Особенность отражения от поверхности при несовпадении оптической оси волновода с нормалью к облучаемой поверхности. Что хорошо иллюстрирует профиль 3, показывая отклонения от фактического профиля поверхности.

Наличие существенных искажений на большой мощности говорит о том, что данная система не может быть использована для коррекции движений робота в режиме реального времени непосредственно в момент обработки. Однако, данную обратную связь все же можно использовать в качестве диагностического сигнала. А именно для определения расстояния от торца волновода до поверхности на основе показаний датчика обратной связи, чтобы поддерживать его постоянно. Т.е. скорректировать траекторию движения робота таким образом, чтобы расстояние от торца волновода до поверхности оставалось постоянным. Первоначально можно задать более простую траекторию движения робота и снять показания на низкой мощности. Затем на основе полученных данных скорректировать траекторию реза. И заключительным этапом будет проход по скорректированной траектории с использованием большей мощности непосредственно для проведения разрезания. Также, если не происходит обугливания тканей, то можно исследовать данный рез повторно на низкой мощности для оценки проведения обработки.

Если же говорить о применении в контактной лазерной обработке, то по показаниям можно определить, когда контакт с тканью был утерян, что будет выявлено путем увеличения показаний и может быть скорректировано роботом в режиме реального времени.

Стоит отметить, что реальные ткани не обладают столь резкими перепадами и заостренными неровностями, а имеют более сглаженный вид аналогичный профилю 3, на котором были получены более хорошие результаты на роботе: 227 мкм по среднему значению абсолютной погрешности и 144 мкм по стандартному отклонению. Это говорит о том, что при использовании данной системы на реальных тканях могут быть получены сравнительно лучшие результаты, что и будет проверено в будущих работах авторов.

При рассмотрении данных на волнообразной поверхности (профиль 3) можно заметить, что величина показаний на гладкой части и на пике волны совпадают, что говорит о том, что метод, описанный выше по определению материала, может быть также использован на неплоской поверхности. В случае робота это можно сделать, варьируя ориентацию положения рабочего органа. При варьировании ориентации на одном и том же расстоянии от поверхности будет изменяться значения показаний и будут достигать своего максимального значения, равного тому, что получается на гладкой поверхности, при совпадении оптической оси волновода с нормалью к поверхности. Т.е. в таком случае большая часть излучения отражается обратно в волновод, а при несовпадении соответственно мимо. Так как было выявлено, что при использовании мощности излучения более 700мВт материал начинает плавиться, что может также происходить и с тканями, то в виду линейности зависимости площади под кривыми от используемой мощности, можно использовать лишь значения низких мощностей, например, при 200 – 400 мВт.

Подводя итог, можно сказать, что данная технология может применяться для роботизированной лазерной обработки мягких тканей.

Scientific Research by Educational Organizations in 2020–2022 Project under Grant № FSFS-2020-0031.

Литература

1. Smirnov D. B. et al. Optical feedback evaluation of surgical laser for medical robotic applications //Advances in 3OM: Opto-Mechatronics, Opto-Mechanics, and Optical Metrology. – SPIE, 2022. – Т. 12170. – С. 200-211.

2. Chunikhin A. A., Poduraev Yu. V., Vorotnikov A.A., Klimov D.D., Sahakyan M.Y., Bazikyan E.A. Efficiency assessment of nanosecond laser robotic maxillofacial area surgery in experiment //Современные тех-

нологии в медицине. – 2017. – Т. 9. – №. 4 (eng). – С. 123-128.

3. Vorotnikov A. A. et al. Cutting velocity accuracy as a criterion for comparing robot trajectories and manual movements for medical industry //Mechanics & Industry. – 2017. – Т. 18. – №. 7. – С. 712.

4. Vorotnikov A. A. et al. Criteria for comparison of robot movement trajectories and manual movements of a doctor for performing maxillofacial surgeries //International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. – 2018. – Т. 7. – №. 4. – С. 361-366.

5. Vorotnikov A. A. et al. Standard deviation from the average cutting velocity as a criterion for comparing robot trajectories and manual movements of a doctor for performing surgical operations in maxillofacial surgery //International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. – 2018. – Т. 7. – №. 3. – С. 319-323.

6. Chunikhin A. A. et al. Comparative experimental assessment of the accuracy of nanosecond laser surgery of the oral cavity when the instrument is moved by a robotic complex and a surgeon //Russian Open Medical Journal. – 2019. – Т. 8. – №. 3. – С. 307-307.

7. Meleshnikov A. M. et al. Prototype Probe Determining Waveguide–Gum Contact for a Robot Surgical System //Russian Engineering Research. – 2020. – Т. 40. – №. 1. – С. 86-88.

8. Е.А.Шахно. Физические основы применения лазеров в медицине. – СПб: НИУ ИТМО, 2012. – 129 с.

9. Hammoudi K. et al. Transoral robotic surgery versus conventional surgery in treatment for squamous cell carcinoma of the upper aerodigestive tract //Head & Neck. – 2015. – Т. 37. – №. 9. – С. 1304-1309.

10. Wang L. L. et al. Evaluation of intra-and post-operative outcomes to compare robot-assisted surgery and conventional laparoscopy for gynecologic oncology //Asian Journal of Surgery. – 2020. – Т. 43. – №. 1. – С. 347-353.

11. Augello M. et al. Comparative microstructural analysis of bone osteotomies after cutting by computer-assisted robot-guided laser osteotome and piezoelectric osteotome: an in vivo animal study //Lasers in medical science. – 2018. – Т. 33. – №. 7. – С. 1471-1478.

12. Michalska M. et al. Thulium fiber laser for the use in low-invasive endoscopic and robotic surgery of soft biological tissues //Laser Technology 2016: Progress and Applications of Lasers. – SPIE, 2016. – Т. 10159. – С. 41-46.

13. CAMPBELL C. J. et al. The application of fiber laser techniques to retinal surgery //Archives of Ophthalmology. – 1964. – Т. 72. – №. 6. – С. 850-857.

14. Franco E. et al. Needle-guiding robot for laser ablation of liver tumors under MRI guidance //IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. – 2015. – Т. 21. – №. 2. – С. 931-944.

15. Padalhin A. R. Lasers and robots: recent developments in transoral laser and transoral robotic surgery //Medical Lasers; Engineering, Basic Research, and Clinical Application. – 2020. – Т. 9. – №. 2. – С. 103-109.

16. Wang H. et al. Robotic scanning device for intraoperative thyroid gland endomicroscopy //Annals of biomedical engineering. – 2018. – Т. 46. – №. 4. – С. 543-554.

17. Sotsuka Y. et al. The dawn of computer-assisted robotic osteotomy with ytterbium-doped fiber laser //Lasers in medical science. – 2014. – Т. 29. – №. 3. – С. 1125-1129.

18. Pierce M. C. et al. Laser-tissue interaction with a continuous wave 3-μm fibre laser: Preliminary studies with soft tissue //Lasers in Surgery and Medicine: The Official Journal of the American Society for Laser Medicine and Surgery. – 2000. – Т. 26. – №. 5. – С. 491-495.

19. Azadgoli B., Baker R. Y. Laser applications in surgery //Annals of translational medicine. – 2016. – Т. 4. – №. 23.

20. Khalkhal E. et al. The evaluation of laser application in surgery: a review article //Journal of Lasers in Medical Sciences. – 2019. – Т. 10. – №. Suppl 1. – С. S104.

21. Гуревич М.М. Фотометрия (теория, методы и приборы).– 2-е изд., перераб. и доп.– Л.: Энергоатомиздат, 1983.– 272 с., ил.

П.В. Семенихин[1], В.В. Харламов[2], К.В. Филипенко[1]

СОВРЕМЕННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АППАРАТНОЙ ПЕРФУЗИИ ДЛЯ СОХРАНЕНИЯ И ПОДДЕРЖАНИЯ ДОНОРСКОЙ ПЕЧЕНИ EX VIVO

[1]ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург; [2]ООО «Медицинская робототехника», Санкт-Петербург, p.semenihin@rtc.ru

Аннотация

В настоящей работе проводится обзор современных технических решений, обеспечивающих аппаратную перфузию с целью сохранения и поддержания донорской печени. Целью настоящей работы является анализ современных аппаратных решений обеспечения перфузии печении для выявления закономерностей и общих особенностей реализации, зарекомендовавших себя в клинической практике. В работе также проведено сравнение характеристик комплекса перфузионного средств восстановления и поддержания жизнеспособности донорских органов для трансплантации «LIFE STREAM HEPAR» предложенного ЦНИИ РТК с зарубежными аналогами.

Ключевые слова

Аппаратная перфузия, трансплантация печени, донорство органов, сохранение органов.

P.V. Semenikhin[1], V.V. Kharlamov[2], K.V. Filipenko[1]

MODERN PROVISION OF MACHINE PERFUSION TO PRESERVE AND MAINTAIN EX VIVO DONOR LIVER

[1]Russian State Scientific Centre for Robotics and Technical Cybernetics, St. Peterburg, Russia; [2]Medical Robotics LLC, St. Peterburg, Russia, p.semenihin@rtc.ru,

Abstract

This paper reviews modern technical solutions that provide hardware perfusion in order to preserve and maintain the donor liver. The purpose of this work is to analyze modern hardware solutions for liver perfusion that have proven themselves in clinical practice in order to identify patterns and common implementation features. The paper also compared the characteristics of the hardware-software system (HSS) developed by the Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics (RTC) for normothermic perfusion of donor's liver ex vivo with foreign counterparts.

Key words

Machine perfusion, liver transplantation, organ donation, preservation

На сегодняшний день существуют две стратегии сохранения донорских органов – статическое холодовое хранение и аппаратная перфузия. Статическое холодовое хранение является основным методом сохранения донорских органов, повсеместно применяющимся в клинической практике. Данный метод позволяет защитить орган от тепловых повреждений: пока орган лишен нормального кислородного питания, охлаждение замедляет обменные процессы. Однако потребление энергии тканями органа и метаболическая активность при этом не прекращаются, а лишь снижаются [1, 2]. Охлаждение повреждает клетки ткани органа, что приводит к их отеку и сопутствующим повреждениям [3]. При работе с органами с пограничными изменениями, использование стандартного метода холодового хранения сопряжено с тяжелыми повреждениями трансплантата и их ранней дисфункцией. Статическое холодовое хранение может быть реализовано только в случае небольшого временного интервала между забором органа и его трансплантацией. Простое холодовое хранение не позволяет прове-

сти адекватную оценку функционального состояния органа и решение об использовании органа для дальнейшей пересадки принимается исключительно на основе опыта хирурга.

Альтернативой холодовому хранению на сегодняшний день активно выступают методы аппаратной перфузии. Аппаратная перфузия позволяет не только оценить функцию трансплантата, но и повысить его качество, так как может включать в себя дополнительные опции лечения и реабилитации донорского органа [6, 7].

Методы аппаратной перфузии

Методы аппаратной перфузии сегодня рассматриваются в качестве перспективной альтернативы стандартному холодовому хранению. С помощью аппаратной перфузии может быть проведена не только протекция донорского органа от ишемических повреждений, но и восстановление его функции.

Различают два основных метода аппаратной перфузии – гипотермическая (температурный диапазон от 0 до +10 °C) и нормотермическая (температурный диапазон от +35 до +38 °C) [1, 6]. Редко рассматривают промежуточные температурные диапазоны.

Гипотермическая аппаратная перфузия (ГАП) позволяет снизить риск отсроченной функции трансплантата, увеличивает время хранения и повышает уровень выживаемости в сравнении со стандартным холодовым хранением [8]. Однако клетки ткани (особенно клетки эндотелия) отличаются повышенной чувствительностью к повреждениям, вызванным холодным потоком, что вносит дополнительный вклад в реперфузионную травму после ишемии [9].

Для борьбы с повреждениями, вызванными гипотермией, было предложено перфузировать органы при физиологичных температурах (37 °C) [1, 10]. Одним из преимуществ данного метода является возможность оценки состояния органа, находящегося на нормотермической аппаратной перфузии (НАП), в сравнении с известными физиологическими параметрами [6].

В нормотермических условиях в печени достигается физиологичный уровень метаболизма и нормальная функциональность. При этом доставка кислорода осуществляется за счет использования носителя кислорода в составе перфузата и является необходимым условием данного вида аппаратной перфузии.

Сегодня распространено мнение, что НАП представляет собой эффективную альтернативу простому холодовому хранению и ГАП. С применением НАП удается успешно пересаживать органы высокого риска [6]. НАП позволяет исключить влияние ишемический травмы и предотвратить гибель клеток.

Сохранение обмена веществ при применении НАП позволяет проводить эффективную медикаментозную реабилитацию трансплантата с целью улучшения его качества. В работе [11] во время проведения НАП в составе перфузата присутствовали «обезжиривающие препараты», что позволило значительно снизить уровень триглицеридов и повысить качество трансплантата.

Обеспечение физиологического уровня метаболизма позволяет эффективно поддерживать жизнеспособность органа на протяжении длительного времени. В работе [12] описывается успешная пересадка печени после 3-х дней нормотермической перфузии. При этом отмечается, что на протяжении 1 года наблюдений не было выявлено осложнений, связанных с отторжением трансплантата или повреждением желчных протоков.

Главная опасность при проведении НАП заключается в том, что при прерывании перфузии или недостаточной доставке кислорода трансплантат оказывается в состоянии теплой ишемии. Применение НАП все еще сопряжено с большим количеством нерешенных логистических и методических вопросов [1]. Однако отмечается, что за счет использования современных технических средств и систем обеспечения перфузии, НАП может быть безопасным и надежным способом сохранения донорской печени [10, 13].

Внедрение методик аппаратной перфузии в клиническую практику требует внедрения практики рутинного использования аппаратов восстановления кровообращения и поддержки органов. При этом к устройствам аппаратной перфузии выдвигается ряд требований: портативность, возможность лабораторного тестирования трансплантата, доступная себестоимость аппарата [1].

Современные технические решения обеспечения аппаратной перфузии для поддержки донорской печени ex vivo

Вопрос выбора оптимальной стратегии сохранения – гипотермическая (ГАП) или нормотермическая (НАП) перфузия – все еще окружен большим количеством споров. Сегодня активно ведутся разработки систем, основанных как на НАП, так и на ГАП.

Протоколы для аппаратной перфузии печени могут быть построены на основе богатого опыта, полученного в области аппаратной перфузии донорских почек. Данные протоколы (перфузия почек) должны быть адаптированы для перфузии печени, при этом необходимо учитывать важные особенности структуры и анатомии этого органа.

Одним из технических решений, обеспечивающим аппаратную перфузию печени, является система LifePort Liver Transporter (компании Organ Recovery), разработанная на основе системы для перфузии почек LifePort Kidney Transporter, уже успевшей зарекомендовать себя в клинической практике [14]. Данное устройство предназначено для ГАП печени в настоящее время находится на стадии одобрения для полноценного клинического использования в FDA [15].

В клиническом исследовании 2015 года [16], на данный момент единственном для системы LifePort Liver Transporter, сообщается о 31 пересадке печени, выполненные при поддержке данной системы. Во всех случаях органы были получены от доноров с расширенными критериями. Заключением данного клинического исследования стал вывод о безопасности и надежности восстановления донорской печени при поддержке системы LifePort Liver Transporter.

На рисунке 1 представлен общий вид мобильной системы LifePort Liver Transporter компании Organ Recovery.

Рисунок 1 — Система LifePort Liver Transporter компании Organ Recovery

Другим примером реализации устройства для обеспечения аппаратной перфузии печени является аппарат Liver Assist (компании XVIVO). Данная система позволяет проводить как ГАП так и НАП, а также комбинировать эти методики. Выбор протокола перфузии зависит от требований каждого отдельного донорского органа [17]. Liver Assis включает в себя три функциональных модуля: насос, обеспечивающий перфузию органа, нагреватель и оксигенатор. Два насоса и оксигенатор обеспечивают оксигенированную перфузию в условиях, близких к физиологическим, при этом раздельное управление насосами позволяет обеспечить пульсирующую перфузию в печеночной вене и непрерывный перфузионный поток в воротной вене [18]. Встроенная оценка резистивности донорского органа позволяет Liver Assis автоматически регулировать поток. Данная система имеет европейский сертификат (ЕС).

Клиническое исследование [19] методики ГАП, проводившееся с использованием Liver Assis показало, что частота потери трансплантата заметно ниже в группе, где применялась ГАП (Liver Assis). Кроме того, пятилетняя выживаемость также была заметно выше в группе, где применялась система Liver Assis, обеспечивающая гипотермическую перфузию, в сравнении с контрольной (простое холодовое хранение) группой – 94% и 78% соответственно. В работе рассматривались органы, полученные от асистолических доноров. В многоцентровом рандомизированном контролируемом исследовании [20] также рассматривались органы, полученные от асистолических доноров. Была проведена оценка частоты проявлений осложнений после выполнения трансплантации печени в группе, где до-

норская печень сохранялась гипотермической оксигенированной перфузией (Liver Assis), и в группе, где донорская печень сохранялась простым холодовым хранением. Результатом исследование стало заключение о том, что аппаратная перфузия привела к более низкому риску развития осложнений после трансплантации печени (6 месяцев после операции), по сравнению со статическим холодовым хранением.

На рисунке 2 представлен общий вид системы Liver Assis компании XVIVO [18].

Рисунок 2 — Система Liver Assis компании XVIVO

Система OrganOx metra компании OrganOx является портативным устройством, предназначенным для обеспечения нормотермической перфузии (37°C). В состав изделия входят насос, обеспечивающий поток перфузата, оксигенатор, выполняющий функцию легких, и шприцевой модуль ввода препаратов, что в составе единого комплекса позволяет обеспечить физиологическое функционирование сохраняемого органа. Система обеспечивает автоматический мониторинг гемодинамических показателей, а также синтетическую и метаболическую функции сохраняемой печени. Данные мониторинга выводятся пользователю через интерфейс, кроме того, есть возможность отображения статуса и показателей перфузии на мобильном устройстве. Система OrganOx metra одобрена FDA для нормотермической перфузии печени, обеспечивая сохранение донорского органа в функциональном состоянии до 12 часов [21].

В рандомизированном контролируемом клиническом исследовании [22] проводился анализ эффективности системы OrganOx metra в сравнении с простым холодовым хранением (n = 220). Исследование показало, что нормотермическая перфузия, обеспечивающаяся системой OrganOx metra, ассоциирована с значительно меньшим уровнем повреждения трансплантата, его длительной сохраняемостью и меньшей частотой отказа транспланата.

В работе [23] была проведена оценка рентабельности нормотермической аппаратной перфузии с использованием системы OrganOx metra в сравнении с практикой статического холодового хранения. Анализ проводился на основе гибридной аналитической модели («дерево решений» + модель Маркова) с включением в модель текущего пути лечения, частоты осложнений, продолжительности пребывания в стационаре, необходимости терапевтической поддержки после операции и т.д. Общая эффективность в расчете на одного пациента в группе нормотермической перфузии оказалась выше в сравнении с простым холодовым хранением (10,27 QALYs против 9,09 QALYs соответственно). Несмотря на то, что аппаратная перфузия является дорогостоящей методикой (46 711 фунтов стерлингов для НАП с использованием OrganOx metra против 37 370 фунтов стерлингов в группе простого холодового хранения) авторы исследование пришли к выводу о рентабельности стратегии использования OrganOx metra для перфузии при сохранении донорской печени.

На рисунке 3 представлен общий вид системы OrganOx metra компании OrganOx [21].

Рисунок 3 — Система OrganOx metra компании OrganOx

В России, как и во всем мире, дефицит органов доступных для пересадки крайне высок, что требует расширять пул потенциальных доноров за счет рассмотрения доноров с расширенными критериями. Отсутствие отечественной системы поддержки и восстановления донорских органов затрудняет использование нового пула доноров для проведения эффективных трансплантаций. Без активной поддержки органы с пограничными изменениями, после оценки их пригодности для пересадки, не используются для дальнейшей трансплантации, что значительно снижает количество приемлемых для пересадки органов.

ЦНИИ РТК предложен Комплекс перфузионный средств восстановления и поддержания жизнеспособности донорских органов для трансплантации «LIFE STREAM HEPAR» (далее КП ДО) [24-27]. На рисунке 4 представлен общий вид предложенной системы.

Рисунок 4 — Комплекс перфузионный средств восстановления и поддержания жизнеспособности донорских органов для трансплантации «LIFE STREAM HEPAR» (разработка ЦНИИ РТК)

КП ДО предназначен для обеспечения нормотермической перфузии, при этом поддерживаемый температурный режим может изменяться в диапазоне от 24°C до 39°C. В состав комплекса входят два насоса обеспечивающие потоки в венозном и артериальном контуре, оксигенатор, обеспечивающий насыщение перфузата кислородом, нагреватель, поддерживающий заданную температуру и шприцевой инфузионный дозатор, позволяющий проводить медикаментозную терапию одновременно с проведением аппаратной перфузии [24]. КП ДО ведет автоматический расчет индекса резистивности сохраняемой печени, что обеспечивает автоматическое адаптивное подержание потока перфузата в зависимости от состояния органа. Предложенный комплекс мобилен и может быть легко перемещен в пределах стационара или транспортирован в кабине скорой помощи. В таблице 1 приведена сравнительная характеристика предложенного КП ДО с импортными аналогами.

Таблица 1 — Сравнительная характеристика, предложенного КП ДО, с импортными аналогами

Параметр	КП ДО	LifePort Liver Transporter	Liver Assis	OrganOx metra
Режим перфузии	Нормотермический	Гипотермический	Гипотермический/Нормотермический	Нормотермический
Тип насоса	Центробежный	Роликовый	Центробежный	Центробежный
Объемная скорость потока	До 1,7 л/мин	До 1,7 л/мин	До 1,6 л/мин	До 1,7 л/мин
Автоматическая система подстройки режима перфузии	Да	Нет	Да	Да
Система оксигенации	Да	Да	Да	Да
Система терморегулирования	Да, в диапазоне 24 - 39°C	Нет	Да, в диапазоне 10-38 °C	Да, в диапазоне 24- 37 °C
Датчики	Скорости потока, давления, температуры	Скорости потока, давления	Скорости потока, давления, температуры	Скорости потока, давления, температуры, pH-метр
Передача информации о параметрах перфузии на удаленный ПК	Да	Да	Нет	Да
Автоматическое введение лекарственных средств	Да	Нет	Нет	Да

Без поддержки и реабилитации, а также объективной оценки органа, полученного от донора с расширенными критериями, увеличение пула потенциальных доноров не приводит к эффективному снижению дефицита донорских органов. В качестве решения проблемы восстановления донорского органа сегодня рассматривают методы аппаратной перфузии ex vivo. Разработка технических средств, обеспечивающих аппаратную перфузию в различных температурных режимах, позволяет оптимизировать стратегию сохранения органа и разработать протокол эффективной аппаратной перфузии. Несмотря на большое количество споров, многие исследователи сходятся во мнении об эффективности нормотермической перфузии, в частности для донорской печени, хотя эта методика сопряжена с большими сложностями и рисками по сравнению с гипотермическим режимом.

Анализ существующих технических решений для обеспечения аппаратной перфузии печени ex vivo также показал приоритет выбора нормотермической перфузии или комбинации нормотермического и гипотермического режимов. Кроме того, прослеживается общая тенденция в определении необходимых режимов работы (объемная скорость потока, окигенация, адаптивная подстройка потока), а также в выборе и включении в состав изделия функциональных модулей: тип насосов, набор датчиков, возможность передачи информации.

Более высокая эффективность аппаратной перфузии в сравнении со стандартной стратегией сохранения донорского органа (простое холодовое хранение) компенсируется заметно более высокой стоимостью процедуры. Отсутствие отечественных технических решений для обеспечения аппаратной перфузии затрудняет внедрение в отечественную клиническую практику данных методов сохранения и восстановления органов. Для обеспечения большей доступности методик аппаратной перфузии и по-

вышения качества медицинского сопровождения необходима разработка отечественной базы технических средств аппаратной перфузии.

ЦНИИ РТК предложен Комплекс перфузионный средств восстановления и поддержания жизнеспособности донорских органов для трансплантации «LIFE STREAM HEPAR». При разработке комплекса учитывался опыт, накопленный за время разработки и внедрения в клиническую практику иностранных аналогов, также большое внимание было уделено реализации процесса реабилитации донорского органа. Таким образом, удалось достичь согласованности в режимах работы с уже зарекомендовавшими себя системами аппаратной перфузии.

Публикация подготовлена в рамках комплексного проекта от 03.03.2017 г. № 03.G25.31.0218 по созданию высокотехнологичного производства с участием государственного научного учреждения по теме: «Разработка и освоение производства комплекса перфузионных модулей и устройств для мобильных систем искусственного кровообращения», заключённого с Министерством образования и науки Российской Федерации.

Литература

1. Гуляев В. А., Журавель С. В., Новрузбеков М. С., Луцык К. Н., Минина М. Г., Миронов А. С., Кузнецова Н. К., Магомедов К. М., Хубутия М. Ш. Увеличит ли аппаратная перфузия печени количество донорских органов, пригодных для трансплантации? Трансплантология, 2018, 10 (4), 308-326.

2. Vajdova K, Smrekova R, Mislanova C, et al. Cold preservation induced sensitivity of rat hepatocyte function to rewarming injury and its prevention by shortterm reperfusion // Hepatology. 2000;32(2):289–96

3. Benkoel L, Dodero F, Hardwigsen J, et al. Effect of ischemia- reperfusion on Na+, K+-ATPase expression in human liver tissue allograft: image analysis by confocal laser scanning microscopy // Dig Dis Sci. 2004;49(9):1387–93.

4. Datta G, Fuller BJ, Davidson BR. Molecular mechanisms of liver ischemia reperfusion injury: insights from transgenic knockout models // World J Gastroenterol. 2013;19(11):1683–98.

5. Cursio R, Gugenheim J. Ischemia-reperfusion injury and ischemic type biliary lesions following liver transplantation // J Transplant. 2012; 2012:164329.

6. Резник О.Н., Скворцов А.Е., & Мойсюк Я.Г. (2020). Сохранение и перфузионная реабилитация донорских органов: достижения последнего десятилетия. Альманах клинической медицины, 48 (3), 193-206.

7. Reznik O.N., Bagnenko S. F., Skvortsov A.E., et al. Rehabilitation of Ischemically Damaged Human Kidneys by Normothermic Extracorporal Hemoperfusion In Situ With Oxygenation and Leukocyte Depletion // Transplantation proceedings. 2010. Vol. 42 № 5. P. 1536-1538.

8. Moers, C., Smits, J. M., Maathuis, M. H., Treckmann, J., van Gelder, F., Napieralski, B. P., van Kasterop-Kutz, M., van der Heide, J. J., Squifflet, J. P., van Heurn, E., Kirste, G. R., Rahmel, A., Leuvenink, H. G., Paul, A., Pirenne, J., & Ploeg, R. J. (2009). Machine perfusion or cold storage in deceased-donor kidney transplantation. *The New England journal of medicine*, *360*(1), 7–19.

9. Clavien, P. A., Harvey, P. R., & Strasberg, S. M. (1992). Preservation and reperfusion injuries in liver allografts. An overview and synthesis of current studies. *Transplantation*, *53*(5), 957–978.

10. Nassar, A., Liu, Q., Farias, K., D'Amico, G., Tom, C., Grady, P., Bennett, A., Diago Uso, T., Eghtesad, B., Kelly, D., Fung, J., Abu-Elmagd, K., Miller, C., & Quintini, C. (2015). Ex vivo normothermic machine perfusion is safe, simple, and reliable: results from a large animal model. *Surgical innovation*, *22*(1), 61–69.

11. Nagrath D., Xu H., Tanimura Y., et al. Metabolic preconditioning of donor organs: defatting fatty livers by normothermic perfusion ex vivo. Metab. Eng. 2009; 11(4–5):274–283. DOI:10.1016/j. ymben.2009.05.005

12. Clavien, PA., Dutkowski, P., Mueller, M. *et al.* Transplantation of a human liver following 3 days of ex situ normothermic preservation. *Nat Biotechnol* (2022). https://doi.org/10.1038/s41587-022-01354-7.

13. Fondevila, C., Hessheimer, A. J., Maathuis, M. H., Muñoz, J., Taurá, P., Calatayud, D., Leuvenink, H., Rimola, A., Ploeg, R. J., & García-Valdecasas, J. C. (2011). Superior preservation of DCD livers with continu-

ous normothermic perfusion. *Annals of surgery*, *254*(6), 1000–1007. https://doi.org/10.1097/SLA.0b013e31822b8b2f

14. Moers, C., Pirenne, J., Paul, A., Ploeg, R. J., & Machine Preservation Trial Study Group (2012). Machine perfusion or cold storage in deceased-donor kidney transplantation. *The New England journal of medicine*, *366*(8), 770–771. https://doi.org/10.1056/NEJMc1111038.

15. Organ Recovery systems/ URL: https://www.organ-recovery.com/lifeport-liver-transporter/.

16. Guarrera, J. V., Henry, S. D., Samstein, B., Reznik, E., Musat, C., Lukose, T. I., Ratner, L. E., Brown, R. S., Jr, Kato, T., & Emond, J. C. (2015). Hypothermic machine preservation facilitates successful transplantation of "orphan" extended criteria donor livers. *American journal of transplantation : official journal of the American Society of Transplantation and the American Society of Transplant Surgeons*, *15*(1), 161–169. https://doi.org/10.1111/ajt.12958.

17. XVIVO ANNUAL REPORT 2021 URL: https://www.xvivogroup.com/.

18. XVIVO, Products. URL: https://www.organ-assist.nl/products/.

19. Schlegel, A., Muller, X., Kalisvaart, M., Muellhaupt, B., Perera, M., Isaac, J. R., Clavien, P. A., Muiesan, P., & Dutkowski, P. (2019). Outcomes of DCD liver transplantation using organs treated by hypothermic oxygenated perfusion before implantation. *Journal of hepatology*, *70*(1), 50–57. https://doi.org/10.1016/j.jhep.2018.10.005.

20. van Rijn, R., Schurink, I. J., de Vries, Y., van den Berg, A. P., Cortes Cerisuelo, M., Darwish Murad, S., Erdmann, J. I., Gilbo, N., de Haas, R. J., Heaton, N., van Hoek, B., Huurman, V., Jochmans, I., van Leeuwen, O. B., de Meijer, V. E., Monbaliu, D., Polak, W. G., Slangen, J., Troisi, R. I., Vanlander, A., … DHOPE-DCD Trial Investigators (2021). Hypothermic Machine Perfusion in Liver Transplantation - A Randomized Trial. *The New England journal of medicine*, *384*(15), 1391–1401. https://doi.org/10.1056/NEJMoa2031532.

21. OrganOx. URL: https://www.organox.com/.

22. Nasralla, D., Coussios, C. C., Mergental, H., Akhtar, M. Z., Butler, A. J., Ceresa, C., Chiocchia, V., Dutton, S. J., García-Valdecasas, J. C., Heaton, N., Imber, C., Jassem, W., Jochmans, I., Karani, J., Knight, S. R., Kocabayoglu, P., Malagò, M., Mirza, D., Morris, P. J., Pallan, A., … Consortium for Organ Preservation in Europe (2018). A randomized trial of normothermic preservation in liver transplantation. *Nature*, *557*(7703), 50–56. https://doi.org/10.1038/s41586-018-0047-9.

23. Mehdi Javanbakht, Atefeh Mashayekhi, Miranda Trevor, Michael Branagan-Harris & Jowan Atkinson (2020) Cost-utility analysis of normothermic liver perfusion with the OrganOx metra compared to static cold storage in the United Kingdom, Journal of Medical Economics, 23:11, 1284-1292, DOI: 10.1080/13696998.2020.1804391.

24. Автоматизированное устройство для нормотермической перфузии изолированной донорской печени // Грязнов Н.А., Харламов В.В., Никитин С.А., Тарасов А.Э., Резник О.Н., Скворцов А.Е., Алексеев Е.М., Октябрьская Л.В., Минчук С.В., Козлов И.С. // Патент на полезную модель RU 179217 U1, 04.05.2018. Заявка № 2017146297 от 27.12.2017.

25. An adaptive algorithm for machine perfusion of isolated donor liver // Gryaznov N.A., Kharlamov V.V., Shumilov A.V., Nikitin S.A., Senchik K.Y., Skvortsov A.E., Gataulin Y.A., Yukhnev A.D., Reznik O.N. // Biomedical Engineering. 2018. Т. 51. № 6. С. 401-406.

26. Перфузионный комплекс для восстановления и поддержания жизнеспособности донорской печени ex vivo: первое экспериментальное исследование // Резник О.Н., Скворцов А.Е., Лопота А.В., Грязнов Н.А., Харламов В.В., Киреева Г.С. // Вестник трансплантологии и искусственных органов. 2017. Т. 19. № 1. С. 35-40.

27. Экспериментальный комплекс для перфузии донорской печени // Багненко С.Ф., Резник О.Н., Скворцов А.Е., Лопота А.В., Грязнов Н.А., Харламов В.В., Киреева Г.С. // Вестник хирургии им. И.И. Грекова. 2017. Т. 176. № 3. С. 88-92.

И.С. Барынкин[1,2], А.С. Смирнов[1,3]

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ АКТИВНОГО ЭКЗОСКЕЛЕТА НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ

[1]Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург; [2] ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург; [3]Институт проблем машиноведения Российской академии наук, Санкт-Петербург, ivan.barynkin08@gmail.com, smirnov.alexey.1994@gmail.com

Аннотация

В данной работе обсуждаются механические и бионические процессы ходьбы человека с целью создания теоретической базы для конструирования активного экзоскелета нижних конечностей. Дается описание конструкции прототипа экзоскелета и приводится общая расчетная схема системы, которая представляет собой человека, интегрированного с экзоскелетом. На основе наблюдений за ходьбой человека отбрасывается ряд несущественных степеней свободы и составляется упрощенная расчетная схема, содержащая лишь три основные степени свободы. При помощи уравнений Лагранжа второго рода строятся уравнения движения системы, учитывающие управляющие моменты приводов в шарнирных сочленениях. Кроме того, приводится описание основных электрических компонентов системы: микроконтроллер, электроприводы и их платы управления, аккумулятор, датчики углов и бионические сенсоры. Также приводится обзор основных тазовых и бедренных мышечных групп человека и рассматривается их работа при сгибании и разгибании суставов. Дается описание работы миографических сенсоров и алгоритма обработки сигналов с них, а также рассматривается случай одновременной работы мышц-антагонистов. Составляется алгоритм минимизации ошибки, который служит основной идеей управления устройством. Вводится критерий качества алгоритма управления, который основан на бионических особенностях работы мускулатуры человека. Помимо этого, приводятся скриншоты программно-информационного обеспечения, необходимого для вывода на экран данных с сенсоров, а также для отрисовки конфигурации экзоскелета в реальном времени в виде упрощенной 3D модели. В заключение делаются выводы по проделанной работе и приводятся идеи, касающиеся модернизации механической, электрической и вычислительной систем экзоскелета.

Ключевые слова

Экзоскелет, биомеханика, миография, система управления, критерий качества.

I.S. Barynkin[1,2], A.S. Smirnov[1,3]

DESIGN AND RESEARCH OF A NEW CONSTRUCTION OF THE LOWER LIMB ACTIVE EXOSKELETON

[1]Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Rusiia; [2]Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, St. Petersburg, Russia; [3]Institute of Problems of Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia, ivan.barynkin08@gmail.com, smirnov.alexey.1994@gmail.com

Abstract

This work discusses the mechanical and bionic processes of human walking to create a theoretical basis for constructing an active exoskeleton of the lower limbs. A description of the design of the exoskeleton prototype is given and a general design scheme of the system is presented, which is a person integrated with the exoskeleton. Based on observations of human walking, a number of insignificant degrees of freedom are discarded and a simplified calculation scheme is compiled that contains only three main degrees of freedom. Using the Lagrange equations of the second kind, the equations of motion of the system are constructed, taking into account the control moments of the drives in the articulations. In addition, a description of the main electrical components of the system is given: a microcontroller, electric drives and their control boards, a

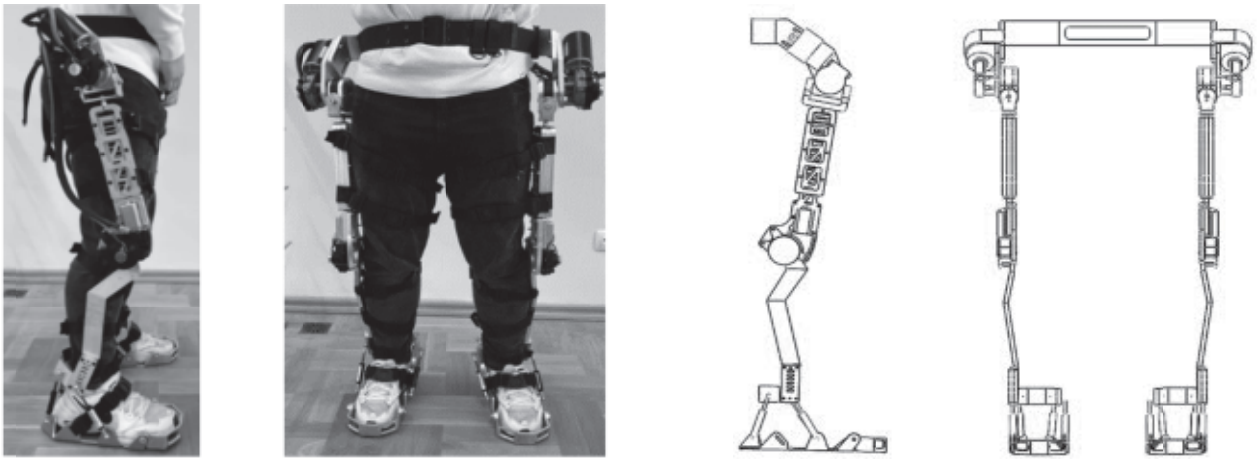
battery, angle sensors and bionic sensors. It also provides an overview of the main human pelvic and femoral muscle groups and discusses their work during flexion and extension of the joints. A description of the operation of myographic sensors and an algorithm for processing signals from them is given, and the case of simultaneous operation of antagonist muscles is also considered. An error minimization algorithm is compiled, which serves as the main idea of device control. Criterion for the quality of the control algorithm is introduced, which is based on the bionic features of the work of the human musculature. In addition, screenshots of the information software required to display sensor data on the screen, as well as to draw the exoskeleton configuration in real time in the form of a simplified 3D model, are provided. In conclusion, findings are drawn on the work done, and ideas are given regarding the modernization of the mechanical, electrical and computing systems of the exoskeleton.

Key words

Exoskeleton, biomechanics, myography, systems of control, quality criterion.

В последние несколько десятилетий большое внимание со стороны ученых-исследователей и инженеров-проектировщиков уделяется вопросам, которые находятся на стыке биомеханики и робототехники [1, 2], что подтверждается наличием значительного числа новых публикаций в этих областях. Существенная их часть посвящена изучению динамики ходьбы человека и двуногих шагающих роботов [3-7]. Ясно, что исследование самых разнообразных биоморфных механизмов и систем, получивших в настоящее время существенное развитие и широкое распространение, представляет как теоретический, так и важный практический интерес и является актуальной задачей. К подобным биоморфным устройствам относятся и экзоскелеты, которые представляют собой многозвенные электромеханические устройства, предназначенные для помощи человеку в подъеме тяжестей или в движении парализованными конечностями [8-14]. Экзоскелеты активно используются при реабилитации людей, в военной и гражданской сферах, а также они задействованы на складах в качестве помощи грузчикам и находят свое применение во многих других областях.

Целью настоящего исследования является обсуждение новой конструкции экзоскелета и анализ механических и бионических процессов ходьбы человека, на базе которых строится математическая модель человека, интегрированного с экзоскелетом, а также создается система управления.



а) б)

Рисунок 1 — Экзоскелет Hatsune: а) Реальная конструкция, б) Эскиз в двух проекциях

Рисунок 2 — Газовые пружины в районе стоп

Описание конструкции экзоскелета Hatsune

Перейдем к изучению объекта настоящего исследования – активного экзоскелета Hatsune собственной разработки, реальная конструкция которого изображена на рисунке 1а, и, кроме того, его эскиз приведен на рисунке 1б в двух проекциях.

В конструкции данного устройства реализованы 14 степеней свободы: по 3 степени свободы в тазобедренных суставах, по 1 степени свободы в коленях и по 3 степени свободы в стопах. В районе стоп установлены 8 газовых пружин (по 4 на каждую стопу), которые служат для смягчения ударов при ходьбе и беге, и они представлены на рисунке 2.

При ходьбе кинетическая энергия ноги в момент наступания переходит в потенциальную энергию сжатой пружины. Во время нового шага эта энергия высвобождается и тем самым дает дополнительное усилие. Такая конструкция немного разгружает коленный и бедренный приводы, а также делает саму ходьбу более комфортной.

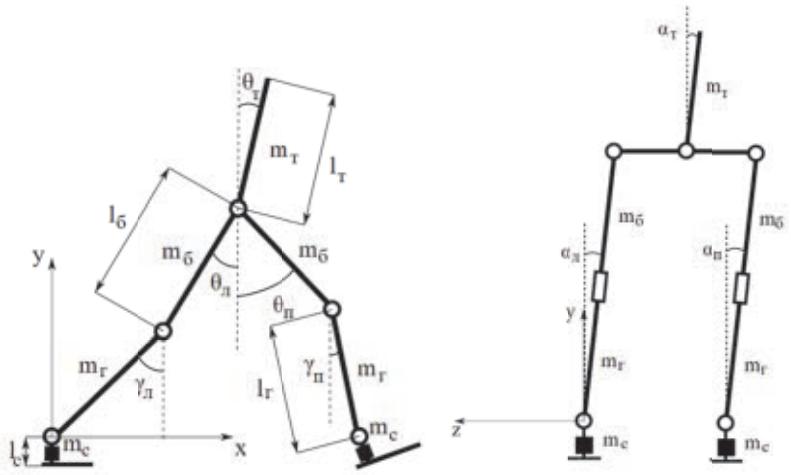


Рисунок 3 — Расчетная схема системы в боковой и фронтальной плоскостях

Предлагаемая схема позволяет оператору выполнять боковые наклоны, выпады в сторону, а также переносить вес тела с ноги на ногу в положении стоя. На рисунке 3 показана подробная схема системы (т.е. человека, интегрированного с экзоскелетом) в боковой и фронтальной плоскостях, где также приведены обозначения для всех основных геометрических и инерционных параметров, и, кроме того, изображены углы, характеризующие текущую конфигурацию экзоскелета.

Построение упрощенной расчетной схемы

Для исследования динамического поведения системы «человек + экзоскелет» целесообразно предварительно осуществить ряд упрощений общей схемы, приведенной на рис. 3, исключив из рассмотрения малозначительные степени свободы и оставив лишь основные из них. Это даст возможность построить математическую модель системы, которая будет обладать достаточно небольшим числом степеней сво-

боды. Данное обстоятельство позволит существенно упростить вычислительную сторону дела, но при этом будет обеспечена адекватность математической модели не только в качественном, но и в количественном отношении. С этой целью перейдем к обсуждению допущений, которые приведут к снижению количества степеней свободы модели. Во-первых, предположим для простоты, что фронтальный наклон туловища отсутствует, т. е. $\theta_т = 0$. Кроме того, можно пренебречь и боковым наклоном туловища, который практически не влияет на динамику ходьбы, т. е. положить $\alpha_п = \alpha_л = \alpha_т = 0$. Также можно не рассматривать поворот вокруг продольной оси бедра в сферических бедренных шарнирах, что позволит существенно упростить задачу и свести ее к плоской. Это означает, что модель будет состоять из однородных прямых стержней *AB* и *DE* (голени длины $l_г$ и массы $m_г$), *BC* и *CD* (бедра длины $l_б$ и массы $m_б$), и горизонтального стержня *CT* (туловище длины $l_т$ и массы $m_т$, учитывающее всю верхнюю часть системы, расположенную выше пояса). Отметим, что приведенные выше инерционные параметры учитывают как массу указанного отдела самого человека, так и массу соответствующей части экзоскелета. При этом необходимо подчеркнуть, что в точке *C* фактически расположены два шарнирных сочленения, соединяющие стержни *BC* и *CT* и стержни *CD* и *CT*. Также подчеркнем, что все шарниры считаются идеальными, поэтому трение в шарнирных сочленениях не учитывается. Будем считать левую ногу опорной, а правую ногу – выносной. Помимо всего сказанного, необходимо также учитывать биологические ограничения, накладываемые на углы поворота в коленных суставах. Если оператор не страдает дисплазией колена, то оно не может выгнуться в обратном направлении, поэтому $\gamma_п \le \theta_п$, $\gamma_л \ge \theta_л$. Однако если провести наблюдение за ходьбой человека, то можно заметить, что опорная нога практически не сгибается в колене. Исходя из этого, для упрощения можно также принять, что $\gamma_л = \theta_л$. В результате мы приходим к упрощенной плоской расчетной схеме, представленной на рис. 4 и имеющей всего три степени свободы. Таким образом, в качестве обобщенных координат мы будем принимать три угла $\gamma_л$, $\theta_п$ и $\gamma_п$. Отметим, что выбор абсолютных углов отклонения звеньев от вертикали, а не относительных углов отклонения звеньев друг относительно друга связан с тем, что в этом случае уравнения движения будут иметь наиболее простую форму записи.

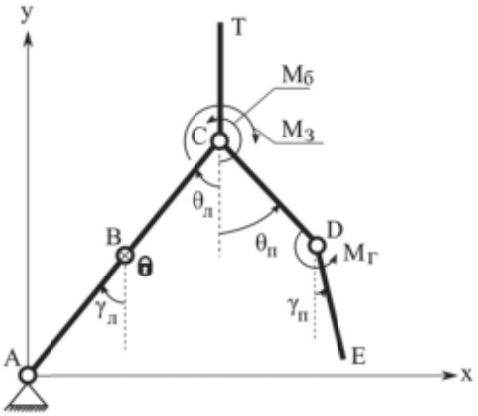


Рисунок 4 — Упрощенная плоская расчетная схема системы с тремя степенями свободы

В таблице 1 приведены геометрические и инерционные характеристики стержней, которые моделируют бедра, голени и туловище и представлены в упрощенной расчетной схеме. При этом для инерционных параметров приводится сумма, где первое слагаемое отвечает массе отдела человека, а второе характеризует массу соответствующей части экзоскелета.

Таблица 1 — Геометрические и инерционные характеристики экзоскелета

Обозначение величины	Наименование величины	Значение величины
$l_б$	Длина бедра	0,41 м
$l_г$	Длина голени	0,53 м
$l_т$	Длина туловища	0,58 м

Обозначение величины	Наименование величины	Значение величины
$m_б$	Масса бедра	12 + 2,53 кг
$m_г$	Масса голени	4,8 + 1,5 кг
$m_т$	Масса туловища	44,5 + 6,5 кг

Вывод уравнений управляемого движения системы

Обратимся теперь к получению уравнений движения системы «человек + экзоскелет» в рамках полученной выше ее упрощенной расчетной схемы на рис. 4. С этой целью запишем сначала декартовы координаты центров масс стержней *AB, BC, CT, CD* и *DE*, помечая их для краткости индексами 1, 2, 3, 4 и 5 соответственно:

$$\begin{cases} x_1 = \dfrac{l_г}{2}\sin\gamma_л \\ y_1 = \dfrac{l_г}{2}\cos\gamma_л \end{cases}, \quad \begin{cases} x_2 = \left(l_г + \dfrac{l_б}{2}\right)\sin\gamma_л \\ y_2 = \left(l_г + \dfrac{l_б}{2}\right)\cos\gamma_л \end{cases}, \quad \begin{cases} x_3 = (l_г + l_б)\sin\gamma_л \\ y_3 = (l_г + l_б)\cos\gamma_л + \dfrac{l_т}{2} \end{cases},$$

$$\begin{cases} x_4 = (l_г + l_б)\sin\gamma_л + \dfrac{l_б}{2}\sin\theta_п \\ y_4 = (l_г + l_б)\cos\gamma_л - \dfrac{l_б}{2}\cos\theta_п \end{cases}, \quad \begin{cases} x_5 = (l_г + l_б)\sin\gamma_л + l_б\sin\theta_п + \dfrac{l_г}{2}\sin\gamma_п \\ y_5 = (l_г + l_б)\cos\gamma_л - l_б\cos\theta_п - \dfrac{l_г}{2}\cos\gamma_п \end{cases}. \tag{1}$$

Дифференцируя эти выражения по времени, можно вычислить квадраты скоростей центров масс стержней *CT, CD* и *DE*:

$$v_3^2 = (l_г + l_б)^2\dot\gamma_л^2, \quad v_4^2 = (l_г + l_б)^2\dot\gamma_л^2 + \frac{l_б^2}{4}\dot\theta_п^2 + (l_г + l_б)l_б\cos(\gamma_л + \theta_п)\dot\gamma_л\dot\theta_п, \quad v_5^2 = (l_г + l_б)^2\dot\gamma_л^2 + l_б^2\dot\theta_п^2 +$$
$$+\frac{l_г^2}{4}\dot\gamma_п^2 + 2(l_г + l_б)l_б\cos(\gamma_л + \theta_п)\dot\gamma_л\dot\theta_п + (l_г + l_б)l_г\cos(\gamma_л + \gamma_п)\dot\gamma_л\dot\gamma_п + l_б l_г\cos(\theta_п - \gamma_п)\dot\theta_п\dot\gamma_п. \tag{2}$$

Для записи кинетической энергии системы необходимо учесть, что стержни *AB* и *BC* совершают чистое вращение относительно неподвижной точки *A*, стержень *CT* совершает поступательное движение, а для вычисления кинетической энергии стержней *CD* и *DE* необходимо использовать теорему Кёнига. В результате можно получить следующее выражение:

$$T = \frac{1}{2}\left(J_{1A} + J_{2A}\right)\dot\gamma_л^2 + \frac{1}{2}m_т v_2^2 + \left(\frac{1}{2}m_б v_3^2 + \frac{1}{2}J_б\dot\theta_п^2\right) + \left(\frac{1}{2}m_г v_4^2 + \frac{1}{2}J_г\dot\gamma_п^2\right). \tag{3}$$

Здесь $J_б = m_б l_б^2/12$ и $J_г = m_г l_г^2/12$ – моменты инерции стержней *CD* и *DE* соответственно относительно осей, проходящих через их центры масс, $J_{1A} = m_г l_г^2/3$ – момент инерции стержня *AB* относительно неподвижной точки *A*, а $J_{2A} = m_б l_б^2/12 + m_б\left(l_г + l_б/2\right)^2$ – момент инерции стержня *BC* относительно той же точки, вычисленный по формуле Гюйгенса-Штейнера. Подставляя все необходимые соотношения в формулу (3), получим после ряда упрощений следующее выражение для кинетической энергии:

$$T = \frac{1}{2}\left[\left(m_г\left(\frac{4}{3}l_г^2 + 2l_г l_б + l_б^2\right) + m_б\left(2l_г^2 + 3l_г l_б + \frac{4}{3}l_б^2\right) + m_т(l_г + l_б)^2\right)\dot\gamma_л^2 + \frac{1}{3}(m_б l_б^2\dot\theta_п^2 + m_г l_г^2\dot\gamma_п^2) + \right.$$
$$\left. +(2m_г + m_б)(l_г + l_б)l_б\cos(\gamma_л + \theta_п)\dot\gamma_л\dot\theta_п + m_г\left((l_г + l_б)l_г\cos(\gamma_л + \gamma_п)\dot\gamma_л + l_б l_г\cos(\theta_п - \gamma_п)\dot\theta_п\right)\dot\gamma_п\right] = \tag{4}$$
$$= \frac{1}{2}\dot{\mathbf{q}}^{\mathrm{T}}\mathbf{A}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}},$$

где $\mathbf{q} = [\gamma_л, \theta_п, \gamma_п]^T$ – столбец обобщенных координат, а симметричная матрица $\mathbf{A}(\mathbf{q})$ кинетической энергии (называемая также матрицей инерционных коэффициентов) определяется формулой:

$$\mathbf{A}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} m_г\left(\frac{4}{3}l_г^2 + 2l_г l_б + l_б^2\right) + & & \\ +m_б\left(2l_г^2 + 3l_г l_б + \frac{4}{3}l_б^2\right) + & \left(m_г + \frac{m_б}{2}\right)(l_г + l_б)l_б\cos(\gamma_л + \theta_п) & \frac{m_г}{2}(l_г + l_б)l_г\cos(\gamma_л + \gamma_п) \\ +m_т(l_г + l_б)^2 & & \\ \left(m_г + \frac{m_б}{2}\right)(l_г + l_б)l_б\cos(\gamma_л + \theta_п) & \frac{m_б}{3}l_б^2 & \frac{m_г}{2}l_б l_г\cos(\theta_п - \gamma_п) \\ \frac{m_г}{2}(l_г + l_б)l_г\cos(\gamma_л + \gamma_п) & \frac{m_г}{2}l_б l_г\cos(\theta_п - \gamma_п) & \frac{m_г}{3}l_г^2 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Выражение для потенциальной энергии системы, очевидно, имеет вид:

$$П = m_б g y_1 + m_г g y_2 + m_т g y_2 + m_т g y_3 + m_б g y_4. \quad (6)$$

После подстановки в формулу (6) необходимых соотношений (1) и отбрасывания несущественной аддитивной постоянной потенциальная энергия приобретает окончательную форму:

$$П = g\left[\left(m_г\left(\frac{3}{2}l_г + l_б\right) + m_б\left(2l_г + \frac{3}{2}l_б\right) + m_т(l_г + l_б)\right)\cos\gamma_л - \left(m_г + \frac{m_б}{2}\right)l_б\cos\theta_п - \frac{m_г}{2}l_г\cos\gamma_п\right] = \quad (7)$$
$$= П(\mathbf{q}).$$

Помимо этого, необходимо также учесть действие управляющих моментов в шарнирных сочленениях. В силу того, что стержни *AB* и *BC* в рамках рассматриваемой модели считаются единым стержнем *AC*, то в шарнире *B* момент не вводится. Поэтому следует принять во внимание только момент $M_г$ в шарнире *D*, соединяющем стержни *CD* и *DE*, а также два момента $M_з$ и $M_б$ в сочленениях, расположенных в точке *C* – первый из этих моментов действует в шарнире, соединяющем стержни *BC* и *CT*, а другой момент действует в шарнире, соединяющем стержни *CD* и *CT*. Чтобы вычислить обобщенные силы, отвечающие принятым обобщенным координатам и возникающие ввиду действия управляющих моментов, запишем их элементарную работу [15]:

$$\delta' W = M_з\delta\gamma_л + M_б\delta\theta_п + M_г\delta(\gamma_п - \theta_п) = M_з\delta\gamma_л + (M_б - M_г)\delta\theta_п + M_г\delta\gamma_п = \mathbf{Q}^T\delta\mathbf{q}, \quad (8)$$

где столбец обобщенных сил $\mathbf{Q}$, соответствующий столбцу обобщенных координат $\mathbf{q}$, имеет вид:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} M_з, & M_б - M_г, & M_г \end{bmatrix}^T. \quad (9)$$

Таким образом, кинетическая энергия системы есть квадратичная форма столбца обобщенных скоростей $\dot{\mathbf{q}}$ с матрицей $\mathbf{A}(\mathbf{q})$, зависящей от столбца обобщенных координат $\mathbf{q}$, потенциальная энергия системы зависит только от столбца обобщенных координат $\mathbf{q}$, а элементы столбца обобщенных сил $\mathbf{Q}$ представляют собой линейные комбинации управляющих моментов в шарнирных сочленениях. Подставляя выражения (4) и (7) в уравнения Лагранжа второго рода, записанные в матричной форме:

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial T}{\partial \dot{\mathbf{q}}} - \frac{\partial T}{\partial \mathbf{q}} = -\frac{\partial \Pi}{\partial \mathbf{q}} + \mathbf{Q}, \tag{10}$$

получим после преобразований уравнения движения системы в компактной матричной форме, которая является традиционной для задач динамики многозвенных манипуляторов [16, 17]:

$$\mathbf{A}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{B}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{C}(\mathbf{q}) = \mathbf{Q}. \tag{11}$$

Здесь матрица $\mathbf{A}(\mathbf{q})$ определяется согласно (5), а столбцы $\mathbf{B}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})$ и $\mathbf{C}(\mathbf{q})$ имеют вид:

$$\mathbf{B}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} -\left(m_{\text{г}} + \frac{m_{\text{б}}}{2}\right)(l_{\text{г}} + l_{\text{б}})l_{\text{б}}\sin(\gamma_{\text{л}} + \theta_{\text{п}})\dot{\theta}_{\text{п}}^2 - \frac{m_{\text{г}}}{2}(l_{\text{г}} + l_{\text{б}})l_{\text{г}}\sin(\gamma_{\text{л}} + \gamma_{\text{п}})\dot{\gamma}_{\text{п}}^2 \\ -\left(m_{\text{г}} + \frac{m_{\text{б}}}{2}\right)(l_{\text{г}} + l_{\text{б}})l_{\text{б}}\sin(\gamma_{\text{л}} + \theta_{\text{п}})\dot{\gamma}_{\text{л}}^2 + \frac{m_{\text{г}}}{2}l_{\text{б}}l_{\text{г}}\sin(\theta_{\text{п}} - \gamma_{\text{п}})\dot{\gamma}_{\text{п}}^2 \\ -\frac{m_{\text{г}}}{2}(l_{\text{г}} + l_{\text{б}})l_{\text{г}}\sin(\gamma_{\text{л}} + \gamma_{\text{п}})\dot{\gamma}_{\text{л}}^2 - \frac{m_{\text{г}}}{2}l_{\text{б}}l_{\text{г}}\sin(\theta_{\text{п}} - \gamma_{\text{п}})\dot{\theta}_{\text{п}}^2 \end{bmatrix}, \tag{12}$$

$$\mathbf{C}(\mathbf{q}) = g\begin{bmatrix} -\left(m_{\text{г}}\left(\frac{3}{2}l_{\text{г}} + l_{\text{б}}\right) + m_{\text{б}}\left(2l_{\text{г}} + \frac{3}{2}l_{\text{б}}\right) + m_{\text{т}}(l_{\text{г}} + l_{\text{б}})\right)\sin\gamma_{\text{л}} \\ \left(m_{\text{г}} + \frac{m_{\text{б}}}{2}\right)l_{\text{б}}\sin\theta_{\text{п}} \\ \frac{m_{\text{г}}}{2}l_{\text{г}}\sin\gamma_{\text{п}} \end{bmatrix}. \tag{13}$$

Отметим, что матричная форма (11) удобна для проведения процедуры численного интегрирования в пакетах прикладных программ, а структура входящих в нее матрицы $\mathbf{A}(\mathbf{q})$ и столбцов $\mathbf{B}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})$ и $\mathbf{C}(\mathbf{q})$ оказывается достаточно несложной в силу того, что в рассмотрении были оставлены лишь три основные степени свободы. Подчеркнем также, что в уравнения движения не входит длина туловища $l_{\text{т}}$, а входит только его масса $m_{\text{т}}$, как и следовало ожидать в рамках принятой упрощенной модели.

Описание электронной схемы устройства

Помимо механической системы, в данном устройстве реализована также и электрическая система с напряжением питания для силовых устройств 24 В. Такое напряжение является оптимальным для большинства приводов, представленных на рынке. На данный момент в прототипе используются коллекторные приводы с червячными редукторами. В дальнейшем предполагается осуществить переход на BLDC двигатели (бесколлекторные двигатели постоянного тока) модели AK80, в которых уже имеются датчик положения, датчик тока и прочие сенсоры. Это поможет увеличить силовые возможности устройства. Для управления двигателями установлены платы H-мостов с возможностью регулирования направления и скорости вращения. Вокруг бедер и ягодиц оператора в виде поясков на компрессионных шортах закреплены миографические сенсоры (рис. 5), улавливающие и измеряющие амплитуду нервных импульсов [18]. Это позволяет измерять активность разных групп мышц и на основе полученных данных определять, какое движение хочет совершить человек.

Основным устройством вычислений экзоскелета является одноплатный компьютер Raspberry PI model 3. В качестве датчиков углов в шарнирах используются потенциометры номиналом 10 кОм.

Для питания устройства используется Li-Po аккумулятор с шестью ячейками с напряжением питания 24 В и максимальным током 20 А.

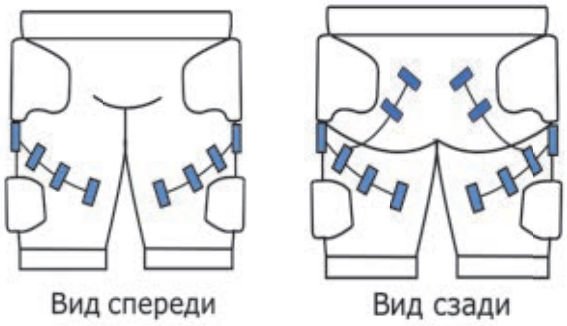


Рисунок 5 — Расположение миографических сенсоров на компрессионных шортах

Алгоритм обработки сигналов миографических сенсоров

В экзоскелете основную бионическую связь между человеком и устройством выполняют миографические сенсоры. Они прикрепляются к пояскам, которые окружают конечности оператора. Датчики расположены на поверхностях над мышечными группами. Основными двумя группами мышц-антагонистов являются [19]:

1. *Группа бедренного сустава* (в рассматриваемой модели – бедренного шарнира). Большая ягодичная мышца (1 на рис. 6а) разгибает бедро, а ее антагонистом является целая группа мышц бедра: напрягатель широкой фасции бедра (3 на рис. 6а), портняжная мышца (9 на рис. 6б), составная четырехглавая мышца бедра (3, 2, 18, 11 на рис. 6б). В случае четырехглавой мышцы появляется особенность, заключающаяся в том, что она является двусоставной. Ее нижний конец прикреплен к надколеннику и переходит в связку надколенника, которая в свою очередь прикреплена к большеберцовой кости. В то же время, верхний конец прикреплен к передней внутренней части таза. В результате напряжений мышцы сгибается бедро, но при этом разгибается голень. Это говорит о том, что в случае разгибания бедра эта группа мышц является антагонистом, и в случае сгибания голени она также выступает в роли антагониста. Поэтому она оказывает влияние одновременно на два шарнира.

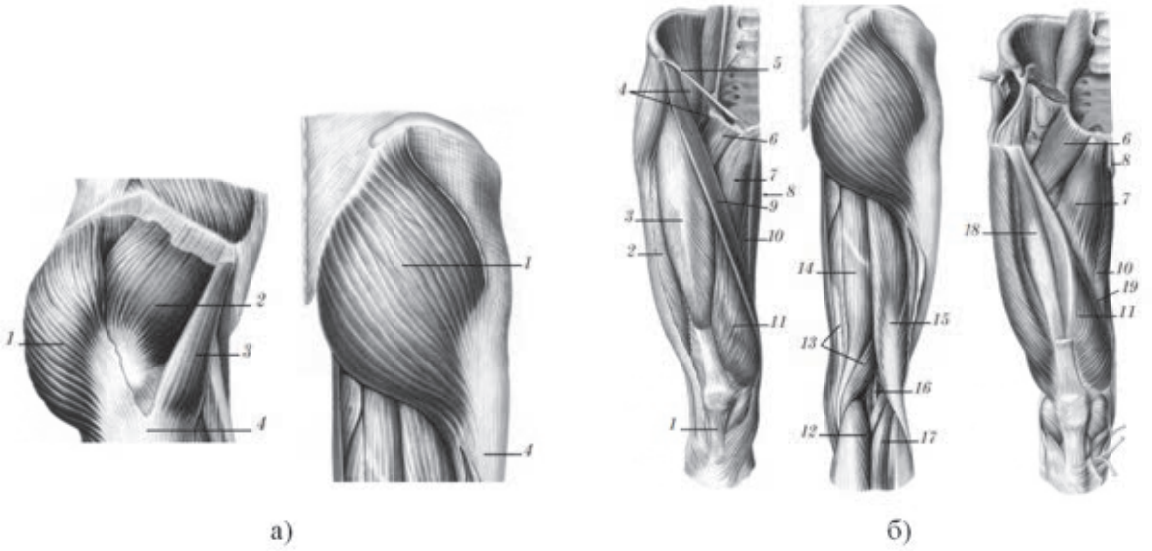


Рисунок 6 – Мышечные системы человека: а) Мышцы таза, б) Мышцы правого бедра

2. *Группа коленного сустава*. Как было сказано ранее, четырехглавая мышца разгибает голень, а ее антагонистом является задняя группа мышц бедра: двуглавая (15 на рис. 6б), полусухожильная (14 на

рис. 6б) и полуперепончатая мышца (13 на рис. 6б), которые сгибают голень, но также помогают большой ягодичной мышце разгибать бедро. Таким образом, это еще одна группа двусоставных мышц.

После определения основных приводящих мышц нижних конечностей следует обратить особое внимание на обработку сигналов, которые получаются от миографических сенсоров. Сигнал, принимаемый с отдельного датчика, выглядит следующим образом (рис. 7а). Алгоритм обработки сигнала заключается в построении кривой, которая представляет собой *экспоненциальное скользящее среднее значение*.

Предположим, что имеется некоторая функция $f(t)$, определяющая сигнал. Необходимо выявить изменение сигнала, т. е. установить, возрастает он или убывает. Для обработки сигнала используется метод экспоненциального скользящего среднего (exponential moving average – *EMA*). Идея метода заключается в том, что каждое новое усредненное значение получается на основе текущего и предыдущих значений функции. Значение экспоненциального скользящего среднего *n*-ного порядка в текущий момент времени t_i вычисляется по следующему алгоритму [18]:

$$EMA_i^n = \alpha EMA_i^{n-1} + (1-\alpha) EMA_{i-1}^n, \tag{14}$$

где EMA_{i-1}^n – предыдущее значение экспоненциального скользящего среднего *n*-ного порядка (в момент времени t_{i-1}), EMA_i^{n-1} – текущее значение экспоненциального скользящего среднего (*n*-1)-го порядка (в момент времени t_i), а α – сглаживающий коэффициент (он принимает значения от 0 до 1, и чем он меньше, тем больше влияние предыдущих значений на текущую величину среднего).

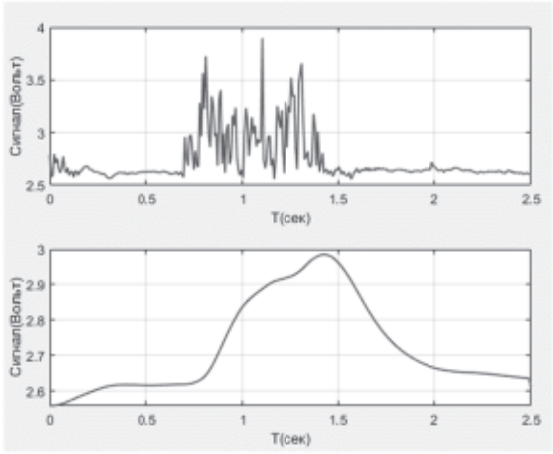


Рисунок 7 — Сигнал: а) Необработанный, б) Обработанный

В данной работе было использовано экспоненциальное скользящее среднее 3-го порядка. Сначала вычисляется экспоненциальное скользящее среднее первого порядка FMA_i:

$$FMA_i = \alpha f(t_i) + (1-\alpha) FMA_{i-1}, \tag{15}$$

где $f(t_i)$ – значение функции в текущий момент времени t_i, а FMA_{i-1} – экспоненциальное скользящее среднее первого порядка, вычисленное в предыдущий момент времени t_{i-1}. Далее необходимо вычислить экспоненциальное скользящее среднее второго порядка SMA_i:

$$SMA_i = \alpha FMA_i + (1-\alpha) SMA_{i-1}, \tag{16}$$

и, наконец, экспоненциальное среднее третьего порядка TMA_i:

$$TMA_i = \alpha SMA_i + (1-\alpha) TMA_{i-1}. \tag{17}$$

Отметим также, что значения FMA_0, SMA_0 и TMA_0 равны $f(0)$. На рис. 7, б приведен график сигнала, обработанного указанным алгоритмом.

Алгоритм подбора поправочных коэффициентов и определения направления движения

Далее автоматика рассчитывает распределение мощности нервных импульсов по объему мышечных волокон. Это необходимо для определения направления вращения и скорости вращения приводов экзоскелета. Отметим, что в системе управления предусмотрен случай одновременного *статического напряжения* групп мышц-антагонистов, что позволяет оператору напрячь конечность без подачи тока в электродвигатель шарнира. Это оказывается полезным в том случае, если человек захочет размять уставшую конечность. Примером такой группы являются мышцы коленного сустава (рис. 8).

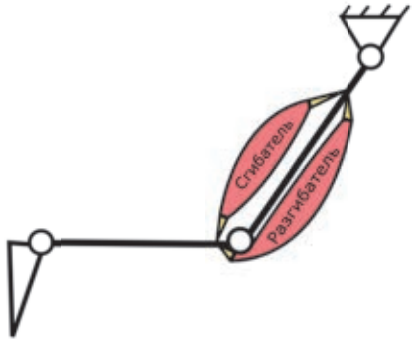


Рисунок 8 — Мышцы-антагонисты колен

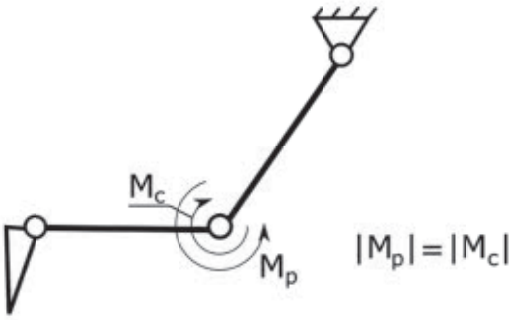


Рисунок 9 — Моменты сил в коленном суставе при статическом напряжении

Поскольку уровень сигнала зависит не только от качества изготовления сенсора, но и от тренированности мышц оператора, толщины жировой прослойки, а также позиции прилегания к конечности, то возникает следующая проблема. Она заключается в том, что если просто напрячь бедро без движения, то мышцами будут создаваться два одинаковых по модулю, но различных по направлению вращательных момента (рис. 9).

Рисунок 10 – Различие между уровнями миографического сигнала мышц-антагонистов

Мышца при напряжении спустя какое-то время выходит на определенный силовой режим, поэтому логично предположить, что после переходного процесса уровни сигнала выровняются и будут одинаковыми. Однако на самом деле это не так (рис. 10).

С целью уравнивания сигналов целесообразно ввести поправочные коэффициенты k_1 и k_2, которые необходимы именно для случая одновременного напряжения противоположных групп мышц (рис. 11а). Домножая на них уровни сигналов P_1 и P_2, мы таким образом пытаемся их уравнять.

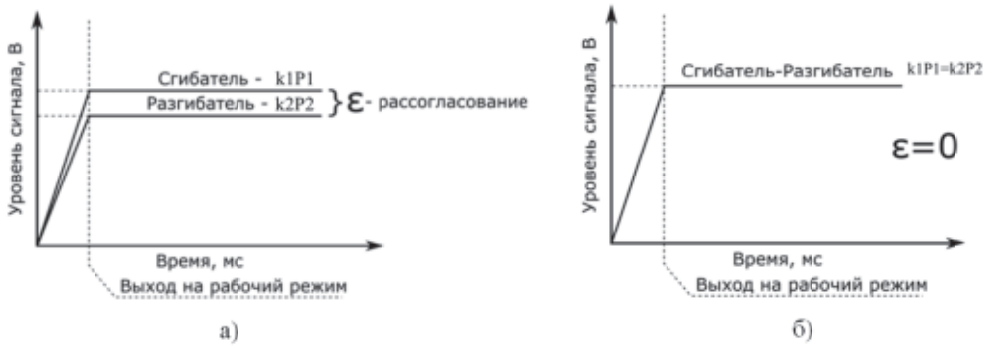


Рисунок 11 — Уравнивание сигналов: а) Введение поправочных коэффициентов и рассогласования, б) Сигналы после процедуры уравнивания

Затем следует вычислить разность получившихся величин, представляющую рассогласование:

$$\varepsilon = k_1 P_1 - k_2 P_2. \tag{18}$$

В системах автоматического управления реализован алгоритм, который составляет управляющее воздействие на основе ошибки, представляющей собой разность между желаемым значением параметра x_* и его текущим значением x:

$$\varepsilon = x_* - x. \tag{19}$$

Сопоставим формулы (18) и (19) друг с другом. Предположим, что сигнал P_1 больше сигнала P_2. Обозначим далее $x_* = k_1 P_1$, а $x = k_2 P_2$. В такой постановке для уравнивания в значимости мышц-антагонистов нужно добиться равенства нулю ошибки ε, т. е. $\varepsilon \to 0$. Этого можно достигнуть, используя методы, которые будут варьировать поправочные коэффициенты, тем самым устремляя ошибку к нулю. Следует отметить, что нет необходимости изменять оба коэффициента, а достаточно принять коэффициент, соответствующий более сильному сигналу (на рис. 10 это сигнал P_1), равным единице, тогда как изменять лишь один коэффициент k_2 с целью уменьшения рассогласования. Вопрос о том, какой именно метод является наиболее предпочтительным для этой задачи, требует отдельного исследования, выходящего за рамки настоящей работы. Укажем лишь, что для этой цели можно использовать методы минимизации невязок. В результате данной процедуры можно добиться того, что уровни сигналов станут одинаковыми (рис. 11б), а ошибка ε будет стремиться к нулю.

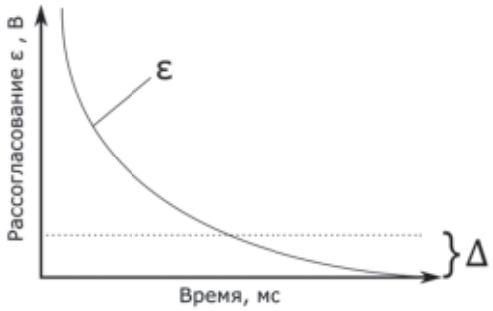


Рисунок 12 — Стремление рассогласования к величине, меньшей Δ

Необходимо также отметить, что подбор поправочных коэффициентов происходит в момент первоначального включения устройства. При этом запускается алгоритм синхронизации бионической связи оператор-экзоскелет. Устройство просит поочередно напрячь мышцы ног таким образом, как если бы оператор не хотел начинать движение, а желал просто размяться. После этого автоматика самостоятельно высчитывает значения искомых коэффициентов. Условием окончания вычислений в идеальном случае является равенство нулю разности уровня сигналов ε. Однако в реальности вели-

чина рассогласования не может оказаться равной нулю, поэтому она должна быть меньше некоторой малой величины, которую мы обозначим за Δ, т. е. должно быть $\varepsilon < \Delta$ (рис. 12).

Алгоритм управления экзоскелетом

После обработки сигнала миографических датчиков получается кривая, которую целесообразно использовать при построении дальнейшего алгоритма управления. В большинстве автоматических систем используется управление, которое минимизирует ошибку ε, определяемую по формуле (19). Значение данной ошибки и используется при формировании управляющего воздействия в системе, в результате чего она стремится к нулю. В таких системах значение ошибки уже является следствием работы алгоритма управления.

В экзоскелете Hatsune используется иной подход. Желаемое значение какого-либо параметра системы, например, угла поворота голени относительно вертикали, задается не самой системой, а намерением человека. Поскольку приводы в устройстве оснащены червячным редуктором, то человек не в состоянии провернуть шарнир. Поэтому в момент начала движения человек сначала напрягает определенную мышечную группу, возбуждая нервные импульсы. Система считывает сигнал, определяет его уровень и начинает вращать привод в том направлении, которое будет соответствовать намерению оператора. Условием выполнения экзоскелетом намерения оператора является расслабление мышечной группы, соответствующей направлению движения конечности. Это и означает равенство нулю значения ε.

Для наглядности и простоты понимания распишем алгоритм по пунктам:

1. Оператор намерен повернуть голень относительно вертикали, поэтому его организм посылает нервные импульсы в конкретную мышечную группу.
2. Датчики улавливают сигнал с нервных окончаний мышц-антагонистов и передают его в вычислительный модуль.
3. Вычислительный модуль определяет сигналы мышц-антагонистов, домножает их на поправочные коэффициенты и вычисляет разность ε.
4. Формируется управляющее воздействие на основе PID регулятора, аргументом которого является значение ε.
5. Экзоскелет начинает вращение привода, тем самым изменяя свою конфигурацию.
6. Условием окончания вращения привода является равенство нулю значения ε.

Согласно 4-му пункту алгоритма, управляющим воздействием на механическую систему является напряжение питания в двигателе *U*, которое, как указано выше, формируется на основе PID регулятора:

$$U(\varepsilon) = K_P \varepsilon + K_I \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau + K_D \frac{d\varepsilon}{dt}, \tag{20}$$

где K_P, K_I и K_D – коэффициенты PID регулятора. При этом необходимо иметь в виду, что при изменении напряжения меняется и момент силы привода. Поэтому для дальнейшего синтеза системы управления следует составить выражение, которое будет описывать электромеханические свойства двигателя. С этой целью запишем уравнение Кирхгофа:

$$L\frac{dI}{dt} + RI = U(\varepsilon) - c_E \omega, \tag{21}$$

где *L* – индуктивность катушки якоря двигателя, *I* – якорный ток, *R* – сопротивление контура, $U(\varepsilon)$ – напряжение, сформированное PID регулятором на основе миографии, $c_E\omega$ – слагаемое, характеризующее противодействие ЭДС и пропорциональное угловой скорости двигателя ω. Учитывая, что электромагнитный момент пропорционален току в якорной цепи, получим:

$$M = Ic_M, \quad I = \frac{M}{c_M}, \tag{22}$$

а затем подставим выражение для тока I в уравнение (21), разделив его на R. В результате приходим к следующему уравнению, описывающему электромагнитные процессы:

$$\tau \dot{M} + M = dU(\varepsilon) - h\omega, \tag{23}$$

где $\tau = L / R$ – электромагнитная постоянная времени, характеризующая скорость протекания электромагнитных процессов, $d = c_M / R$ – коэффициент усиления входного напряжения, а $d = c_E c_M / R$ – противоЭДС двигателя. Решение уравнения (23) и позволяет получить искомую зависимость момента двигателя M от напряжения U.

Необходимо отметить, что по своей сути человек управляет ошибкой ε, которую экзоскелет старается минимизировать. Эту ошибку можно трактовать как степень напряженности мускулатуры человека в определенном направлении, а задача экзоскелета состоит в том, чтобы человек вовсе не тратил силы на перемещение. Поэтому устройство и стремится минимизировать напряжение в мышцах, поскольку в этом и заключается его основное предназначение.

Таким образом, обратная связь системы управления экзоскелета основана на ощущениях человека. При этом неизвестно, как работает биологическая система контроля ходьбы человека, но совершенно очевидно, что эта система успешно справляется со своей задачей. Поэтому блок обратной связи можно представить как некий «черный ящик», принципы функционирования которого нам неизвестны, однако он однозначно справляется с контролем ходьбы.

Подводя некоторый итог, можно представить конечную структурную схему замкнутой системы автоматического управления после настройки поправочных коэффициентов, которая приведена на рис. 13. Прокомментируем работу данной схемы. Полагаем, что первичная настройка системы в случае статической нагрузки проведена, вследствие чего коэффициенты k_1 и k_2 подобраны. Работа автоматики начинается с измерения сигналов нервных мышц – f_1 и f_2. Далее к данным сигналам применяется алгоритм обработки экспоненциального скользящего среднего. После этого осуществляется домножение сигналов на поправочные коэффициенты с дальнейшим вычитанием одного сигнала из другого. По полученной разнице, трактуемой как ошибка ε, на основе PID регулятора формируется напряжение питания электропривода. Момент, который создается электроприводом, изменяет конфигурацию экзоскелета, вследствие чего меняется и столбец обобщенных координат $\mathbf{q}$. Затем человек при помощи рецепторов кожи и вестибулярного аппарата определяет корректность изменения конфигурации своих ног в интеграции с экзоскелетом. На основе нервных импульсов, полученных с биологических «датчиков», человек либо расслабляет мышцы (т. е. прекращает подачу миографических импульсов) в случае удачной конфигурации, либо наоборот создает новые импульсы для корректировки углов поворота в шарнирах. В результате человек становится одним из звеньев системы автоматического управления, и это звено можно назвать биоморфной обратной связью.

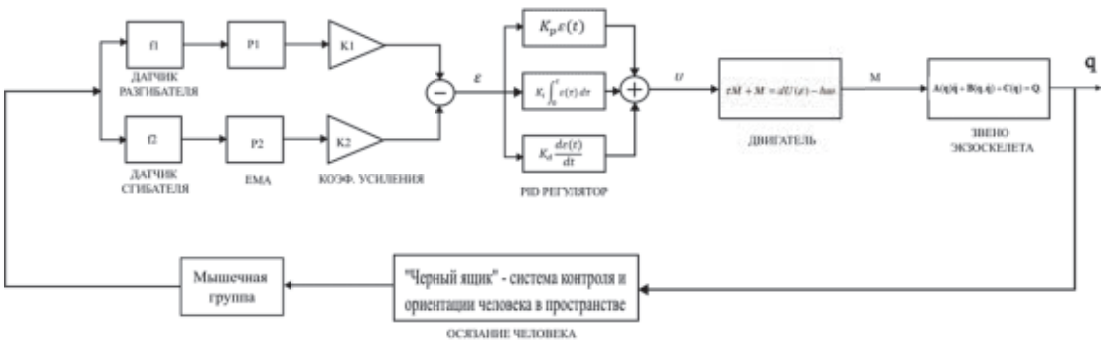


Рисунок 13 — Структурная схема замкнутой системы автоматического управления

Критерий качества

Система управления представляет собой алгоритм, который перехватывает нервный импульс, анализирует его и запускает нужный привод в необходимом направлении и с требуемой скоростью. Такая система работает как перехватчик, которому нужно опередить мышцы человека. При этом возникает вопрос: какую длительность должен иметь промежуток времени между захватом сигнала и срабатыванием привода?

Известно, что в биомеханике время одного сокращения мышцы делится на периоды [20]. Один из таких периодов называется латентным – это промежуток времени, который отсчитывается от поступления нервного импульса до начала сокращения мышцы (рис. 14).

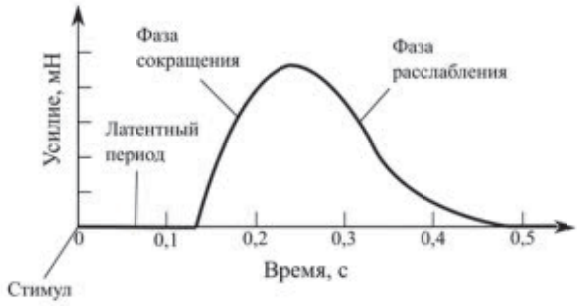


Рисунок 14 — Периоды мышечного сокращения

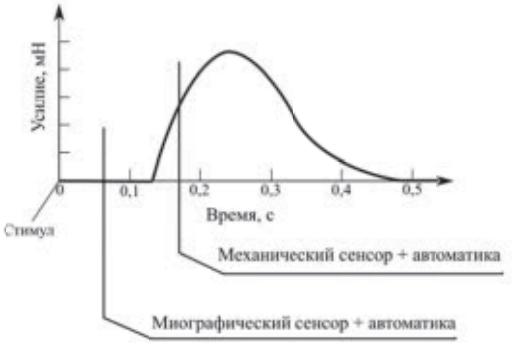


Рисунок 15 — Преимущество миографических датчиков перед механическими

Основываясь на этом, предлагается для оценки эффективности работы устройства ввести новый критерий. Если время между захватом сигнала и срабатыванием привода $T_{с.}$ будет меньшим, чем длительность латентного периода $T_{л.п.}$, то экзоскелет будет забирать почти всю нагрузку на себя, т.е. он будет опережать тело человека. Таким образом, целесообразно использовать критерий [21]:

$$T_{с.} < T_{л.п.}. \quad (24)$$

Использование миографических сенсоров даст возможность опередить тело человека, а экзоскелеты, основанные на тензорезистивных датчиках, которые срабатывают уже после сокращения мышц, напротив, будут проигрывать в скорости срабатывания (рис. 15).

Таким образом, миография – это более перспективный метод анализа и предугадывания движений человека, ведь именно предугадывание – это то, к чему стремится любая система автоматики экзоскелета.

Программно-информационное обеспечение

В прототипе активного экзоскелета реализовано большое количество различных параметров, значения которых позволяют управлять устройством. В прошивке прописаны номера контактов микроконтроллера, силовых контактов приводов, датчиков углов и миографических сенсоров. Все показания для удобства отслеживания и контроля передаются в компьютер через виртуальный монитор порта – COM порт – по проводу USB. Все данные выводятся в приложение, написанное на языке Processing, которое в свою очередь является надстройкой над популярным языком программирования Java.

После запуска приложения можно наблюдать упрощенную 3D модель экзоскелета, которая повторяет конфигурацию реального прототипа, ориентируясь на показания датчиков углов (рис. 16).

В верхней части окна расположено меню управления, позволяющее выводить различные данные (рис. 17). Что касается функций кнопок, то их удобно представить в виде табл. 2.

Рисунок 16 — Начальный экран приложения

Рисунок 17 – Меню управления приложения

Таблица 2 — Названия и функции кнопок управления

Название кнопки	Функция
ANGLES	Выводит на экран шарнирные углы поворота
MOTORS DIRECTIONS	Выводит на экран направления вращения двигателей
MYOGRAPHY	Выводит на экран показания миографии
STOP ALL	Аварийная остановка всех двигателей в случае нештатной ситуации

Кроме того, в левой части окна реализован терминал, по которому можно отслеживать передачу массива данных (рис. 18).

Рисунок 18 — Данные об инициализации, выведенные на терминал

Подводя итоги представленного исследования, можно заключить, что применение указанной концепции экзоскелета позволит существенно повысить эффективность устройств такого рода. К сожалению, некоторые эффекты и особенности использования миографических сенсоров пока еще не были учтены. К ним можно отнести, например, постепенное смещение датчика относительно своего начального положения вследствие движения человека, что влияет на уровень сигнала. Кроме того, человеку свойственно потеть во время совершения движений, что также негативно сказывается на работе датчиков. Также необходимо отметить, что при построении математической модели системы был проделан ряд упрощений, который позволил получить достаточно несложные конечные уравнения управляемого движения. Однако в реальности движение человека не всегда представляет собой простую ходьбу, поэтому как задел на будущее было бы интересно рассмотреть случаи движения по наклонной поверхности, движение на подъем-спуск по лестнице, движение при смене положения стоя на положение в приседе и лежа. Наконец, немало конструктивных решений в прототипе устройства были ошибочными, и их тоже следует пересмотреть в будущем и по возможности внести изменения. Это относится к выбору материалов, геометрии шарнирных узлов, а также выбору электроприводов. Помимо этого, следует перейти на более мощное вычислительное средство, которое позволит ускорить расчеты. В завершение необходимо также подчеркнуть, что представленная работа обладает многогранным характером, гармонично сочетая в своей структуре целый ряд дисциплин: ро-

бототехнику, аналитическую механику, теорию управления, биомеханику, электротехнику, материаловедение, программирование и многие другие.

Литература

1. Смирнов А.С., Смольников Б.А. Управление резонансными колебаниями нелинейных механических систем на основе принципов биодинамики // Машиностроение и инженерное образование. 2017. № 4 (53). С. 11-19.

2. Смольников Б.А., Юревич Е.И. К проблеме биоморфного управления движениями роботов // Робототехника и техническая кибернетика. 2015. № 1 (6). С. 17-20.

3. Колесникова Г.П., Формальский А.М. Об одном способе моделирования походки человека // Инженерный журнал: Наука и инновации. 2014. № 1 (25). С. 1-8.

4. Чигарев А.В., Борисов А.В. Моделирование управляемого движения двуногого антропоморфного механизма // Российский журнал биомеханики. 2011. Т. 15. № 1. С. 74-88.

5. Борина А.П., Терешин В.А. Устойчивость алгоритмов ходьбы // Современное машиностроение: наука и образование. MMESE-2016: материалы 5-й Международной научно-практической конференции, 30 июня – 1 июля 2016 года. Санкт-Петербург, 2016. С. 181-190.

6. Алексеев Р.А., Котельников Ю.П. Программное движение двуногого шагающего робота в сагиттальной плоскости // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2008. № 57. С. 46-55.

7. Алексеев Р.А., Котельников Ю.П. Формирование задающих воздействий, обеспечивающих движение двуногого шагающего робота в сагиттальной плоскости // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2009. Т. 52. № 11. С. 56-61.

8. Лавровский Э.К., Письменная Е.В. О регулярной ходьбе экзоскелетона нижних конечностей при дефиците управляющих воздействий // Российский журнал биомеханики. 2014. Т. 18. № 2. С. 208-225.

9. Лавровский Э.К., Письменная Е.В., Комаров П.А. О задаче организации ходьбы экзоскелетона нижних конечностей при помощи управления в коленных шарнирах // Российский журнал биомеханики. 2015. Т. 19. № 2. С. 158-176.

10. Лавровский Э.К., Письменная Е.В. Алгоритм управления, обеспечивающий задание произвольных траекторий экзоскелета нижних конечностей // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Сборник трудов. В 4-х т. 2019. Т. 1. С. 218-219.

11. Яцун А.С., Постольный А.А., Савельева Е.В., Никулин Я.С. Опыт применения промышленных экзоскелетов на горнодобывающих предприятиях // Труды 32-й Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». Санкт-Петербург, 2021. С. 245-250.

12. Верейкин А.А., Ковальчук А.К., Каргинов Л.А. Исследование динамики исполнительного механизма экзоскелета нижних конечностей с учетом реакций опорной поверхности // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 12. С. 128-136.

13. Гаврилов С.В., Занг Д.Т., Чан Д.Х. Особенности динамики экзоскелетов с вентильными двигателями с постоянными магнитами // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2017. № 5. С. 28-34.

14. Орлов И.А., Алисейчик А.П., Павловский В.Е., Платонов А.К., Замковой В.С., Подопросветов А.В. Экзоскелет нижних конечностей с гибридным электро-пневматическим приводом. Модели и управление // Робототехника и техническая кибернетика. 2015. № 3 (8). С. 16-21.

15. Формальский А.М. Управление движением неустойчивых объектов. М.: Физматлит, 2012. 232 с.

16. Смирнов А.С., Дегилевич Е.А. Колебания цепных систем. СПб.: Политех-пресс, 2021. 246 с.

17. Математические модели и компьютерное моделирование в биомеханике / под ред. А.В. Зинковского и В.А. Пальмова. СПб.: изд-во Политехн. ун-та, 2004. 516 с.

18. Барынкин И.С., Поспелов М.Э., Федин Д.В. Применение электромиограммы для управления электродвигателями роботов и экзоскелетов // Материалы заочной научной конференции. Военный учебный центр. Санкт-Петербург, 2021. С. 7-12.

19. Пивченко П.Г., Трушель Н.А. Анатомия опорно-двигательного аппарата. Минск: Новое знание, 2014. 271 с.

20. Ведясова О.А., Павленко С.И., Романова И.Д., Инюшкина Е.М. Физиология человека и животных. Самара: изд-во Самарского ун-та, 2021. 108 с.

21. Барынкин И.С., Смирнов А.С. Новая концепция экзоскелета нижних конечностей // Молодежь и наука: Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований. Материалы V Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Комсомольск-на-Амуре, 11-15 апреля 2022 г. 2022. Ч. 1. С. 8-10.

Д.Р. Хашев, Е.А. Лукьянов

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА АНАЛИЗА КУЛЬТИ ПАЦИЕНТА

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, marden9407@gmail.com, lukevgan@gmail.com

Аннотация

В статье рассматриваются существующие проблемы в области анализа культи пациента на этапе протезирования и создания культеприемной гильзы. Продемонстрированы результаты анализа положительных и отрицательных сторон решений в области исследования культи пациента. В работе представлено концептуальное решение устройства автоматизированного анализа верхней культи пациента «BioSculptor», позволяющее осуществлять комплексное исследование с дальнейшей возможностью конвертации параметров в 3D модель культиприемной гильзы, подобранной по антропометрическим характеристикам пациента. Рассмотрены математические методы построения 3D моделей, основанных на облаке точек, получаемых с устройства анализа культи пациента BioSculptor. Авторы повествуют о получении первичных данных в ходе эксперимента с использованием автоматизированного анализатора «Bio Sculptor» и сопутствующих сложностях при учете динамики движения культи пациента. Также в статье повествуется о проблемах в позиционировании мио-датчиков активных протезов с последующими вариантами решений.

Ключевые слова

Протезирование, культя, гильза, математическое моделирование, 3D моделирование, анализ состояния тканей, статические и динамические усилия движения мышц..

D.R. Khashev, E.A. Lykianov

DEVELOPMENT OF A DEVICE FOR ANALYSIS OF THE PATIENT'S UPPER LIMB STOP

Don State Technical University,Rostov-on-Don, Russia, marden9407@gmail.com, lukevgan@gmail.com

Abstract

The article deals with the existing problems in the field of analysis of the patient's stump at the stage of prosthetics and the creation of a stump sleeve. The results of the analysis of the positive and negative aspects of decisions in the field of examination of the patient's stump are demonstrated. The paper presents a conceptual solution for the device for automated analysis of the patient's upper stump "BioSculptor", which allows for a comprehensive study with the further possibility of converting parameters into a 3D model of a cult-receiving sleeve, selected according to the anthropometric characteristics of the patient. Mathematical methods for constructing 3D models based on a cloud of points obtained from the patient's stump analysis device BioSculptor are considered. The authors talk about obtaining primary data during the experiment using the Bio Sculptor automated analyzer and the associated difficulties in taking into account the dynamics of the patient's stump movement. The article also tells about the problems in positioning the myo-sensors of active prostheses with subsequent solutions.

Key words

Prosthetics, stump, sleeve, mathematical modeling, 3D modeling, analysis of the state of tissues, static and dynamic forces of muscle movement.

Рука человека – сложный орган, обладающий разнообразными типами движений и тонкими видами чувствительности. Являясь одним из основных органов труда, рука, как и кисть отличает человека от иных представителей животного мира. Кисть – орган осязания, выражения чувств, эмоции, а также

обороны и нападения. Потеря части или полностью руки ведет к утрате трудоспособности человека, его возможностей самообслуживания. Наряду с функциональным, появляется косметический дефект, тяжело отражаемый на психике больного.

Частота повреждений рук как в мирное, так и военное время чрезвычайно велика. По последним данным [2] на 2021 год травматологических пунктов число пострадавших с повреждениями кисти или руки на данный момент составляют около 40 тысяч человек в России.

Согласно данным Всемирной Организации Здравоохранения (ВОЗ) за 2019 год, в мире насчитывается 113 миллионов человек с ампутированными конечностями [7]. Если учесть, что невозможно подсчитать точное количество ампутантов в бедных и неразвитых странах (Африки, например), то их общемировое число может быть гораздо выше статистики ВОЗ. При этом, только 5% людей с ампутированными конечностями имеют доступ к адекватной помощи в области протезирования. В целом, существует две основные причины, вызывающие необходимость хирургического удаления конечности:

– Травматическое повреждение до такой степени, что конечность невозможно спасти, например, при автомобильных авариях или падениях;

– Заболевание периферических сосудов, например, в результате диабета или сердечно-сосудистой дисфункции.

Поэтому для того чтобы возобновить функции утерянной конечности прибегают к помощи протеза. Протез состоит из гильзы, которая окружает культю, протезной руки или ноги и устройства для соединения и регулировки положения гильзы относительно протезной части. В клинической практике признано, что правильное проектирование формы гильзы имеет решающее значение для успешного клинического функционирования протеза. Значительная часть усилий протезиста уходит на проектирование и изготовление гильзы протеза. Поэтому для снижения затрат и увеличения качества культеприёмной гильзы было разработано устройство – автоматизированный анализатор [1]. Одной из возможностей данного устройства сканировать форму культи и передача этих данных в виде облака точек, по которым создается 3д модель культи пациента, что дает информацию для построения гильзы.

Гильза сложный объект, какие нюансы появляются при построении протеза.

В связи с широтой учитываемых особенностей и важностью воссоздать утерянную конечность с максимальными антропометрическими характеристиками, возможен только индивидуальный подход к проектированию протезов. Он может обеспечить наилучшие результаты, комфорт и функциональность использования протеза.

На этапе проектирования гильзы протеза определяется качество протеза в смысле «удобства использования и возможностей», т.к. именно соприкосновение гильзы и тканей культи определяет «комфортность» или наличие болевых ощущений при выполнении движений (действий) рукой с протезом.

Движения руки с протезом совершаемые человеком при его обыденной жизни или в производственных условиях (если человек работает) сопровождаются динамическими и иными усилиями. Эти усилия передаются от протеза через гильзу и ее поверхности к участкам тела культи, которыми эти усилия и воспринимаются. Таким образом, для разработки методов качественного проектирования гильзы протеза необходимо ответить на ряд вопросов:

– Какова величина и направление действия сил, возникающих при выполнении «типовых» действий и движений, можно выделить по типам - «бытовые», «спортивные», «производственные»?

– Каким наилучшим образом эти усилия могут быть «восприняты» кожным покровом, мышцами руки человека (культя)?

– В каких местах гильзы и, каким образом должны быть реализованы «зоны силового взаимодействия» гильзы и руки?

Статья рассматривает математические методы анализа взаимодействия культи и гильзы с последующими ответами на выше поднятые вопросы. Данная работа положена в основу разработки анализа культи пациента.

Этапность проектирования с ссылками на предыдущие работы

В ранее опубликованных трудах [4,5,6], было представлено техническое решения поднятой проблемы, а именно создание устройства автоматизированного анализа культи пациента. Однако в ходе работы над исследованием культи выяснилась целесообразность построения цифрового двойника культи пациента на основе полученного облака точек.

В ходе поиска решения рассмотрено применение высокоразвитых САПР, методов обратного 3D проектирования, лазерного сканирования, фотограмметрического и контактного 3d-сканерирования.

Обычно гильза разрабатывается с помощью традиционного процесса литья, но данный подход является трудоёмким и время-затратным мероприятием. Однако CAD/CAM системы и 3Д-печать могут поднять процесс изготовления гильзы на новый уровень, увеличив скорость и добротность изготовления, а также повысить качество жизни людей с ампутированными конечностями [1].

Из рассмотренных САПР в [7] можно отметить следующий ряд программ: SolidWorks, Unigraphics NX, Autodesk Invertor, CATIA, T-FLEX. На основе проведенного опроса среди 20 компаний в протезной промышленности, использующих САПР, было выяснено, что предпочтение уделяется SolidWorks -72,5%, Autodesk Invertor -21,5%, а 6% - прочее программное обеспечение, не получившие широкого распространения.

Рассмотрим подробнее метод обратного проектирования с использованием SolidWorks. Такой метод представляет собой процесс разработки 3D объекта на основе реального, либо двухмерного изображения. Метод обратного проектирования позволяет ускорить разработку макета, обходя процессы прорисовки деталей и компонент с нуля, являясь одним из эффективных способов математического описания объекта и проектирования его физических процессов. Однако чаще всего такой метод основывается на получении данных из специальных инструментов, таких как лазерные, фотограмметрические и контактные сканеры.

Для снижения затрат и увеличения качества культеприёмной гильзы было разработано устройство – автоматизированный анализатор [8], (см. рис. 1). Одной из возможностей данного устройства сканировать форму культи и передача этих данных в виде облака точек, по которым создается 3D модель культи пациента, что дает информацию для построения гильзы.

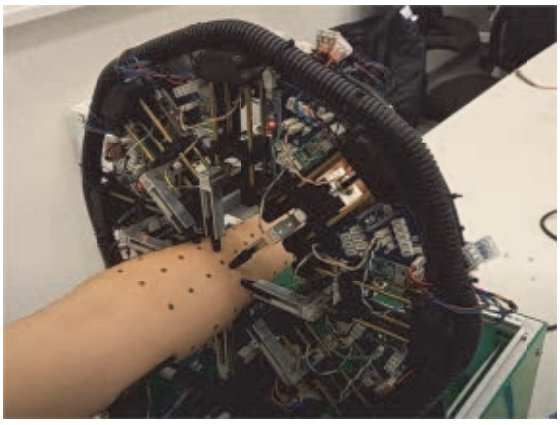


Рисунок 1 — Автоматизированный анализатор культи пациента

Устройство автоматизированного анализа культи пациента «BioSculptor» устроено по принципу контактных сканеров. Основным преимуществом данного метода является возможность измерения не только поверхности, но и физическое состояние каждой точки исследуемой культи. Однако количество точек, получаемых при анализе, меньше, чем во время лазерного сканирования. Такая разность заставляет обратиться к поиску математических методов интерполяции кривых.

Анализ силового взаимодействия культи и гильзы

Каждый человек, вынужденный пользоваться протезом, могут сталкиваться с проблемами нарушения структуры кожи из-за механического раздражения гильзой протеза. Причинами этого являются нагрузки и длительное время их приложения при постоянном ношении протеза. Поэтому задача состоит в том, чтобы создать гильзу, которая распределяла бы нагрузку так, чтобы протез был стабильно соединен с костным скелетом, но при этом не перегружал мягкие ткани. В тоже время кожа на руке не предназначена для того, чтобы продолжительное время воспринимать нагрузки. Поэтому чтобы создать эффективную гильзу, нужно учитывать эти противоречивые моменты в проектирования и добиться эффективного распределения напряжения между культей и гильзой. Используя традиционные методы проектирования гильз, необходимо концентрироваться на зонах, устойчивых к нагрузкам. Высокая нагрузка культю признается неблагоприятной, поскольку она травмирует мягкие ткани и может привести к необходимости хирургической ревизии или к дальнейшей ампутации. Рассмотрим виды силового взаимодействия, возникающего в зоне гильза-культя:

- Силы, направленные перпендикулярно поверхности кожи, создающие удельное давление;
- Силы, направленные по касательной к поверхности кожи, определяющие напряжения сдвига.

И тот, и другой вид нагрузки обеспечивает поддержку культи в культеприемной гильзе, но при превышении определенного уровня и продолжительности нагрузок может привести к разрушительному воздействию на ткани культи. В частности, постоянное давление снижает перфузию и может привести к ишемии и некрозу тканей [9]. Достаточно давления в 8 кПа, чтобы перекрыть кожный кровоток. Часто в условиях статической нагрузки мышечная ткань повреждается быстрее, чем кожа [10], из-за ее большей сосудистости и метаболических потребностей.

Таким образом, необходимо исследовать процессы формирования сил и реакций в опорных зонах взаимодействия гильзы и культи с целью определения векторов сил, их изменения при выполнении типовых действий и движений.

Моделирование взаимодействия культи и гильзы

Исследовать лучше всего с использованием математической модели культи и гильзы. Модель может быть построена с использованием различных программных продуктов – Matlab [11] и CoppeliaSim [11].

Желательно при моделировании обеспечить не только получение численных результатов об исследуемой динамике, но и иметь возможность визуализации происходящих процессов.

Целью моделирования является получение нагрузок, возникающие в точках соприкосновения гильзы и культи при движениях, совершаемых рукой с протезом. Определим основные требования к моделированию и допущения и ограничения, принимаемые нами.

Требования:

- моделироваться должны движения руки человека при ее типовых (характерных) движениях, в том числе инерциальные нагрузки;
- моделироваться должны силы, возникающие между гильзой и культей при движении руки;

Допущения:

- силовые взаимодействия гильзы и культи происходят в некоторых зонах «в начале» и «конце» культеприемной гильзы;
- характер сложного распределения сил в кожном слое и мышечном слое не учитывается;
- при построении модели будем считать, что в зонах силового взаимодействия суммарный вектор сил компенсируется соответствующими реакциями (без учета напряжений тканей, обусловленных сдвигом).

Для понимания влияние гильзы на руку человека было принято решение создать модель руки человека (см. рис. 2) и модель культеприемной гильзы в среде Cappella Sim и изучить изменения упруго диссипативных сил, возникающие между рукой и гильзой.

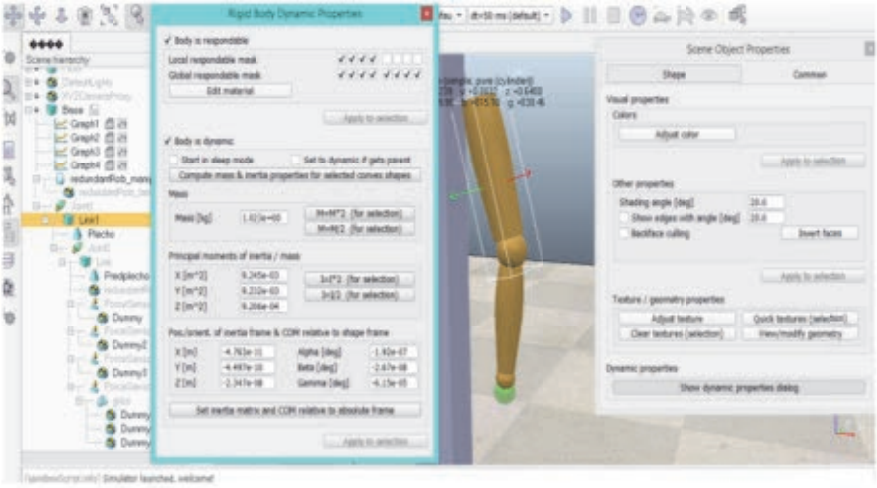


Рисунок 2 — Модель руки человека

Данные сил, действующие на руку будем брать с четырех точек на которые установим датчики силы (см. рис. 3). Ниже представлена таблица параметров гильзы и руки показаны заданный как начальные показатели (см. табл. 1).

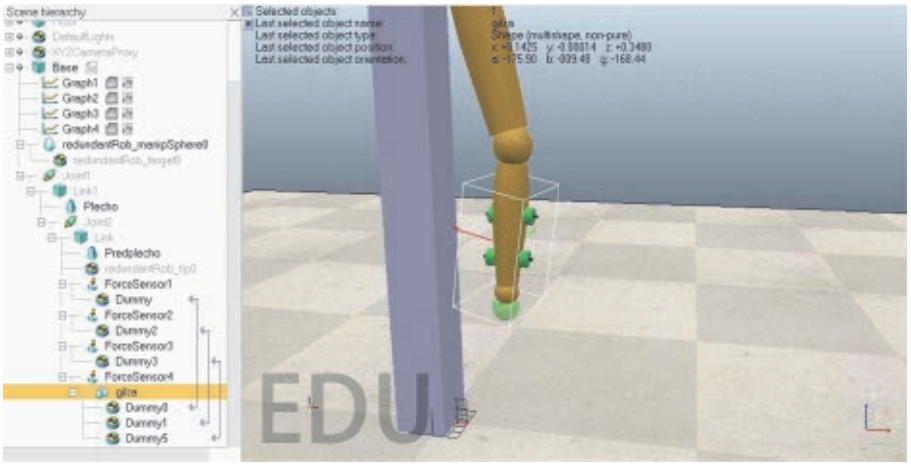


Рисунок 3 — Установка датчиков

Таблица 1 — Параметры гильзы и предплечья

Название объектов	**Параметры объектов**				
	Плотность объекта кг/м^3	**Масса объекта кг**	**Момент инерции по X кг/м^2**	**Момент инерции по Y кг/м^2**	**Момент инерции по Z кг/м^2**
Гильза	500	0,334	0,004868	0,002871	0,004359
Предплечье	1030	0,863	0,005438	0,005431	0,005055
Плечо	1030	1,230	0,009245	0,009232	0,009206

Далее перенесем модель культеприемной гильзы из CAD системы в CoppeliaSim (см. рис. 4А). Для корректности моделирования модель гильзы необходимо упростить (см. рис.4Б).

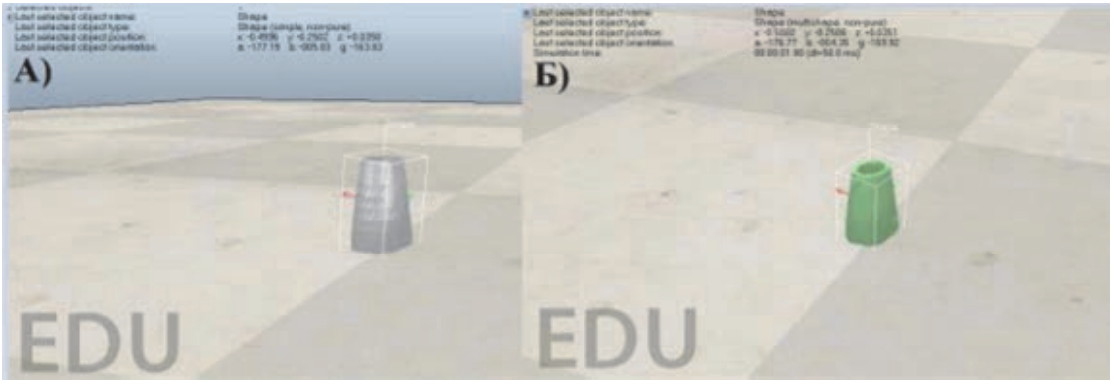


Рисунок 4 — Модель руки человека: А) – гильза импортированная; Б) – гильза упрощенная

На датчики устанавливаем гильзу (см. рис. 5) для проведения исследования возникающих упруго диссипативных сил между рукой и гильзой.

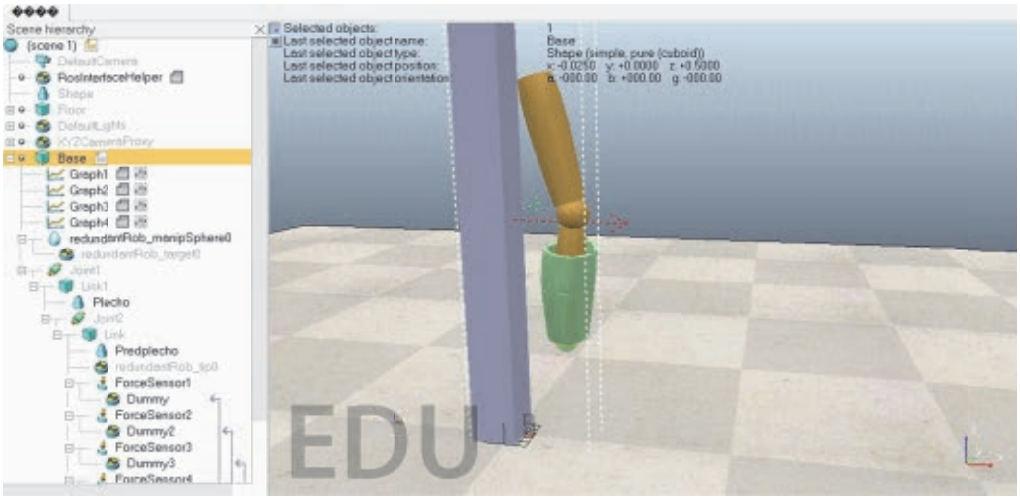


Рисунок 5 — Модель руки совмещенная с гильзой

В реальных условиях культеприемная гильза соприкасается с культей почти по всей области культи, но в условиях моделирования в среде CoppeliaSim такое сделать невозможно, так как роль точек касания играют датчики силы. Также имеет ограничение и программное обеспечение CoppeliaSim, поэтому из всего вышесказанного сформулируем ряд ограничений:

- Ограничение в соприкосновении между гильзой и культей;
- Тело гильзы абсолютно твердое и изотропное;
- Тело культи абсолютно твердое и изотропное;
- Гильза - это полый цилиндр.

Для проведения исследований была разработана модель (см. рис. 6).

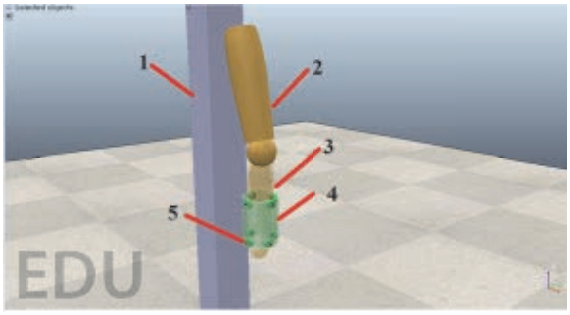


Рисунок 6 — Модели культи и гильзы: 1 - Опора; 2 - Модель плеча; 3 - Модель предплечья(культя); 4 - Модель гильзы; 5 - Датчики силы

Размеры элементов модели приняты следующие: длина плеча – 32,5 см, длина предплечья – 24,5 см, что определяется антропометрическими соотношениями для взрослого мужчины среднего возраста, длина гильзы – 1,7 см, а её масса 1,5 кг.

Для определения сил, действующих в зонах контакта гильзы и руки - установлено 8 датчиков на двух концах культеприёмной гильзы. А с помощью встроенной функцией – «Path» в CoppeliaSim, построим простые траектории движения, взятые из повседневной жизни человека. Для проверки адекватности модели были проведены тестовые проверки, при которых движения выполнялись с заданными параметрами и силы взаимодействия могут быть вычислены аналитически. Далее, проведем эксперимент – зафиксируем гильзу на культе на восемь датчиков, и получим следующие результаты (см. рис. 7). Траектория движения руки идет из движения подъема руки перед собой.

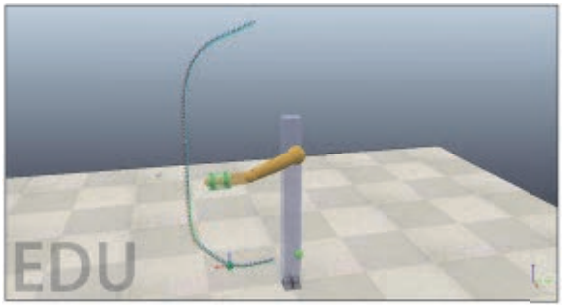


Рисунок 7 — Моделирование движение культи при поднятии руки перед собой

Для моделирования обобщенных векторов была написана программа в Matlab.В результате моделирования в CoppeliaSim были полученные данные с датчиков, каждый датчик регистрирует силу по трем осям координат, это данные можно преобразовать в вектор. Полученный вектора датчиков преобразуются в один общий (см. рис. 8), где синим цветом выражен общий вектор силы для нижней части гильзы, красным цветом – общий вектор силы для верхней части гильзы, а длина вектора показывает величину силы обобщенных векторов соответственно.

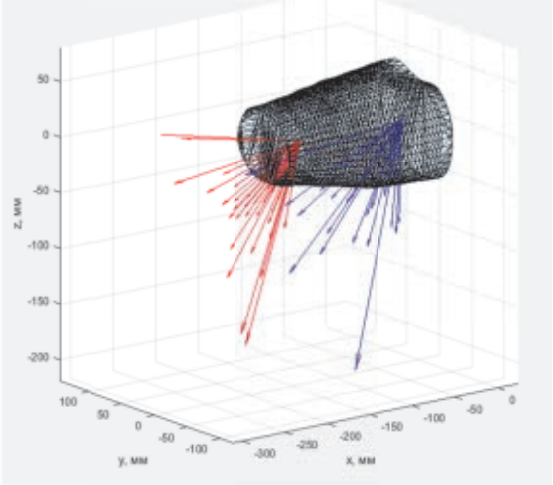


Рисунок 8 — Расположение векторов при движении при поднятии руки

Рассмотрим моделирование движения руки с протезом по траектории движения – сгибание руки в предплечье (см. рис. 9).

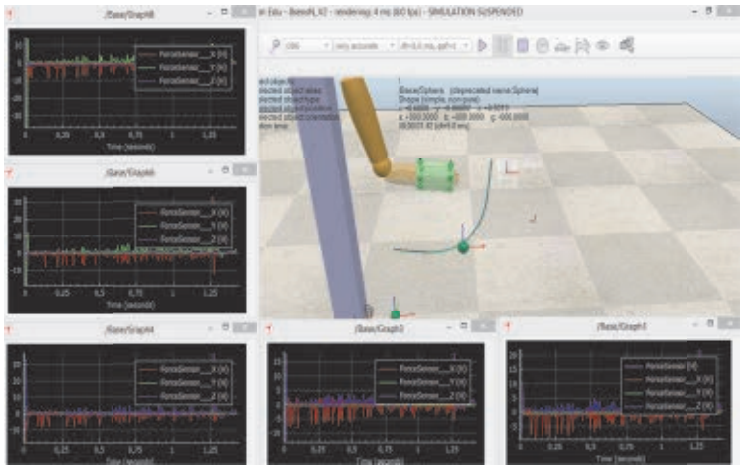


Рисунок 9 — Моделирование движение культи при сгибании локтя

Рассмотрим движения векторов силы при этом движении (см. рис. 10).

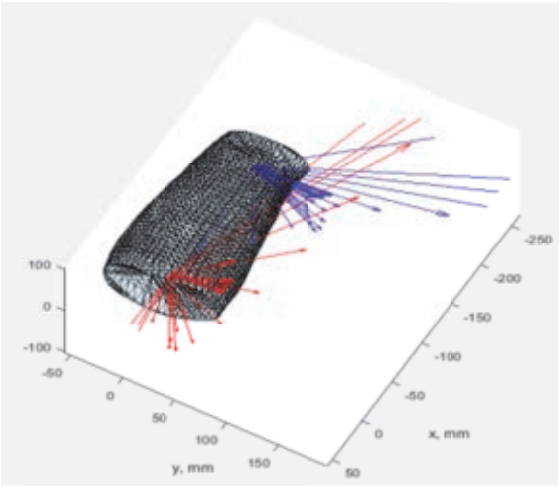


Рисунок 10 — Расположение векторов при сгибании локтя

Были смоделированы движения руки с гильзой по траекториям: поднятие руки перед собой, сгибание руки в локте. В результате моделирования были получены данные с датчиков сил, эти данные преобразованы в вектора., по которым можно определить характер движения вектора силы, и его значение. Затем воспроизводим симуляцию движения руки по траектории из положения опущенной руки в положения поднятой руки. Во время движения предплечье сгибается в локтевом суставе имитируя реалистичность движения. Во время движения снимаем данные полученные с датчиков (см. рис. 11).

Рисунок 11 — Получение данных из симуляции

В данной главе была продемонстрирована методика создания модели руки и модели гильзы в CoppeliaSim. Также была произведена симуляция движения, в результате чего были получены данные с датчиков силы, которые были установлены на руке. Эти данные будут необходимы при описании математической модели гильзы и ампутированной конечности (руки).

Практические результаты работы заключаются в разработке программных инструментов для создания культеприёмной гильзы на основе персонифицированных данных, полученных с анализатора «BioSculptor». Данные инструменты дают возможность проектировать 3Д модель культи и на основе этой модели получать в САПР 3Д модель культеприёмной гильзы. Это позволяет осуществлять проектирование квази-пассивный гильзы. Моделирование различных движений руки человека (плечо-культя-гильза-протез), что дает возможность анализировать силовые взаимодействия в зонах контакта гильза-культя и, при необходимости, корректировать структуру или параметры квази-пассивной культеприемной гильзы.

Разработанная модель и ПО позволяют воссоздать движения культи с протезом с последующим получением параметров силы при движении по траектории. Полученные параметры обрабатываются в Matlab в общие вектора силы (в данном случае для датчиков верхней нижней частей гильзы), которые показывают в динамике: изменение векторов в пространстве, и их значение. Эти данные можно будет использовать для понимания каким наилучшим образом эти усилия могут быть восприняты культей, а также для выявления зон с наибольшими нагрузками с последующей минимизацией отрицательных воздействий на культю.

Литература

1. Arthur Josep Petron (2016) Prosthetic Socket Designer.

2. Сайт клинической больницы ГКБ №71 – Отделение функциональной диагностики – МРТ, КТ http://gb.ru/pages/mrt-i-kt/

3. Учебное пособие. Передача винт–гайка. http://nizrp.narod.ru/metod/kokmisap/12.pdf

4. Хашев Д.Р., Система исследования эмг-сигналов культи верхних ко-нечностей пациента как сред-ство для упрощения и оптимизации процесса проектирования гильз биоэлектрических протезов (науч. статья) Научный электронный журнал Меридиан [Электронный ресурс] / Хашев Д.Р., Лысенко А.Ф., Чубарьян С.С.,: политемат. сетевой элек-трон. журн. / ИП Осени-на Ирина Леонтьевна – Якутск, 2020. - №1 (35). – Режим доступа: http://meridian-journal.ru/site/article?id=2424&pdf=1

5. Хашев Д.Р., Разработка системы анализа культи пациента и построения 3d модели с использование метода конечных элементов для последующего усовершенствования культеприёмной гильзы (науч. статья) Научный электронный журнал Меридиан [Электронный ресурс] / Хашев Д.Р., Лысенко А.Ф., Бабичев-Ганага А.Д.,: политемат. сетевой элек-трон. журн. / ИП Осени-на Ирина Леонтьевна – Якутск, 2020. - №1 (35). – Режим доступа: http://meridian-journal.ru/site/article?id=2751&pdf=1

6. Лысенко, А.Ф. Разработка системы анализа культи пациента и построения 3d модели с использование метода конечных элементов для последующего усовершенствования культеприёмной гильзы / А.Ф. Лысенко, Д.Р. Хашев, А.Д. Бабичев - Ганага // МЕРИДИАН. – 2020. – . – № 3. – С. 435-437.4.

7. Протезирование конечностей при ампутации. Варианты крепления протеза к культе // Русский медицинский сервер [Электронный ресурс] URL:http://www.rusmedserv.com/prostheticsextremities/prosthetics-upper-extremities-depending-ablation-level/

8. iMedicalApps [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.imedicalapps.com/2017/08/3d-printing-prosthetics-study/

9. Saba Afzal. Skin problems of amputee using lower limb prosthesis / Saba Afzal, Bazal Bukhari, Muhhamad Waqas, Adnan Minur // Rawal Medical Journal. – 2019. – Vol. 41, – Issue 1 – P. 61-63.

10. Alberto Esquenazi et al. Unilateral upper-limb loss: Satisfaction andprosthetic-device use in veterans and servicemembers from Vietnam and OIF/OEFconflicts // Journal of Prosthetics and Orthotics. – 2010. – Vol. 47. – Number 4. – P.299-316.

11. Erwin C. Baars. Prosthesis satisfaction in lower limb amputees: A systematicreview of associated factors and questionnaires / Erwin C. Baars, Ernst Schrier, Pieter U. Dijkstra, Jan H.B. Geertzen // Medicine. – Vol. 97. – Issue 39. – e12296.

А.В. Синегуб[1], А.В. Лопота[2]

КИБЕРПРОТЕЗИРОВАНИЕ. ИНТЕГРАЦИЯ ПРОТЕЗА В ТЕЛО ЧЕЛОВЕКА

[1]СПбПУ, Санкт-Петербург, [2] ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург, a.sinegub@yandex.ru, rtc@rtc.ru

Аннотация

Восстановление утраченных функций посредством протезирования - актуальное направление, позволяющее возвращать возможность самостоятельно передвигаться и обслуживать себя пациентам в состоянии ампутации.

Главной проблемой современного протезостроения остается отсутствие прочного механического соединения протеза с опорно-двигательной системой пациента и эффективной прямой и обратной биологической связи с нервной системой, обеспечивающей сложное управление мехатронными протезами.

Будущее в протезостроении за киберпротезированием, где киберпротез – мехатронный протез, интегрированный в опорно-двигательный аппарат и соединенный с нервной системой человека. Такой протез теоретически может полностью восполнить функции утраченной конечности, и даже усовершенствовать.

Киберпротез состоит из трех частей: мехатронного протеза; системы управления, связанной с нейромышечной системой; остеоинтеграционной системы.

Целью данной статьи является описание подходов и опыта в разработке остеоинтеграционной системы протеза бедра, авторским коллективом.

Ключевые слова

Протезирование, фиксация протезов, чрескожное протезирование, прямая костная фиксация, реабилитация, имплант, протез нижних конечностей, эндопротез, внутрикостное протезирование.

A.V. Sinegub[1], A.V. Lopota[2]

CYBERPROSTHETICS. INTEGRATION OF THE PROSTHESIS INTO THE HUMAN BODY

[1]SPbSPU, Saint-Petersburg, Russia, a.sinegub@yandex.ru; [2]Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, St. Petersburg, Russia, rtc@rtc.ru

Abstract

Restoration of lost functions through prosthetics is an actual direction that allows returning the ability to move independently and serve themselves to patients in a state of amputation.

The main problem of modern prosthetics is the lack of a strong mechanical connection of the prosthesis with the patient's musculoskeletal system and an effective direct and feedback biological connection with the nervous system, which provides complex control of mechatronic prostheses.

The future in prosthetics lies with cyberprosthetics, where a cyberprosthesis is a mechatronic prosthesis integrated into the musculoskeletal system and connected to the human nervous system. Such a prosthesis can theoretically fully replenish the functions of a lost limb, and even improve it.

The cyber prosthesis consists of three parts: a mechatronic prosthesis; control system associated with the neuromuscular system; osseointegration system.

The purpose of this article is to describe the approaches and experience in the development of an osseointegration system for a hip prosthesis by a team of authors.

Key words

PROSTHETICS, prosthesis fixation, percutaneous prosthetics, direct bone fixation, rehabilitation, implant, lower limb prosthesis, endoprosthesis, intraosseous prosthetics.

Восстановление утраченных функций посредством протезирования - актуальное направление, позволяющее возвращать возможность самостоятельно передвигаться и обслуживать себя пациентам в состоянии ампутации. В настоящее время в развитых странах 1 из 150 человек живет с ампутацией. Вследствие увеличения продолжительности жизни к 2050 году общее количество людей с ампутациями удвоится [1]. От степени восполнения утраченных функций зависит то, как успешно человек вернется в рабочую и социальную жизнь. Современные протезы ног не позволяют полностью восстановить утраченные функции, так как являются несовершенными. С приходом современных технологий появились мехатронные протезы с системой управления, основанной на электромиографических сигналах с поверхностных, накожных электродов. Однако главной проблемой современного протезостроения остается отсутствие прочного механического соединения протеза с опорно-двигательной системой пациента и эффективной прямой и обратной биологической связи с нервной системой, обеспечивающей сложное управление мехатронными протезами.

Следующим шагом в протезостроении является киберпротезирование, где киберпротез – мехатронный протез, интегрированный в опорно-двигательный аппарат и соединенный с нервной системой человека. Такой протез теоретически может полностью восполнить функции утраченной конечности, и даже усовершенствовать [2].

Киберпротез состоит из трех частей: мехатронного протеза; системы управления, связанной с нейромышечной системой; остеоинтеоинтеграционной системы.

Мехатронный протез – изделие, выполняющее функцию утраченной конечности, имеющее активные привода, обеспечивающие локомоции.

Система управления, связанная с нейромышечной системой, – система, состоящая из электродов, имплантируемых в мышцы и нервную систему; блока обработки и передачи сигналов, предназначенных для двунаправленного управления мехатронным протезом.

Остеоинтеграционная система – система имплантатов, имплантируемая хирургическим путем в опорно-двигательный аппарат человека, позволяющая создать прочную механическую связь между человеком и мехатронным протезом и обеспечить соединение имплантированных электродов системы управления и мехатронного протеза.

Целью данной статьи является описание подходов и опыта в разработке остеоинтеграционной системы протеза бедра, авторским коллективом.

Экзопротезирование конечностей при помощи остеоинтеграции - относительно новая технология, набирающая популярность [3]. Ее основная идея заключается в закреплении мехатронного протеза при помощи имплантата, имплантированного в остаточные кости культи и выходящего из тела пациента наружу (рис. 1).

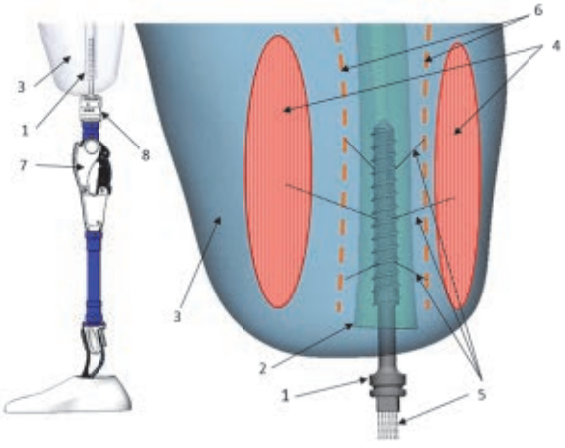


Рисунок 1 — Остеоинтеграционная система протеза бедра: 1 – эндочасть; 2 – бедренная кость; 3 – культя; 4 – мышцы; 5 – электроды нейромышечной системы управления, имплантированные в мышцы и нервы; 6 – нервные волокна; 7 – экзопротез; 8 – переходник

Такой метод крепления протеза в тело человека является альтернативой культеприемной гильзы и в отличии от нее обеспечивает:

– правильное биомеханическое восстановление опороспособности, благодаря передаче нагрузок от протеза к телу человека через кости, а не через мягкие ткани;

– восстановление эффекта проприоцепции за счет передачи нагрузок через кости;

– отсутствие распространенных кожных осложнений, возникающих при трении культеприемной гильзы и культи при ходьбе [4-7].

Также имплантат позволяет создать стабильное перманентное отверстие в тело пациента, через которое электроды системы управления, имплантированные в мышцы и нервную систему, могут быть связаны с мехатронным протезом.

Структурно остеоинтеграционная система экзопротезирования бедра состоит из двух частей: эндочасти и переходника.

Эндочасть – система имплантов, имплантируемая в остаточные кости культи, и выходящая чрескожно наружу из тела человека. Через 3-6 месяцев после имплантации эндочасть остеоинтегрируется в кость, тем самым образуя прочную механическую связь и создавая опорную базу для присоединения протеза [8]. Эндочасть состоит из двух компонентов, соединенных резьбой: внутрикостного имплантата и абатмента (рис. 2).

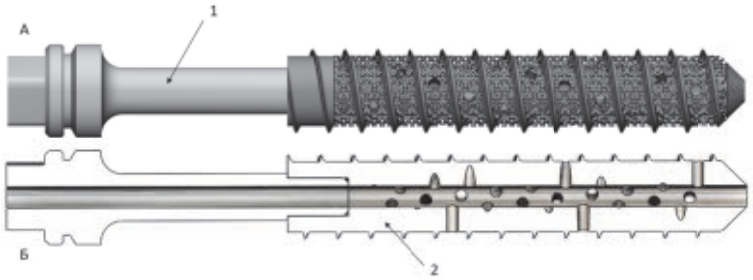


Рисунок 2 — Эндочасть. А – вид на имплантат; Б – разрез имплантата, ячеистая структура показана условно; 1 – абатмент; 2 – внутрикостный имплантат

Внутрикостный имплантат предназначен для имплантации во внутренний канал кости культи, который в последующем будет остеоинтегрироваться. Имплантат имеет специализированное пористое покрытие для увеличения площади поверхности остеоинтеграции, что позволяет снижать напряжение в разделе кости и имплантата.

Абатмент, выходящий из тела наружу, предназначен для соединения внутрикостного имплантата с экзопротезом. Зона выхода абатмена наружу подвержена инфицированию. В связи с этим на внешней поверхности абатмента, в местах контакта с мягкими тканями наносится полированное антимикробное покрытие, предотвращающее инфицирование и механическое раздражение мягких тканей от трения о него.

Прямое соединение имплантата с внешним протезом несет большие риски появления осложнений, таких как: биомеханическая нестабильность имплантата, возникающая вследствие циклических ударных нагрузок при ходьбе, ввиду того, что демпферные системы стандартных протезов предназначены для использования совместно с культеприемной гильзой, а не с имплантатом, интегрированным в кость; перипротезные переломы за счет того, что материал имплантата титан и кость культи имеют значительную разницу в физико-механических свойствах. Эти осложнения могут приводить к удалению всей системы и укорочению культи. Поэтому для соединения имплантата и протеза необходимо использовать переходники, предохраняющие от чрезмерных нагрузок и обеспечивающие дополнительное демпфирование ударных циклических нагрузок при ходьбе.

Переходник – устройство, предназначенное для соединения экзопротеза и остеоинтеграционного имплантата, позволяющее снимать/одевать протез, защищать от чрезмерных ударных и циклических нагрузок при ходьбе.

Структурно переходник остеоинтеграционной системы экзопротезирования бедра (рис. 3) состоит из 6 функциональных частей:

− пружинный механизм крепления абатмента, предназначенного для фиксации внутрикостного имплантата в переходнике (рис. 3, А);

− узлов предохранения от чрезмерного момента и изгиба, представляющих собой цилиндрические шарниры с пружинным пороговым упором, движения в котором возможны только при заданной нагрузке (рис. 3, В, Г, Д);

− узла демпфирования циклических нагрузок, возникающих при ходьбе, образованного волнистой пружиной;

− узла юстировки угла крепления экзопротеза, обеспечивающего параллельность стоп здоровой ноги и протеза;

− пирамидального адаптера экзопротеза для крепления серийного экзопротеза к переходнику.

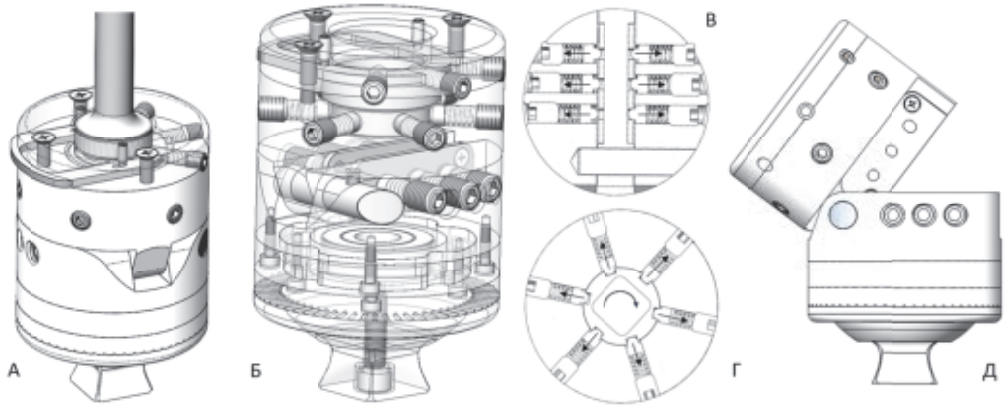


Рисунок 3 — Переходник. А – вид на переходник с прозрачным пружинным механизмом крепления абатмента, с установленным в него имплантатом; Б – прозрачный вид на переходник; В – разрез механизма предохранения от изгибающих нагрузок; Г – разрез механизма предохранения от вращающих нагрузок; Д – работа механизма предохранения от изгибающих нагрузок

Механизмы предотвращения от чрезмерных нагрузок представляют из себя цилиндрические шарниры с порогом срабатывания и состоят из упоров, блокирующих движение шарнира при нормальных нагрузках, пружин и установочных винтов.

Для обеспечения настройки порога срабатывания механизмов, в зависимости от веса пациента и его уровня активности, регулируют сжатие пружин путем вкручивания установочных винтов. При вкручивании винтов пружины все более сжимаются, повышая порог срабатывания системы.

После регулировки порога срабатывания проводят серию тестов для определения нормальной работы устройства. Механизмы не должны срабатывать при нормальной физической активности пациента.

В экстремальных случаях при нагрузках выше установленного порога пружинам не хватает усилия прижима упоров для блокирования движения в шарнире. Вследствие этого упоры раздвигаются, сжимая пружины, цилиндрический шарнир приходит в движение, тем самым предотвращая возникновение чрезмерных нагрузок. Для проверки работоспособности системы был изготовлен прототип остеоинтеграционной системы протезирования бедра (рис. 4).

Эндочасть была изготовлена посредством 3D-печати по технологии SLM и токарно-фрезерной обработки на режущих станках.

SLM или Selective laser melting — инновационная технология производства сложных изделий посредством лазерного плавления металлического порошка по математическим CAD-моделям (3D-печать металлом). Остеоинтегрируемый винт был изготовлен на Concept Laser M2 методом послойного сплавления порошка Ti6Al4V, затем он был подвергнут термической, пескоструйной и механической обработке.

Прототип переходника был изготовлен из стали и фотополимерного пластика. Детали, обеспечивающие защиту от чрезмерных нагрузок, выполнены из высокоуглеродистой стали для обеспечения мак-

симально жесткого контакта между ними. Корпусные детали были выполнены из фотополимера посредством 3D-печати по технологии SLA, в сторонней организации «ИП Москвичев». Металлические детали были изготовлены в организации ООО «ЦТО Техноспарк». Лазерная стереолитография (SLA) — технология 3D-печати, основанная на послойном отверждении жидкого полимерного материала под действием луча лазера.

Рисунок 4 — Прототип остеоинтеграционной системы протеза бедра

Экзопротезирование конечностей при помощи остеоинтеграции известно во всем мире уже более 30 лет, но в России нет ни одной зарегистрированной системы. Создание базовой технологии остеоинтеграционной системы протеза позволит сделать шаг в направлении киберпротезирования.

Авторским коллективом создан прототип системы остеоинтеграционной системы протеза бедра. Также в рамках проекта разработаны: методика сегментирования исходных данных для планирования операции; методика кастомизации эндочасти остеоинтеграционной системы экзопротезирования бедра под конкретного пациента; проведены поверочные конечно-элементные расчеты системы; методика персонифицированного конечно-элементного анализа системы имплант-кость; хирургические инструменты; методика имплантации и реабилитации пациента; показания и противопоказания к применению; методика ухода за культей.

Следующим шагом в работе будут являться доработка прототипа и изготовление опытного образца, проведение натурных испытаний на стенде и выход на клиническую апробацию.

Работа выполнялась при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90091.

Литература

1. Ziegler-Graham K. et al. Estimating the prevalence of limb loss in the United States: 2005 to 2050 //Archives of physical medicine and rehabilitation. – 2008. – Т. 89. – №. 3. – С. 422-429.

2. Ortiz-Catalan M., Håkansson B., Brånemark R. An osseointegrated human-machine gateway for long-term sensory feedback and motor control of artificial limbs //Science translational medicine. – 2014. – Т. 6. – №. 257. – С. 257-257.

3. Thesleff A. et al. Biomechanical characterisation of bone-anchored implant systems for amputation limb prostheses: a systematic review //Annals of biomedical engineering. – 2018. – Т. 46. – №. 3. – С. 377-391.

4. Li Y., Felländer-Tsai L. The bone anchored prostheses for amputees–Historical development, current status, and future aspects //Biomaterials. – 2021. – Т. 273. – С. 120836.

5. Overmann A. L. et al. Orthopaedic osseointegration: Implantology and future directions //Journal of Orthopaedic Research®. – 2020. – Т. 38. – №. 7. – С. 1445-1454.

6. Pitkin M. Design features of implants for direct skeletal attachment of limb prostheses //Journal of biomedical materials research Part A. – 2013. – Т. 101. – №. 11. – С. 3339-3348.

7. Thesleff A. et al. Biomechanical characterisation of bone-anchored implant systems for amputation limb prostheses: a systematic review //Annals of biomedical engineering. – 2018. – Т. 46. – №. 3. – С. 377-391.

8. Brånemark R. et al. A novel osseointegrated percutaneous prosthetic system for the treatment of patients with transfemoral amputation: A prospective study of 51 patients //The bone & joint journal. – 2014. – Т. 96. – №. 1. – С. 106-113.

А.С. Перхов, Р.С. Зверев, Т.О. Козлова, М.Л. Литвак

ЛУНА-27. ГРУНТОЗАБОРНОЕ УСТРОЙСТВО

ИКИ РАН, Москва, perhov-alexandr@mai.ru, radiy_zv@mail.ru, kozlova.t@rssi.ru, litvak@iki.rssi.ru

Аннотация

Представлено грунтозаборное устройство (ГЗУ), разработанное для посадочной миссии «Луна-27» в составе комплекса научной аппаратуры (КНА). В ходе наземных испытаний на макете были отработаны различные буровые инструменты, взятие пробы с глубины, очистка внутреннего шнека. Испытания проводились на аналоге лунного реголита, имитирующего его физико-механические свойства. В результате был выбран оптимальный вид бурового шнека и режим бурения. Были также разработаны компоновочные решения, позволяющие адаптировать ГЗУ под различную массу научной аппаратуры на борту космического аппарата.

Ключевые слова

Грунтозаборное устройство, криогенное бурение, буровой стенд, Луна, посадочный модуль, проба грунта, аналог лунного реголита.

A.S. Perkhov, R.S. Zverev, T.O. Kozlova, M.L. Litvak

LUNA-27. SOIL-SAMPLING TOOL

IKI RAS, Moscow, Russia, perhov-alexandr@mai.ru, kozlova.t@rssi.ru, litvak@iki.rssi.ru, radiy_zv@mail.ru

Abstract

A soil-sampling tool (GZU) developed for the Luna-27 landing mission as part of the scientific equipment complex (SPA) is presented. In the course of ground tests, various drilling tools, sampling from a depth, and cleaning the internal auger were tested on the mock-up. The tests were carried out on an analogue of the lunar regolith, which imitates its physical and mechanical properties. As a result, the optimal type of auger and drilling mode was chosen. Layout solutions were also developed to adapt the main memory to various masses of scientific equipment on board the spacecraft.

Key words

Soil-sampling tool, cryogenic drilling, drilling rig, Moon, lander, soil sample, analogue of lunar regolith.

Луна – ближайшее космическое тело, которое может стать плацдармом для развертывания первой внеземной обитаемой научной станции и местом, где будут впервые использоваться технологии добычи полезных ископаемых. Для этого потребуются космические миссии, в ходе которых будут отрабатываться различные технические решения, необходимые для разработки проектов по колонизации Солнечной системы. Например, необходимо отработать сценарии длительного пребывания человека в условиях пониженной гравитации и космического облучения, предложить методы добычи ресурсов, которые смогут обеспечивать строительство и обслуживание космической лунной базы. Одним из важнейших направлений геологоразведки является поиск и изучение сложных молекулярных соединений и водяного льда на лунных полюсах. Анализ состава лунного полярного реголита может помочь ответить на вопросы о происхождении и эволюции Солнечной системы.

Наибольший интерес представляют вечно затенённые кратеры и их освещенные участки, расположенные в окрестности южного полюса Луны. Место, где будет найдено наибольшее скопление от-

ложений замороженного водяного льда и других летучих соединений, может стать подходящим вариантом для размещения первой лунной базы.

Среди приборов будущих лунных посадочных аппаратов большую роль играют технические комплексы, способные извлекать образцы реголита с разных глубин. Грунтозаборные устройства (ГЗУ) обеспечат забор с разной глубины и доставку образцов грунта к приемным окнам аналитических научных приборов на борту космического аппарата и тем самым обеспечат изучение распределения различных химических соединений по глубине.

Классификация видов ГЗУ

Можно составить классификацию ГЗУ по глубине проникновения в слои внеземного грунта:

1. Глубина погружения от 0,01 м до 0,4 м – поверхностные ГЗУ. Это могут быть устройства ковшового типа или использующие буровой инструмент. Такие ГЗУ имеют минимальные габариты и массу, что позволяет устанавливать их на конце механизма развертывания или манипулятора – как в составе посадочного модуля, так и на борту мобильной научной платформы, планетохода. В качестве примера можно привести миссии НАСА «Phoenix» и «MSL»/»Curiosity». В ходе первой миссии был проведен только ковшовый забор самого верхнего слоя марсианского грунта [1]. Во втором случае – это использование ковшового устройства и бура в составе манипулятора марсохода тяжёлого класса [2]. Среди советских космических миссий хорошим примером являются буровые устройства «Луны-16» и «Луны-20».
2. Глубина бурения от 1 м до 3 м – глубинные ГЗУ. Примером успешной миссии по бурению на такую глубину является миссия «Луна-24».
3. Глубина бурения от 3 м до 10 м. Это могут устройства, в которых буровая штанга собирается по мере проходки скважины, или механизмы самозаглубляющегося типа, снабженные ударным устройством. Ко вторым можно отнести действующую марсианскую миссию НАСА «Insight», устройство которого может проникать на глубину до 5 м. Это позволяет изучать механические и тепловые свойства подповерхностных слоев Марса [3].
4. Глубина бурения более 10 м. Устройства подобного рода предназначены для научно-промышленных целей, например, для добычи полезных ископаемых на космических телах. ГЗУ такого масштаба могут понадобиться уже после подробного изучения и картографирования выбранного геологического района внеземного объекта.

Требования к ГЗУ и выбор места посадки

После космической миссии «Луны-25» следующим посадочным модулем на Луне планируется миссия «Луна-27». Оба этих космических аппарата будут изучать минералогический, химический и изотопный состав лунного реголита, а также заниматься поиском и анализом летучих соединений в приповерхностном слое реголита. При этом «Луна-27» более тяжелый аппарат, предназначенный для работы в полярных районах и позволяющий реализовать более сложные и глубинные устройства забора грунта.

Посадка космического аппарата «Луна-27» предполагается около южного полюса Луны (80^{o} с.ш., примерно на 10 градусов ближе к полюсу, чем «Луна-25»). Здесь могли сохраниться летучие вещества и подповерхностный водяной лед. Они могут храниться в толще лунного грунта в течение миллиардов лет даже в освещенных полярных районах на глубине до 1 м [4,5]. Криогенный способ бурения должен обеспечить минимальный нагрев извлекаемых образцов лунного грунта, чтобы успеть проанализировать летучие вещества до их сублимации.

Так как орбитальное сканирование поверхности Луны показало крайне неоднородное и неоднозначное распределение водяного льда, то требуются посадочные модули, оснащенные ГЗУ, для верификации результатов орбитального картографирования.

При бурении ГЗУ должно обеспечить минимальный нагрев изымаемых образцов реголита. Такой тип криогенного бурения ещё не применялся в планетных исследованиях, и требует разработки нового метода бурения и специального бурового инструмента.

Учитывая опыт, полученный с помощью ГЗУ, которые успешно применялись в космических миссиях, и текущих приоритетов научных исследований Луны, можно сформулировать следующие основные группы требований:

1. Для средних по массе космических аппаратов, например, «Луны-27», масса ГЗУ не должна превышать 25 кг, потребление мощности не более 180 Вт, прижимное усилие не более 700 Н, глубина бурения от 0,5 м до 2 м. Несущая конструкция должна быть в виде единой ажурной фермы. Помимо приводов бурового инструмента необходимы устройства его выноса и поворота. Для преодоления сопротивления мёрзлого лунного грунта при бурении большим преимуществом будет использование ударно-вращательного метода проходки скважины. Также ГЗУ должно быть обеспечено вспомогательными механизмами, с которыми взаимодействует буровой инструмент, для быстрой доставки образцов реголита в аналитические научные приборы и минимального нагрева образцов грунта. Для ГЗУ должны быть выполнены общетехнические требования, применяемые для космических устройств, например, система терморегулирования и контроля температуры и нагрева бурового инструмента.

2. В случае мобильных научных платформ упрощаются требования в части вспомогательных механизмов. Например, не нужны устройства выноса и перемещения, так как подвод бурового инструмента к интересующему месту изучения обеспечивается шасси планетохода. Остальные требования будут аналогичными.

Разработка ГЗУ

Разрабатываемые ГЗУ для лунных миссий должны обеспечивать проникновение в лунную поверхность на глубину 0,5 – 2 м, чтобы дойти до слоев грунта, полностью изолированных от внешних условий.

Распределение летучих веществ по глубине, скорее всего, неоднородно и отражает условия, в которых они образовались или были привнесены извне. Поэтому разрабатываемое ГЗУ должно обеспечить забор образцов грунта с разных глубин с шагом 0,1 – 0,5 м.

Основная задача ГЗУ – это передать глубинные образцы грунта в аналитические приборы. Поэтому должен быть продуман и реализован наиболее эффективный способ передачи образцов грунта. Он должен быть эффективен с точки зрения сохранения летучих соединений.

Чтобы сохранить летучие вещества в образцах грунта при заборе, необходимо применение малоинвазивных воздействий на грунт в буровой скважине с минимальным повышением температуры. Что требует специальной методологии забора проб. Это влияет на конструкцию самого бура и режимы его работы.

Сохранение летучих веществ в образцах грунта при их передаче в аналитические приборы также является неотъемлемой частью данного процесса. Для этого необходимо забрать достаточно большие объемы проб (5 – 10 $см^3$) и быстро их передать (не допустив перегрев более чем на 10 градусов).

Суммируя вышеизложенные задачи, можно сказать, что в разрабатываемом ГЗУ и методах бурения и отбора проб должна быть осуществлена возможность изучения проб грунта с разных глубин, не подверженных серьезному механическому и тепловому воздействию.

Так как ГЗУ разрабатывается с возможностью использования в следующих миссиях, его конструкция должна допускать возможные модификации для установки на борт луноходов и посадочных миссий, нацеленных на доставку образцов грунта на Землю.

Для разработки подобного ГЗУ были сформулированы следующие задачи:

– Анализ существующих методов бурения и отбора проб, разработок и прототипов устройств дял бурения и отбора проб на внеземных поверхностях;

– Разработка новой методологии бурения и отбора проб;

– Разработка прототипа ГЗУ для будущих лунных полярных миссий.

– Размещение ГЗУ на космическом аппарате с учетом различных компоновок, сравнение полученных конфигураций ГЗУ.

Также полезным оказался анализ данных, полученных в ходе успешных посадочных миссий на Луну и Марс с оборудованием для извлечения проб грунта на борту космических аппаратов. Были рассмотрены и сами буровые устройства с технической точки зрения, что помогло учесть опыт их использования при создании прототипа. Рассматривались геологоразведочные работы космонавтов на лунной поверхности в составе миссий НАСА «Аполлон» [6]. Кроме того, рассмотрена работа советских автоматических посадочных лунных миссий «Луна-16, -20, -24», имевших в своем составе ГЗУ. Их работа по взаимодействию с грунтом, технические характеристики и пробы, которые им удалось взять, описаны в трудах Кемурджиана [7], Виноградова [8], Черкасова [9] и других.

В результате были пройдены следующие важные этапы:

– Систематизирована информация о существующих устройствах и прототипах с аналогичными задачами, рассмотрено ее применение к текущим целям перспективных посадочных миссий на Луну.

– Сформулированы основные требования к новому поколению перспективных ГЗУ, обеспечивающих криогенный отбор проб.

– Создана математическая модель ГЗУ, удовлетворяющая требованиям космического эксперимента.

– Создана и частично верифицирована методология отбора проб грунта с сохранением послойной стратификации и первоначальных температурных и механических свойств.

– Создан макет перспективной ГЗУ, который успешно прошел наземные отработки в нормальных климатических условиях.

– Разработана концепция прототипа летного ГЗУ, удовлетворяющего требованиям космического эксперимента.

Разработанный метод бурения и отбора проб планируется использовать в прототипе перспективного ГЗУ для посадочной части миссии «Луна-27».

Методы, технологии и компоновочные решения, разработанные для ГЗУ «Луна-27», использованы при создании технического предложения на комплекс научной аппаратуры для посадочного модуля миссии «Луна-28», основная цель которого – возврат лунного полярного грунта на Землю с максимально возможным сохранением его первоначальных свойств.

Описание Макета ГЗУ

Макет ГЗУ, созданный в рамках эскизного проектирования, предназначен для отработки предложенных способов бурения и отбора проб. Макет применялся для бурения в нормальных условиях на специально подготовленном аналоге лунного реголита, разработанного ГЕОХИ РАН [10].

В отличие от лётного исполнения ГЗУ было проведено макетирование лишь его отдельных основных узлов для отработки метода удаления бурового шлама, методов внедрения в скважину, забора образцов грунта. Была протестирована очистка внутреннего шнека от частиц аналога лунного грунта специальными щётками, их выносливость в череде нескольких очисток.

Макет ЭП ГЗУ состоит из следующих основных частей:

– оснастка с местами крепления основных узлов макета ГЗУ, контейнера для грунта;

– контейнер для грунта в составе труб и заглушек;

– узлы ГЗУ в составе: платформа, привод подачи, привод бурового инструмента, ролики, шнеки, узел щеточный;

– система управления узлами ГЗУ в составе: источник питания, управляющий компьютер, контроллеры двигателей.

Фотография макета ЭП ГЗУ представлена на рисунке 1.

Рисунок 1 — Макет ГЗУ

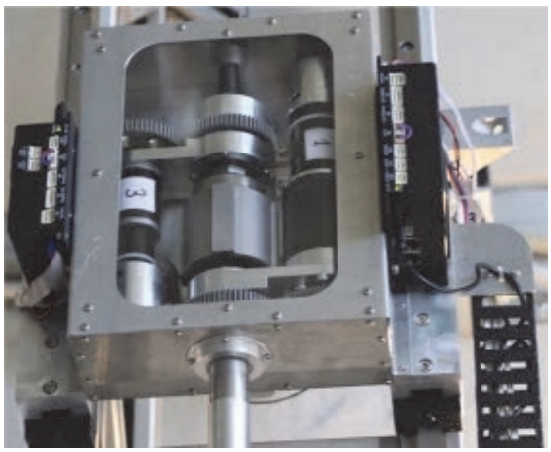


Рисунок 2 — Фотография приводов бурового инструмента и пробоотборника макета ГЗУ

Макет ЭП ГЗУ имеет в своем составе 3 привода:

- Привод подачи;
- Привод бурового инструмента;
- Привод пробоотборника.

Привод подачи представляет собой устройство, обеспечивающее спуск и подъем подвижной буровой головки посредством намотки троса. Привод состоит из электродвигателя, встроенного и внешнего редукторов, барабана и кронштейнов для установки на оснастку.

Привод бурового инструмента и привод пробоотборника представлены на рисунке 2.

Привод бурового инструмента и привод пробоотборника выполнены в едином подвижном корпусе, связанном системой тросов с приводом подачи, определяющим его положение.

Привод бурового инструмента обеспечивает вращательное движение всего бурового инструмента независимо от скорости подачи. Привод состоит из электродвигателя, встроенного редуктора и механизма зацепления с буровым инструментом. Механизм зацепления представляет собой систему из зубчатых колес, шпоночного соединения и подшипниковых узлов для передачи вращательного движения.

Привод пробоотборника состоит из электродвигателя, встроенного редуктора, зубчатых колес и внешней системы передачи движения.

Задача привода пробоотборника – обеспечение осевого перемещения для выдвижения пробоотборника для забора и выгрузки пробы грунта. Перевод из вращательного движения электродвигателя в поступательное обеспечивается системой подшипниковых узлов и передачей винт-гайка. Так же привод устроен таким образом, что вал, связывающий пробоотборник с приводом, всегда имеет одинаковую с буровым инструментом скорость вращения.

Испытания на макете ГЗУ

В ходе исследования было рассмотрено два классических типа отбора проб - шнековый и колонковый. Колонковый принцип грунтозабора хорошо изучен и был использован в конструкции грунтозаборного устройства лунного манипуляторного комплекса (ЛМК) для КА «Луна-25». Наземные отработки с колонковым грунтозаборным устройством ЛМК показали, что данный тип не удовлетворяет требованиям по доставке в аналитический прибор ТА-Л образцов реголита мелкой дисперсности и без включения консолидированных элементов грунта (камней) с размером более 5 мм. Попадание даже мелких камней в приемное окно аналитического прибора ТА-Л критично с точки зрения обработки и дальнейшего анализа. Для шнекового пробоотборника такая проблема отсутствует, так как его конструкция не позволяет попадать крупным фракциям реголита с размером более высоты витка шнека в пробоотборник. Поэтому для макетирования был выбран только шнековый пробоотборник.

Было проведено численное моделирование бурового инструмента с внешним шнеком. Целью моделирования было подобрать оптимальные параметры конструкции бурового инструмента - такие, как оптимальный и максимально возможный угол подъема витков шнека. Математическая модель содержит расчет геометрии шнека, кинематики транспортировки грунта, определение критического и оптимальных значений угла подъема, частоты вращения, угла подъема шнека бурового инструмента.

По результатам расчета для бурения на поверхности Луны с лунной гравитацией с коэффициентом заполнения шнека $K_f = 0,5$ и с номинальной скоростью вращения бурового инструмента $n_0 = 120$ об/мин оптимальный угол подъема шнека $\alpha = 13°$.

В ходе макетирования было создано три варианта буровых инструментов. инструменты были выбраны исходя из двух наиболее оптимальных вариантов удаления бурового шлама из скважины:

– транспортировка бурового шлама на поверхность (буровой инструмент с внешним шнеком);

– раскатка шлама в стенки скважины (гладкий буровой инструмент и буровой инструмент с вырождающимся шнеком).

Буровой инструмент с внешним шнеком, гладкий буровой инструмент и инструмент с вырождающимся шнеком представлены на рисунке 3.

Было проведено бурение в аналоге лунного реголита в н.к.у. на глубину 800 мм. Два инструмента (классический шнек и вырождающийся шнек) пробурили аналог лунного реголита на заданную глубину 800 мм. При этом максимальное потребление при бурении классическим шнеком не превысило 45 Вт, вырождающимся шнеком – 120 Вт. Гладкий инструмент пробурил только 285 мм. Таким образом ГЗУ с классический шнеком было отобрано как наиболее перспективное для дальнейших разработок.

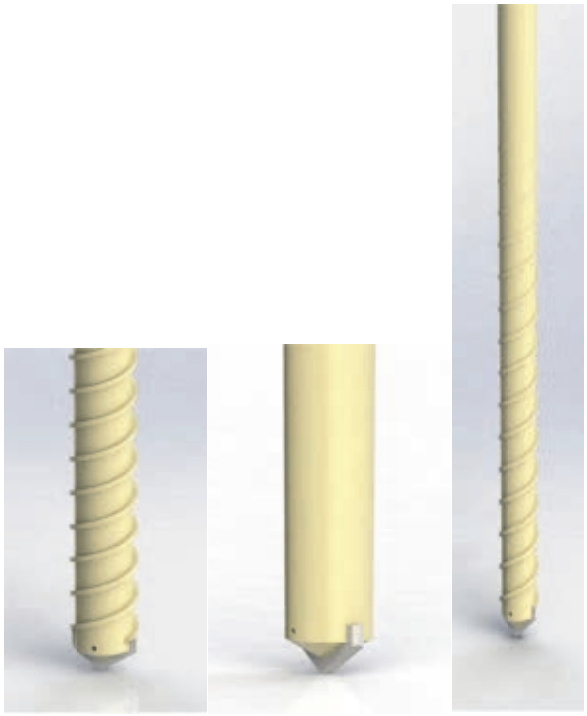


Рисунок 3 — Буровой инструмент с внешним шнеком (слева), гладкий буровой инструмент (в центре), буровой инструмент с вырождающимся шнеком (справа)

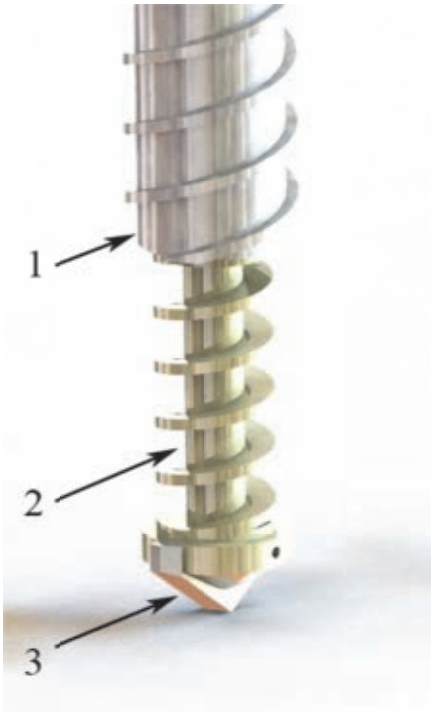


Рисунок 4 — Пробоотборник ГЗУ: 1 – буровой инструмент; 2 – внутренний шнек пробоотборника; 3 – резец

В ходе испытаний также проверялась концепция пробоотборника, который представляет собой внутренний выдвигающийся шнек, расположенный внутри бурового инструмента. Резец бурового инструмента установлен на конце пробоотборника. Пробоотборник вращается вместе с буровым инструментом и линейно перемещается относительно бурового инструмента.

Пробоотборник шнекового типа представлен на рисунке 4. Грунт забирается на внутренний шнек (2), показан резец (3) и тело бурового инструмента (1).

Пробоотборник подтвердил свою работоспособность и во всех случаях забора проб был забран необходимый объем грунта.

В итоге отработки удалось подобрать оптимальные параметры бурения и выбрать наиболее эффективный метод удаления бурового шлама (в части энергозатрат) для уменьшения температурного воздействия на образец реголита, что, в свою очередь, позволит использовать данный режим для сохранения в образце реголита летучих соединений и воды в лётном исполнении ГЗУ в ходе космической миссии «Луна-27».

Отработки шнеков ЭП ГЗУ показали, что два буровых инструмента (классический шнек и вырождающийся шнек) удовлетворяют требованию максимально допустимой мощности (не более 180 Вт) при бурении на глубину 800 мм в аналоге лунного реголита в нормальных климатических условиях, при этом классический шнек показал потребление не более 45 Вт, что дает существенный запас по мощности в случае столкновения с камнем и бурении более плотного или мерзлого реголита.

Пробоотборник шнекового типа показал стабильный забор грунта во всех сериях бурения с объемом забранного грунта от 5 до 6,5 см³.

Дальнейшие отработки в рамках созданного макета подразумевают отработки различных режимов бурения, изменения состава грунтов (например, добавление каменистых включений), доработки механической части макета и многое другое. Для дальнейшей отработки бурения необходимо создание аналогичного макета, подготовленного для работы в термо-вакуумных условиях. Разработки такого макета уже ведутся, и работа с ним даст много новой информации о возможностях бурения мерзлых грунтов в приполярных областях Луны.

Летное Исполнение ГЗУ

Предполагаемый внешний вид прототипа ГЗУ в составе КА миссии «Луна-27» представлен на рисунке 5.

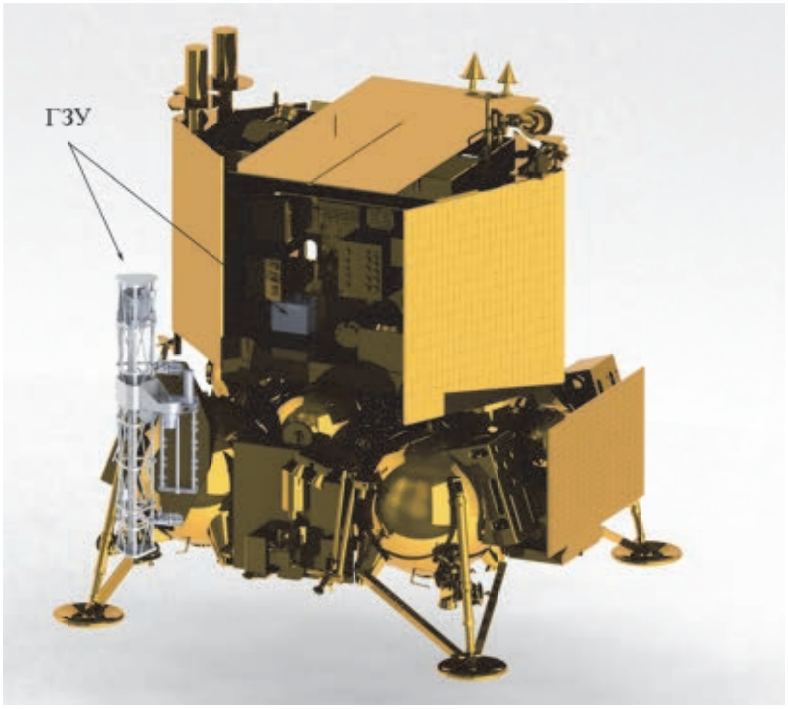


Рисунок 5 — Прототип ГЗУ на КА «Луна-27»

Данное исполнение является оптимальным вариантом по габаритам, массе и необходимому количеству точек крепления к КА. Эта конфигурация ГЗУ способна бурить на глубину не менее 1,3 м.

Конфигурация ГЗУ, способная бурить на глубину до 2 м потребует ещё одной точки крепления зачековки, расположенной в узле приводов, что может осложнить компоновку научной аппаратуры КА.

В таблице 1 представлены основные результаты по разработке вариантов конфигурации ГЗУ для миссии «Луна-27». Данные версии ГЗУ позволяют выбрать необходимое компоновочное решение с учётом ограничений на массу научной аппаратуры. Процесс бурения и передачи проб грунта может быть реализован как с использованием вспомогательных устройств (таких, как ЛМК для передачи проб), обеспечивая максимальную глубину бурения и взятия проб реголита, так и «все в одном», когда ГЗУ является самодостаточным устройством (само бурит и само доставляет пробы грунта). В последнем случае можно сэкономить массу ГЗУ, но ограничить глубину забора грунта.

Таблица 1 — Сравнение основных параметров различных конфигураций ГЗУ для «Луны-27»

Параметр	ГЗУ 1,3 м	ГЗУ 2,0 м	Требования ТЗ	ГЗУ 1,0 м (в разработке)
Усилие прижатия	до 700 Н		до 700 Н	до 650 Н
Глубина	1300 мм	2000 мм	1000 - 2000 мм	1000 мм
Мощность	до 180 Вт	до 180 Вт	до 180 Вт	до 180 Вт
Масса	25,0 кг	33,9 кг	не более 25,0 кг	17 кг
Объем пробы	9 см^3		2 см^3	5 см^3
Кол-во скважин	многократно		-	многократно
Скорость бурения	Несколько см в минуту		-	Несколько см в минуту
Максимальный размер (высота)	1615 мм	2315 мм	-	1100 мм
Диаметр бура	25 мм		-	25 мм
Вибрационный механизм	да		-	нет

Литература

1. Smith P.H. [et al.]. A. Introduction to special section on the Phoenix Mission: Landing Site Characterization Experiments, Mission Overviews, and Expected Science // Journal of Geophysical Research. 2008. V. 113.

2. Anderson R.C. [et al.]. Collecting samples in Gale Crater, Mars; an overview of the Mar Science Laboratory Sample Acquisition, Sample Processing and Handling system // Space Sci. Rev. 2012.

3. Spohn T. [et al.]. The Heat Flow and Physical Properties Package (HP3) for the InSight Mission // Space Science Rev. 2019.

4. Mitrofanov I. [et al.]. Testing polar spots of water-rich permafrost on the Moon: LEND observations onboard LRO // Journal of Geophysical Research. 2012. V. 117.

5. Sanin A. B. [et al.]. Hydrogen distribution in the lunar polar regions // Icarus. 2017. V. 283. p. 20-30.

6. Apollo Program Summary Report, National Aeronautics and Space Administration, NASA.

7. Кемурджиан и др, - «Автоматические станции для изучения поверхностного покрова Луны», Машиностроение, 1976.

8. Виноградов - «Лунный грунт из Моря Изобилия», Наука, 1973.

9. Черкасов, Шварев – «Грунт Луны», Наука, 1975.

10.E.N. Slyuta, E.A. Grishakina, V. Yu Makovchuk, I.A. Agapkin, Lunar soil-analogue VI-75 for large-scale experiments, Acta Astronaut. 187 (2021) 447–457.

М.И. Калинов[1], В.А. Родионов[1,2]

ВЛИЯНИЕ ПРЕЦЕССИИ УЗЛОВ ОРБИТ РАЗНОВЫСОТНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА МОРСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

[1]Санкт-Петербургский научный центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, cesavo@mail.ru;
[2]Санкт-Петербургское отделение Секции прикладных проблем при Президиуме Российской академии наук, Санкт-Петербург, var1959@mail.ru

Аннотация

Рассматривается влияние прецессии узлов орбит разновысотных космических аппаратов на эффективность применения космической системы наблюдения за морскими объектами. Получены количественные оценки совокупности показателей, характеризующих исследуемый процесс, для вариантов компланарного и равномерного построения орбитальных группировок космических аппаратов. Выявлены особенности влияния прецессии узлов орбит космических аппаратов на эффективность применения космической системы в различных районах Мирового океана.

Ключевые слова

Космическая система, космический аппарат, орбитальная группировка, прецессия, эффективность, показатель, оценка, район.

M.I. Kalinov[1], V.A. Rodionov[1,2]

THE EFFECT OF PRECESSION OF NODES OF ORBITS OF DIFFERENT-ALTITUDE SPACECRAFT ON THE EFFECTIVENESS OF THE USE OF A SPACE SYSTEM FOR OBSERVING MARINE OBJECTS

[1]St. Petersburg Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia, cesavo@mail.ru;
[2]St. Petersburg Branch of the Section of Applied Problems under the Presidium of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia, var1959@mail.ru

Annotation

The influence of precession of nodes of orbits of different-altitude spacecraft on the effectiveness of the use of a space system for observing marine objects is considered. Quantitative estimates of the totality of indicators characterizing the process under study have been obtained for variants of the coplanar and uniform construction of orbital groupings of spacecraft. The peculiarities of the influence of precession of nodes of spacecraft orbits on the effectiveness of the space system in various areas of the World Ocean are revealed.

Key words

Space system, spacecraft, orbital grouping, precession, efficiency, indicator, estimate, area.

В настоящее время в практике морской деятельности при решении различных задач широко применяются космические системы наблюдения за морскими объектами (КСНМО). Важное значение как при создании, так и при эксплуатации этих систем имеют оценки эффективности их применения по целевому назначению. Такие оценки позволяют формировать рациональные структуры орбитальных группировок (ОГ) космических аппаратов (КА), обосновывать характеристики бортовой аппаратуры КА и планы ее работы (распределение ресурса) в заданных органами управления районах наблюдения за морскими объектами.

Совместно с эффективностью применения КСНМО часто оцениваются и их информационные свойства и возможности, среди которых особо значимы периодичность наблюдения за морскими объектами (далее – периодичность) и среднее количество обнаружений таких объектов в сутки. Поэтому в рамках

настоящей статьи под оценкой эффективности применения КСНМО подразумевается также и оценка периодичности и количества обнаружений.

При оценке эффективности применения КСНМО (далее – оценке эффективности) могут быть использованы соответствующие методы (методики), позволяющие получать искомые результаты. Достаточно удобными для решения подобного класса задач являются методики, входящие в состав имитационно-моделирующего комплекса информационных космических систем, поддерживаемого в актуальном состоянии в Санкт-Петербургском отделении Секции прикладных проблем при Президиуме РАН и в Санкт-Петербургском научном центре РАН [1]. Эти методики учитывают различные случайные и детерминированные факторы, влияющие на применение КСНМО.

Следует отметить, что ранее оценки эффективности обычно производились на ограниченном временном интервале, начало которого, как правило, совпадало с временем начала функционирования системы или было близко к нему. Полученные оценки эффективности распространялись на все время функционирования системы. Такой подход, в общем случае, правомочен для КСНМО с КА, находящимися на орбитах с одинаковой высотой. Если КА системы имеют различные высоты, то возникает эффект вращения плоскости орбиты КА с одной высотой относительно плоскости орбиты КА с другой высотой. Это вращение связано с различными скоростями прецессий узлов орбит разновысотных КА [2]. Поскольку такая разность скоростей прецессий узлов орбит сравнительно невелика, то она начитает сказываться на результатах оценки эффективности при достаточно большом времени начала интервала оценки (десятки и сотни суток с момента создания системы).

Поэтому для большей корректности получаемых с помощью указанной методики результатов целесообразно произвести оценки такого влияния на ожидаемые результаты применения системы по целевому назначению.

Далее (для определенности) рассматривался процесс применения КСНМО в составе 6 КА (3 КА на высоте 1000 км и 3 КА на высоте 500 км, наклонение орбит 67^{o}, ширина полосы обзора КА B = 500, 1000 и 1500 км) на трехсуточном интервале по трем районам (Северо-Восточная Атлантика (СВА), Средиземное море (СРМ), Тихий океан (ТОФ)). При этом рассматривалось 2 варианта построения орбитальной группировки (ОГ) КА. В первом варианте (КСНМО-1) КА с одинаковыми высотами равномерно распределены по аргументу широты в двух плоскостях орбит (компланарное построение ОГ КА), во втором (КСНМО-2) – КА с одинаковыми высотами дополнительно разнесены по долготам восходящих узлов (ДВУ) орбит на 120 градусов (равномерное построение ОГ КА). Долгота восходящего узла орбиты первого КА с одной высотой смещена на 60 градусов относительно долготы восходящего узла первого КА с другой высотой орбиты. Для выбранных высот и наклонений орбит КА (при компланарном построении ОГ КА) полный оборот одной плоскости орбиты относительно другой осуществляется (приблизительно) за 500 суток.

При оценке эффективности на экране компьютера отображаются и имеют соответствующие обозначения (рис. 1 и 2):

– район наблюдения на фоне цифровой морской карты, отрезки трасс полета КА и текущее положение каждого КА в начале интервала оценки, данные о границах района наблюдения;

– структура орбитальной группировки – долгота восходящего узла (Дву), время прохождения восходящего узла (Тву) на первые сутки существования системы для первого витка каждого КА;

– исходные данные для прогнозирования (ID): количество КА в системе (nka), номер суток начала интервала оценки (td), интервал оценки (toz), время устаревания 0,5 час. (tu1) и 1,5 час. (tu2), границы района наблюдения, град. – верхняя (grv), нижняя (grn), левая, (grl), правая (grp), количество разыгрываемых сценариев действий объекта (nfco), скорость движения объекта, км/час. (vob);

– выходные данные прогнозирования (VD): вероятности слежения за объектом при времени устаревания 0,5 часа (W1), и 1,5 часа (W2), максимальный интервал времени между обнаружениями объекта с вероятностью не хуже 0,5 (T(0,5)), не хуже 0,8 (T(0,8)), не хуже 1,0 (T(1,0)), количество обнаружений объекта в сутки максимальное (k1), среднее (k2), минимальное (k3), средний интервал времени

между обнаружениями объекта, час. (Тср.), доверительная вероятность результатов оценки (Рд), количество пролетов КА через район наблюдения (npr).

Для наглядности высота полета (H), наклонение орбиты (i), полуширина полосы обзора каждого КА (B/2), количество обнаружений (n) каждого объекта (m), а также интегральный F(t) и дифференциальный f(t) законы распределения вероятностей попадания во временные интервалы между обнаружениями объекта представлены в графическом виде.

Основные показатели эффективности применения КСНМО:

– вероятности слежения за объектом $W_{0,5}$ и $W_{1,5}$ с допустимым временем устаревания данных 0,5 и 1,5 часа соответственно (далее – вероятности слежения);

– максимальный интервал времени между обнаружениями объекта с вероятностью не хуже 0,8, час. ($T_{0,8}$) (далее – интервал времени между обнаружениями);

– среднее количество обнаружений объекта в сутки (k_2) (далее – количество обнаружений).

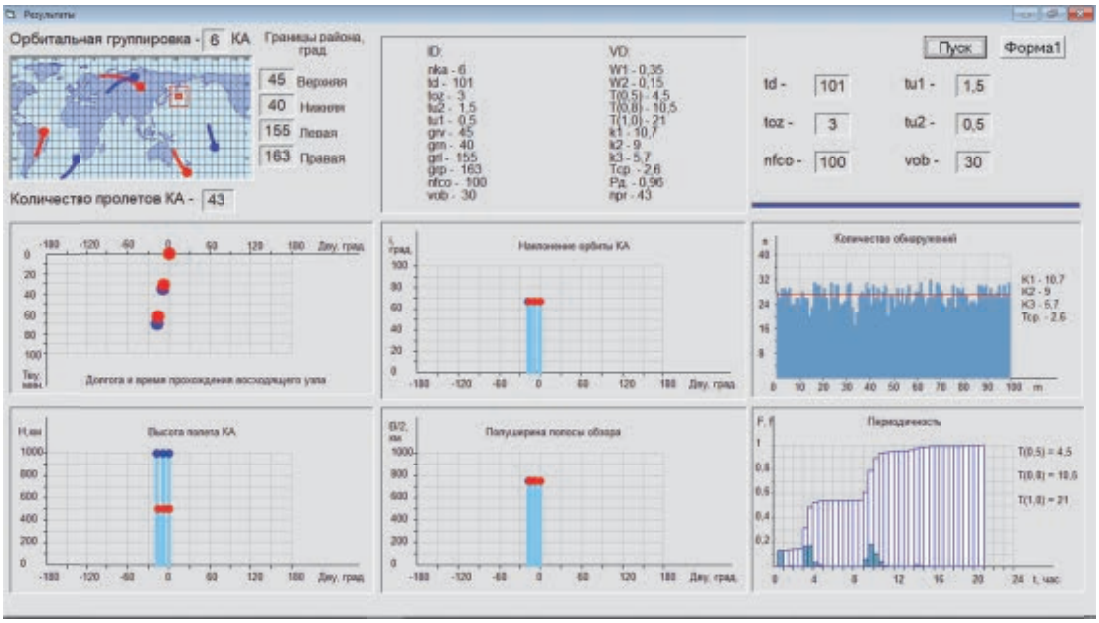


Рисунок 1 — Графическое представление результатов оценки эффективности применения КСНМО при компланарном построении орбитальной группировки КА (вариант)

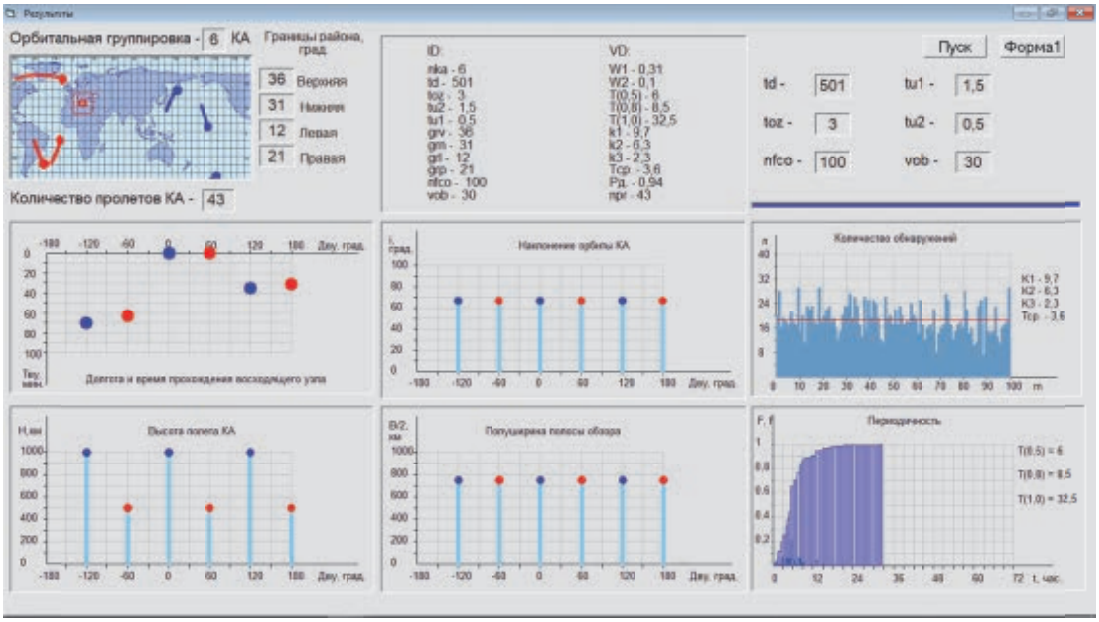


Рисунок 2 — Графическое представление результатов оценки эффективности применения КСНМО при равномерном построении орбитальной группировки КА (вариант)

Основные результаты оценки эффективности (для различных времен (номеров суток) начала интервала оценки) представлены в таблицах 1-6. В каждой ячейке таблиц с оценками эффективности приведены данные, полученные для ширины полосы обзора КА B = 500, 1000 и 1500 км соответственно. В таблицах 2, 4, 6 вместо угла между плоскостями орбит КА, находящимися на одной высоте $\alpha_к$, представлены значения угла между плоскостями орбит первых КА $\alpha_р$ с высотами 500 и 1000 км соответственно. Исходные данные по долготам восходящих узлов и временам их прохождения для каждого КА представлены в левой средней части каждого рисунка.

Таблица 1 — Оценка эффективности применения КСНМО-1 (СВА)

№ п/п	№ суток	$\alpha_к$, град.	$W_{0,5}$	$W_{1,5}$	$T_{0,8}$	k_2
1	1	0	0,11/0,22/0,27	0,20/0,29/0,34	19,5/18,5/17,5	8,5/17,3/21,3
2	101	72	0,15/0,28/0,36	0,29/0,45/0,51	15,0/14,0/13,0	9,2/18,3/23,4
3	201	144	0,17/0,34/0,42	0,35/0,56/0,66	11,0/10,0/8,5	9,9/20,0/25,1
4	301	216	0,17/0,34/0,42	0,35/0,56/0,66	9,0/7,5/6,5	10,0/20,4/25,2
5	401	288	0,17/0,33/0,40	0,35/0,52/0,59	13,5/12,0/11,0	10,0/19,6/24,7
6	501	360	0,15/0,26/0,30	0,29/0,37/0,41	18,0/16,5/15,5	9,5/18,2/21,7

Таблица 2 — Оценка эффективности применения КСНМО-2 (СВА)

№ п/п	№ суток	$\alpha_р$, град.	$W_{0,5}$	$W_{1,5}$	$T_{0,8}$	k_2
1	1	60	0,16/0,31/0,35	0,51/0,81/0,85	5,0/2,5/2,0	10,4/19,5/21,9
2	101	132	0,14/0,27/0,37	0,39/0,70/0,88	8,5/3,5/2,0	8,8/17,7/23,8
3	201	204	0,16/0,31/0,36	0,49/0,80/0,87	5,0/2,5/2,0	9,9/19,2/22,7
4	301	276	0,15/0,30/0,38	0,43/0,76/0,88	7,0/3,5/2,0	9,0/19,1/22,1
5	401	348	0,16/0,29/0,35	0,48/0,79/0,87	6,0/2,5/2,0	9,3/19,1/22,3
6	501	60	0,17/0,30/0,35	0,51/0,80/0,88	5,5/3,0/2,0	10,1/18,5/22,1

Таблица 3 — Оценка эффективности применения КСНМО-1 (СРМ)

№ п/п	№ суток	$\alpha_к$, град.	$W_{0,5}$	$W_{1,5}$	$T_{0,8}$	k_2
1	1	0	0,03/0,06/0,09	0,08/0,13/0,18	33,5/14,5/13,5	1,7/4,0/6,2
2	101	72	0,03/0,08/0,12	0,11/0,22/0,30	26,0/13,5/9,5	1,9/4,5/7,2
3	201	144	0,03/0,08/0,12	0,11/0,21/0,27	24,0/10,0/9,0	2,0/4,6/7,4
4	301	216	0,03/0,08/0,12	0,11/0,20/0,27	26,0/12,5/10,0	1,9/4,5/7,4
5	401	288	0,03/0,08/0,13	0,12/0,22/0,31	24,0/13,0/7,5	2,0/4,6/7,4
6	501	360	0,03/0,08/0,13	0,12/0,23/0,30	24,0/12,5/12,0	2,0/4,7/7,5

Таблица 4 — Оценка эффективности применения КСНМО-2 (СРМ)

№ п/п	№ суток	$\alpha_р$, град.	$W_{0,5}$	$W_{1,5}$	$T_{0,8}$	k_2
1	1	60	0,02/0,05/0,10	0,06/0,16/0,33	49,0/17,0/9,5	1,1/2,8/5,8
2	101	132	0,05/0,10/0,12	0,17/0,29/0,34	17,0/8,5/7,0	3,3/6,3/7,8
3	201	204	0,02/0,04/0,09	0,05/0,15/0,31	46,0/19,0/9,5	0,9/2,6/5,4
4	301	276	0,04/0,09/0,12	0,13/0,26/0,36	23,0/9,5/7,0	2,5/5,6/8,0
5	401	348	0,03/0,07/0,13	0,10/0,23/0,40	34,0/15,5/7,0	1,9/4,4/7,5
6	501	60	0,02/0,05/0,10	0,07/0,17/0,31	32,5/17,0/8,5	1,1/3,3/6,3

Таблица 5 — Оценка эффективности применения КСНМО-1 (ТОФ)

№ п/п	№ суток	$\alpha_к$, град.	$W_{0,5}$	$W_{1,5}$	$T_{0,8}$	k_2
1	1	0	0,03/0,06/0,10	0,08/0,13/0,18	24,0/15,0/14,5	2,2/4,8/7,8
2	101	72	0,04/0,09/0,15	0,14/0,25/0,35	20,0/11,0/10,5	2,4/5,5/9,0
3	201	144	0,04/0,08/0,13	0,12/0,20/0,27	24,0/9,5/8,0	2,3/5,4/8,8
4	301	216	0,04/0,09/0,15	0,13/0,25/0,34	22,5/10,0/8,5	2,3/5,5/9,2
5	401	288	0,04/0,09/0,15	0,14/0,25/0,34	24,0/9,0/8,0	2,3/5,4/9,0
6	501	360	0,04/0,10/0,15	0,14/0,25/0,33	22,5/13,0/12,5	2,4/5,7/9,2

Таблица 6 — Оценка эффективности применения КСНМО-2 (ТОФ)

№ п/п	№ суток	$\alpha_р$, град.	$W_{0,5}$	$W_{1,5}$	$T_{0,8}$	k_2
1	1	60	0,05/0,10/0,14	0,18/0,32/0,43	17,0/8,5/5,0	3,3/6,9/9,8
2	101	132	0,02/0,06/0,12	0,08/0,15/0,33	32,5/15,0/8,0	1,4/4,1/8,0
3	201	204	0,05/0,09/0,13	0,18/0,30/0,40	15,5/8,5/6,0	3,1/6,0/8,8
4	301	276	0,04/0,08/0,12	0,14/0,22/0,31	20,0/9,5/8,0	2,7/5,3/8,7
5	401	348	0,04/0,08/0,13	0,13/0,24/0,38	24,0/10,5/8,0	2,3/4,8/8,4
6	501	60	0,05/0,09/0,12	0,15/0,29/0,35	21,5/8,5/7,0	2,7/6,4/8,5

Анализ результатов полученных оценок эффективности показал следующее:

a) независимо от варианта построения орбитальной группировки КА:

– оцениваемые показатели ($W_{0,5}$, $W_{1,5}$, $T_{0,8}$, k_2) в зависимости от района наблюдения, номера суток, ширины полосы обзора КА изменяются в широком диапазоне значений ($W_{0,5}$ – 0,02-0,38; $W_{1,5}$ – 0,05-0,88; $T_{0,8}$ – 2,0-49,0 час.; k_2 – 0,9-25,2);

– при увеличении ширины полосы обзора КА в 3 раза (с 500 до 1500 км) значения показателей эффективности улучшаются (в среднем) в 2-3 раза, в отдельных случаях $T_{0,8}$ изменяется менее значительно (на 20-30%);

– в районе Средиземного моря (в среднем) показатели эффективности имеют в 2-3 худшие значения, чем в районе Северо-Восточной Атлантики, а в районе Тихого океана по сравнению со Средиземным морем эффективность применения системы (в среднем) улучшается на 10-20%. Указанные отличия связаны с различием широтных диапазонов этих районов наблюдения;

b) при компланарном построении орбитальной группировки КА:

наихудшие результаты применения КСНМО (для каждого значения ширины полосы обзора КА соответственно) будут при совмещении плоскостей орбит ($\alpha_к = 0$) в первые сутки существования системы;

– в районе Северо-Восточной Атлантики при αк = 144-216 градусов (201-301-е сутки существования системы) показатели эффективности имеют наилучшие значения: при ширине полосы обзора В = 1500 км W0,5 = 0,42; W1,5 = 0,66; T0,8 = 8,5-6,5 час.; k2 = 25,1-25,2. При дальнейшем увеличении угла между плоскостями орбит КА происходит ухудшение результатов применения системы;

– в районе Средиземного моря первоначально по мере увеличения αк значения показателей прогноза несколько улучшаются. При αк = 72 град. на 101-е сутки существования системы (и далее) показатели прогноза применения КСНМО изменяются (в основном) незначительно: при ширине полосы обзора В = 1500 км W0,5 = 0,12-0,13; W1,5 = 0,27-0,31; T0,8 = 7,5-12,0 час.; k2 = 7,2-7,5. Эффект первоначального улучшения, а затем ухудшения значений показателей эффективности в зависимости от времени существования КСНМО (как в районе Северо-Восточной Атлантики) в Средиземном море отсутствует;

с) при равномерном построении орбитальной группировки КА:

– в районе Северо-Восточной Атлантики значения отдельных показателей эффективности существенно улучшаются по сравнению с вариантом компланарного построения орбитальной группировки КА: при В = 1500 км W1,5 увеличивается на 22%, Т0,8 уменьшается в 2-4 раза, при этом значения других показателей (W0,5, k2) изменяются незначительно. На 101-е сутки существования системы (αр = 60 град.) при В = 500 и 1000 км W1,5 уменьшается на 11-12%, а Т0,8 ухудшается приблизительно в 1,5 раза по сравнению с результатами применения КСНМО в первые сутки, другие показатели при этом изменяются менее существенно;

– в районе Средиземного моря наибольшее (относительно других времен начала интервала оценки) ухудшение значений показателей эффективности происходит на 1, 201 и 501-е сутки существования системы (αр = 60, 204, 60 град.), при В = 1000 км: W1,5 уменьшается на 12-14%, Т0,8 увеличивается в 1,5-2 раза, изменение других показателей менее значимо;

– в районе Тихого океана ухудшение значений показателей эффективности (по сравнению с первыми сутками) происходит на 101-е сутки существования системы (αр = 132 град.): W1,5 уменьшается на 10-17%, Т0,8 увеличивается, а k2 уменьшается в 1,5-2 раза, W0,5 при этом изменяется менее существенно.

Таким образом, в результате различных значений прецессий узлов орбит разновысотных КА на длительном интервале функционирования КСНМО происходит вращение одной плоскости орбиты КА относительно другой. Для рассмотренных исходных данных (высота орбиты КА в первой плоскости – 1000 км, во второй – 500 км, наклонение орбит КА 67°) за счет прецессии узлов орбит КА полный оборот одной плоскости орбиты относительно другой осуществляется (приблизительно) за 500 суток. Эффективность применения КСНМО при этом существенно изменяется. Для варианта компланарного построения орбитальной группировки в районах Северо-Восточной Атлантики наилучшие значения показателей эффективности достигаются 201-301-е сутки существования системы. В районах Средиземного моря и Тихого океана при равномерном построении орбитальной группировки эффективность применения системы снижается в 1, 201, 501-е и 101-е сутки соответственно. Выявлено преимущество равномерного построения орбитальной группировки КА для районов Северо-Восточной Атлантики.

Представляется целесообразным продолжить исследование влияния на эффективность применения космических систем различных значений прецессий узлов орбит КА в более широком диапазоне исходных данных для различных структур орбитальных группировок КА. Полученные оценки будут полезными для более корректных и обоснованных рекомендаций по рациональным вариантам построения и применения перспективных космических систем наблюдения за морскими объектами.

Литература

1. Анцев Г.В., Гуляков В.В., Калинов М.И., Родионов В.А. Моделирование и оценка эффективности применения многоярусной космической системы мониторинга морской поверхности // Морские информационно-управляющие системы. М.: АО «Концерн «Моринформсистема-Агат», 2017. № 2(12) С. 22-29.

2. Основы теории полета космических аппаратов. Под ред. Нариманова Г.С., Тихонравова М.К. – М.: «Машиностроение», 1972.

В.А. Дикарев, А.Ю. Кикина, Ю.С. Чеботарев, А.Н. Симбаев, Э.В.Никитов, Ю.С. Агаркова

РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОПЕРАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ВНЕКОРАБЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ КОСМОНАВТОВ: ВАРИАНТ, СПОСОБ СОГЛАСОВАННОСТИ, КОНТРОЛЬ ПРИМЕНЕНИЯ

ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина», п. Звездный городок, V.Dikarev@gctc.ru, A.Kikina@gctc.ru, Y.Chebotarev@gctc.ru, A.Simbaev@gctc.ru, E.Nikitov@gctc.ru, Y.Agarkova@gctc.ru

Аннотация

Рассматриваются в постановочной части вопросы, раскрывающие предлагаемый вариант робототехнического обеспечения операционной поддержки внекорабельной деятельности космонавтов, возможности и особенности достижения согласованности кинематических характеристик исполнительных и задающих устройств робототехнических систем антропоморфного типа и объективного комплексного контроля их применения. Приводятся причины рассогласованности между движениями космонавта-оператора, облаченного в задающее устройство копирующего типа, и кинематическими звеньями антропоморфного робота. Обозначены контуры способа обеспечения согласованности кинематических характеристик исполнительных и задающих устройств робототехнических систем антропоморфного типа для обеспечения точности управления, достижения подобия между движениями космонавта-оператора и антропоморфного робота в копирующем режиме. Представлены модель развития, результаты модернизации и предварительной апробации универсального компьютерного стенда робототехнических систем, потенциальные возможности создания и использования объективного комплексного контроля применения робототехнических систем антропоморфного типа.

Ключевые слова

Пилотируемый космический полет; робототехническое обеспечение; космический эксперимент; робототехническая система; роботизированный манипулятор; антропоморфный робот; коллаборативное применение; операционная поддержка; внекорабельная деятельность космонавтов; кинематическая характеристика; объективный комплексный контроль.

V.A. Dikarev, A.Yu. Kikina., Yu.S. Chebotarev, A.N. Simbaev, E.V. Nikitov, Yu.S. Agarkova

ROBOTIC PROVISION FOR OPERATIONAL SUPPORT OF ASTRONAUTS' EXTRAVEHICULAR ACTIVITY: OPTION, METHOD OF COORDINATION, CONTROL OF APPLICATION

FSBO «Yu.A.Gagarin Research&Test Cosmonaut Training Center», Star City, V.Dikarev@gctc.ru, A.Kikina@gctc.ru, Y.Chebotarev@gctc.ru, A.Simbaev@gctc.ru, E.Nikitov@gctc.ru, Y.Agarkova@gctc.ru

Abstract

The paper' formulation part covers the proposed version of robotic provision for operational support of cosmonauts' extravehicular activity, possibilities and features of achieving consistency of kinematic characteristics of the executive and master control devices of anthropomorphic robotic systems, and objective integrated control of their application. The reasons for mismatching movements of the cosmonaut-operator in a master garment of a copying type, and the kinematic links of an anthropomorphic robot are given. The way for ensuring the consistency of the kinematic characteristics of executive and master control devices of anthropomorphic robotic systems in order to ensure control accuracy and to achieve the similarity of movements of a cosmonaut-operator and an anthropomorphic robot in a master-slave mode is overviewed. The model of development, results of upgrading and preliminary testing of the general purpose computer stand of robotic systems as well as potentials for creating and using objective integrated control over application of anthropomorphic robotic systems are given.

Key words

Manned space flight; robotic support; space experiment; robotic system; robotic manipulator; anthropomorphic robot; collaborative application; operational support; extravehicular activity of astronauts; kinematic characteristics; objective integrated control.

Выполнение задач, направленных на обеспечение функционирования пилотируемых космических аппаратов (ПКА), исследование космических тел (Луны, Марса, астероидов) на начальной стадии представляется возможным за счет использования главным образом робототехнических систем (РТС). При этом при рассмотрении функциональных возможностей различных типов РТС возникает предложение совместного использования РТС для повышения универсальности робототехнического обеспечения, уменьшения времени на выполнение задач, минимизацию участия человека при выполнении внекорабельной деятельности (ВКД) в экстремальных условиях открытого космического пространства.

Технологии взаимодействия человека с РТС отражены и успешно апробированы в таких космических экспериментах, как «Контур-2» [1], «Робонавт-2» [2], «Испытатель» [3], где использовались и антропоморфные, и манипуляционные роботы. Следует отметить, что отсутствует опыт и наработки коллаборативного [4-6] применения отечественных РТС для обеспечения операционной поддержки внекорабельной деятельности космонавтов.

Предполагаемая научная новизна космического эксперимента (КЭ) «Теледроид» [7] на борту Российского сегмента Международной космической станции (РС МКС) заключается, в том числе:

− в разработке и изготовлении первого отечественного антропоморфного робота (АР), предназначенного для эксплуатации в условиях открытого космического пространства;

− в результатах исследования возможностей и особенностей интерактивного копирующего управления роботом космонавтом-оператором в условиях невесомости при помощи костюма управления (экзоскелета) с силомоментной обратной связью и тактильным очувствлением.

Появление роботизированного манипулятора (РМ) «European Robotic Arm» («ERA») в составе РС МКС представляет дополнительную возможность не только выполнения с его помощью задач по транспортировке АР КЭ «Теледроид», но и проведения экспериментальных исследований совместного их использования, как возможного варианта робототехнического обеспечения антропоморфного типа (АТ) для операционной поддержки ВКД космонавтов.

Востребованным способом управления антропоморфными робототехническими системами (АРТС) [3, 7], в которых в качестве исполнительных устройств (ИУ) используются АР, остается управление в «ручных режимах», реализуемое с помощью задающих устройств копирующего типа (ЗУКТ) посредством копирования действий космонавтов-операторов, облаченных в эти задающие устройства. Для достижения точности копирующих «ручных режимов» остается актуальным разрешение существующей проблемы обеспечения согласованности кинематических характеристик исполнительных и задающих устройств РТС антропоморфного типа.

Верификацию предлагаемого варианта робототехнического обеспечения для операционной поддержки ВКД космонавтов и способа согласованности кинематических характеристик исполнительных и задающих устройств АРТС предполагается выполнить на основании расширения концепции коммуникационного объединения тренажёра «Дон-ERA» и гидролаборатории с возможностью интеграции с модернизированным универсальным компьютерным стендом робототехнических систем (УКС РТС) ФБГУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина». В ходе предварительной апробации модернизированного УКС РТС подтверждена необходимость продолжения работ по его усовершенствованию, в том числе, в части доработки встроенных программно-аппаратных средств комплексного объективного контроля применения РТС.

Вариант робототехнического обеспечения операционной поддержки внекорабельной деятельности космонавтов

С учетом успешной интеграции многоцелевого лабораторного модуля (МЛМ) «Наука» с РС МКС появляется возможность работы с целевыми грузами через его шлюзовую камеру с использованием РМ «ERA» (рис. 1) [8, 9], в том числе, и при реализации на РС МКС КЭ по робототехнике.

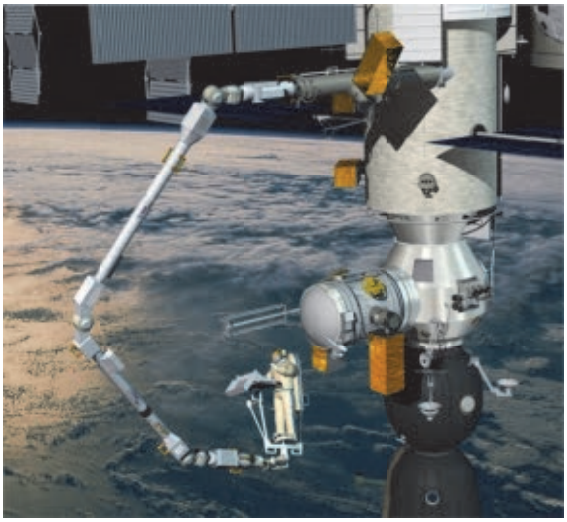


Рисунок 1 — Графическая модель роботизированного манипулятора «ERA»

В частности, с помощью РМ «ERA» при ВКД АР КЭ «Теледроид» может размещаться на универсальном рабочем месте на наружной поверхности модуля РС МКС. Причем, применение РМ «ERA» в рамках КЭ «Теледроид» расширяет спектр исследования возможностей использования дистанционно-управляемого АР для операционной поддержки деятельности космонавтов в условиях орбитального полета.

Эти исследования могут послужить научно-экспериментальным заделом по созданию технологии операционной поддержки ВКД космонавтов на борту орбитальной станции с помощью телеуправляемого АР совместно с РМ «ERA».

С появлением РМ «ERA» в составе РС МКС возникает возможность выполнения с его помощью задач по транспортировке АР КЭ «Теледроид» к месту размещения на универсальном рабочем месте на наружной поверхности модуля РС МКС. Эти задачи могут быть отработаны в рамках концепции коммуникационного объединения тренажёра «Дон-ERA» (рис. 2) [10] и гидролаборатории.

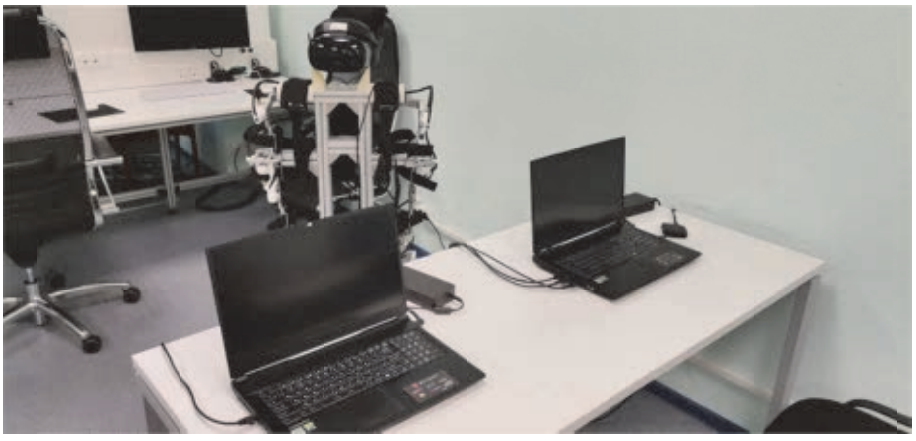
а) б)

Рисунок 2 — Специализированный тренажёр «Дон-ERA»: а) внешний вид; б) рабочие места

В такой концепции задачи по транспортировке целевых грузов на поверхности модуля МКС отрабатывались и, как следствие этого, космонавты готовы к их выполнению во время ВКД на поверхности МКС.

Задача по перемещению РМ «ERA» закрепленного к нему АР КЭ «Теледроид» в зоне рабочего места выполнения космонавтом ВКД на наружной поверхности модуля РС МКС в рамках одновременного совместного применения РМ «ERA» и АР не отрабатывалась. Для выполнения этой задачи необходимо специальное дополнительное устройство, к которому сможет крепиться и сопрягаться РМ «ERA» и АР КЭ «Теледроид», а для ее отработки – расширение концепции коммуникационного объединения тренажёра «Дон-ERA» и гидролаборатории с возможностью интеграции с УКС РТС (рис. 3) [11].

а)



б)

Рисунок 3 — Универсальный компьютерный стенд робототехнических систем: а) общий вид; б) мобильное автоматизированное рабочее место оператора

Необходимость совместного применения РМ и АР обусловлена и тем, что в процессе выполнения космонавтами ВКД возможны ситуации, когда космонавты вынуждены выходить из рабочей зоны АР, и тогда требуется с помощью РМ производить коррекцию местоположения АР, позиционируя его в ра-

бочую зону космонавта. Вопросы сопряжения АР КЭ «Теледроид» и РМ для коллаборативного использования совмещенной конструкции ранее в явном виде не рассматривались.

Следует учесть особенность конструкции РМ «ERA» – благодаря «сквозной» конструкции такелажного элемента (ТЭ), предназначенного для размещения на нем различного оборудования, РМ «ERA» может стыковаться к базовым точкам, расположенным на определенных участках внешней поверхности МКС вместе с ТЭ, обеспечивая тем самым электрическое и информационное взаимодействие собранной конструкции с бортовой вычислительной сетью МКС. При использовании задела в виде уже разработанного ТЭ, предлагается рассмотреть несколько вариантов компоновки РМ «ERA» и АР КЭ «Теледроид» с элементами специального дополнительного устройства для крепления и сопряжения АР КЭ «Теледроид» с РМ «ERA», как представлено на рис. 4.

В сложившихся условиях бортовая реализация задачи по перемещению АР КЭ «Теледроид» с помощью РМ «ERA» в зоне рабочего места космонавта при выполнении ВКД на наружной поверхности модуля РС МКС нереализуема, а ее отработка на имеющихся технических средствах подготовки космонавтов невозможна.

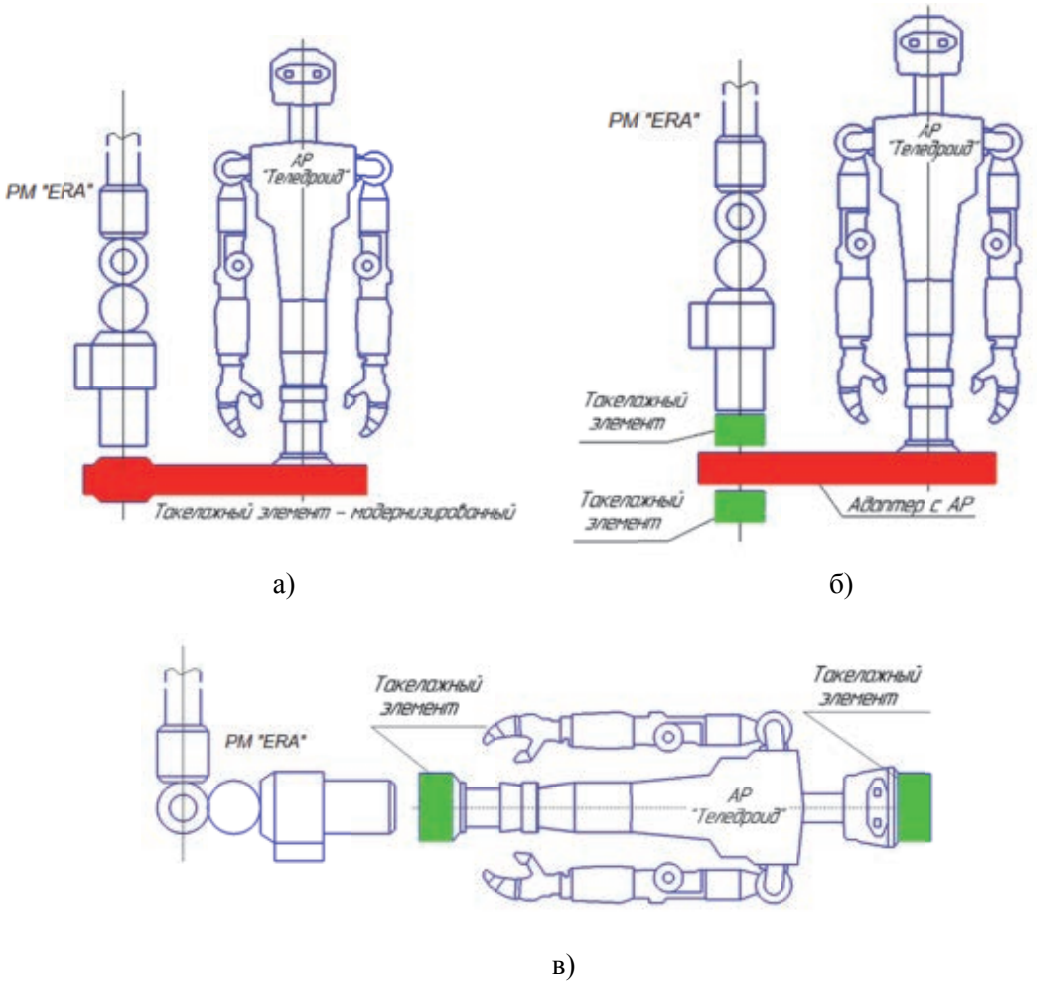


Рисунок 4 — Варианты компоновок стыковки РМ «ERA» к АР «Теледроид»: а) с помощью модернизированного ТЭ (новый элемент); б) с помощью двух ТЭ и адаптера АР (новый элемент); в) с помощью ТЭ, интегрированных в АР на стадии изготовления

Однако, такая задача является перспективной в интересах обеспечения коллаборативного взаимодействия космонавтов с РТС, в частности, при совместном применении РМ и АР, в перспективных пилотируемых космических полётах, в том числе, на новой Российской орбитальной станции, и поэтому требует проведения предварительных исследований возможностей и особенностей ее реализации.

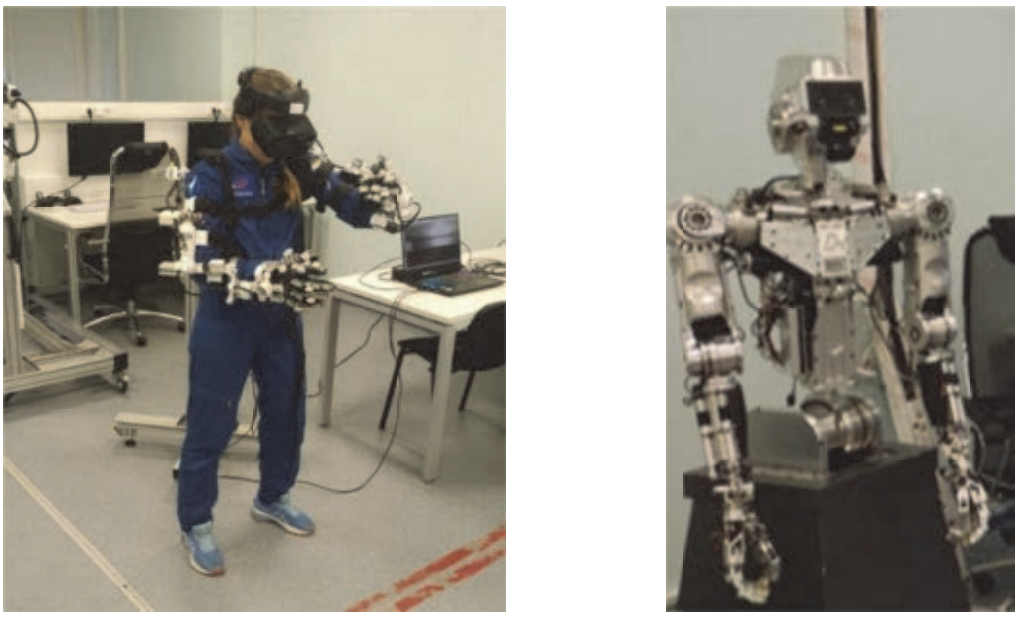
Способ согласованности кинематических характеристик исполнительных и задающих устройств робототехнических систем антропоморфного типа

Использование контура управления с задействованием ЗУКТ возможно применительно к агрессивной, опасной, связанной с рисками для здоровья и/или жизни человека среде. Дистанционное управление АР в копирующем режиме обеспечивает безопасное выполнение работы в условиях открытого космоса, с возможностью применения гибкого подхода к процессу выполнения полетных заданий (операций).

Одной из проблем управления АР в копирующем режиме является обеспечение точности управления, достижение полного подобия между движениями космонавта-оператора, облаченного в мобильный ЗУКТ (рис. 5а), и кинематическими звеньями АР (рис. 5б), образцы которых, например, применяются в УКС РТС [11].

Причем, ранее УКС РТС с технологическим макетом АР был успешно использован ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина» в процессе наземной подготовки космонавтов к бортовой реализации КЭ «Испытатель» [3]. Ввиду того, что при проведении экспериментальных исследований наблюдается рассогласованность движений космонавта-оператора, облаченного в ЗУКТ, и движений самого АР, «копирующий режим» может считаться условным, т.к. не обеспечивает полную адекватность копируемых АР движений.

На данную рассогласованность оказывают влияние ошибки (перед началом работы – калибровки, в процессе работы – систематические, случайные, накапливаемые и т.п.), в частности, измерений датчиков углового положения шарниров кинематических звеньев мобильного задающего устройства копирующего типа (ЗУКТ-М) УКС РТС, (рис. 6, 7), используемых для управления двигателями АР, точностные характеристики двигателей, отрабатывающих пространственное изменение кинематических звеньев АР по параметрам измерений датчиков ЗУКТ-М, ошибки вычислений в контуре управления и т.д.



а) б)

Рисунок 5 — Образцы применяемых ЗУКТ и АР в УКС РТС:а) космонавт-испытатель, облаченный в мобильный ЗУКТ; б) технологический макет АР

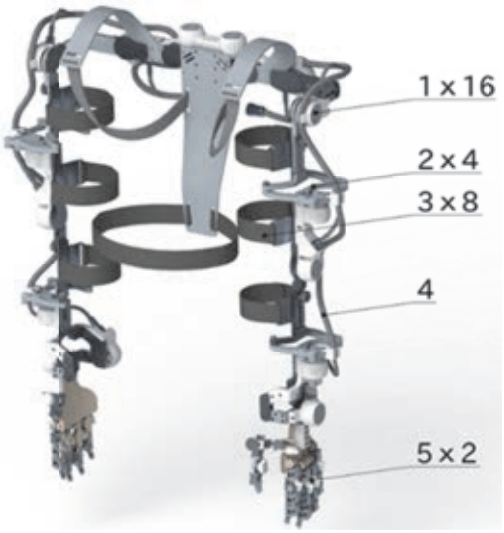


Рисунок 6 — Конструкция образца мобильного ЗУКТ-М УКС РТС: 1 – шарниры задающего устройства рук оператора с датчиками углового положения; 2 – узлы ротации; 3 – ремни для фиксации ЗУКТ-М на операторе; 4 – кабель; 5 – перчатка ЗУКТ-М

Перчатка ЗУКТ-М (рис. 7) представляет собой исполнительную группу звеньев (ИГЗ), закреплённых опорными пластинами на перчатке. Датчики углового положения расположены на ИГЗ каждого пальца перчатки. Обратная тактильная связь в перчатке реализуется с помощью пяти вибродвигателей, закрепленных на перчатке в зоне дистальной фаланги каждого пальца.

Рисунок 7 — Конструкция перчатки ЗУКТ-М: 1 – место расположения вибродатчиков; 2 – датчик углового положения; 3 – ИГЗ; 4 – основа перчатки

При проведении технического обслуживания УКС РТС и подготовки его к применению по назначению имеется возможность проверки с помощью программно-аппаратных средств [11] (рис. 8) текущего состояния калибровки углового положения универсального узла (рис. 9), который объединён с датчиком углового положения одним корпусом, присутствует на всех подвижных узлах ЗУКТ-М и обеспечивает поворот шарнира.

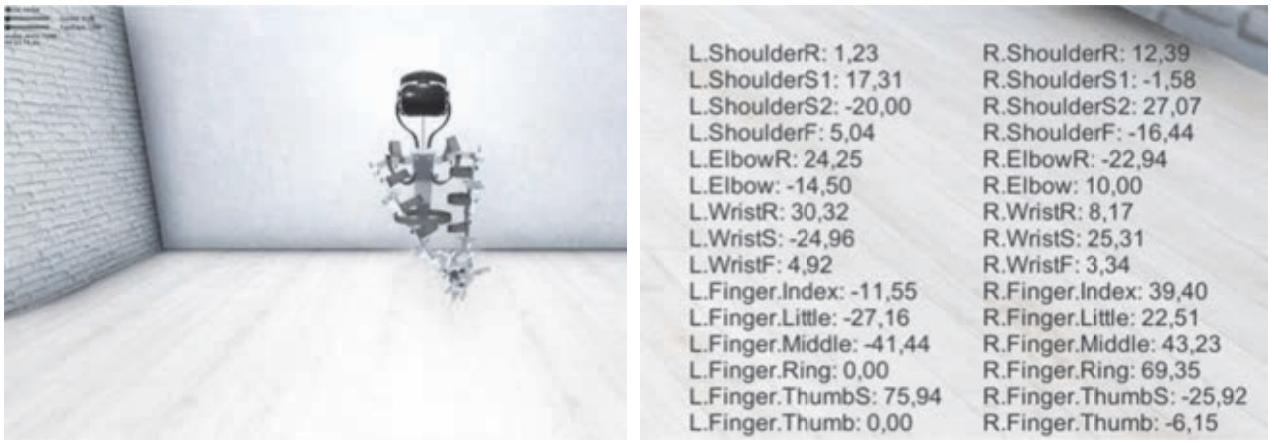


Рисунок 8 — Виртуальная модель ЗУКТ с отражением значений углов поворота кинематических звеньев

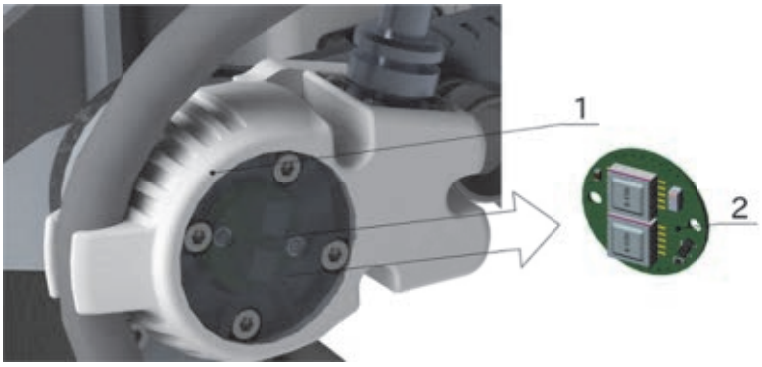


Рисунок 9 — Универсальный узел ЗУКТ-М: 1 – корпус универсального узла, 2 – датчик углового положения

Выявление рассогласованности углового положения универсальных узлов от соответствующих значений в таблице программного обеспечения указывает на гарантированное несоответствие управляющих движений с помощью ЗУКТ-М с движениями соответствующих звеньев АР.

Особое внимание следует обратить на то, что при удаленной работе оператора по управлению АР оценка точности управления и позиционирования кинематических звеньев АР, включая элементы ИУ (в частном случае схваты), осуществляется за счет технического зрения. Для этого совместно с ЗУКТ-М используется шлем виртуальной реальности (ШВР) (рис. 10), который предназначен для передачи оператору ЗУКТ-М стереоизображения рабочей зоны АР.

Рисунок 10 — Шлем виртуальной реальности для работы с ЗУКТ-М: 1 – ШВР; 2 – блок контроллера ЗУКТ-М; 3 – USB-кабель

В АРМ-М модуль контроллера ЗУКТ-М, функционирующий в составе ШВР, осуществляет сбор данных об угловых положениях шарниров ЗУКТ-М с 32 датчиков углового положения ЗУКТ-М. Передача этих данных в ноутбук (рис. 11) осуществляется по интерфейсу USB2.0. Обратная тактильная связь в ЗУКТ-М реализуется с помощью вибродвигателей, установленных в перчатках, которые начинают воздействовать на пальцы рук оператора при манипулировании предметами АР или 3D-моделью АР.

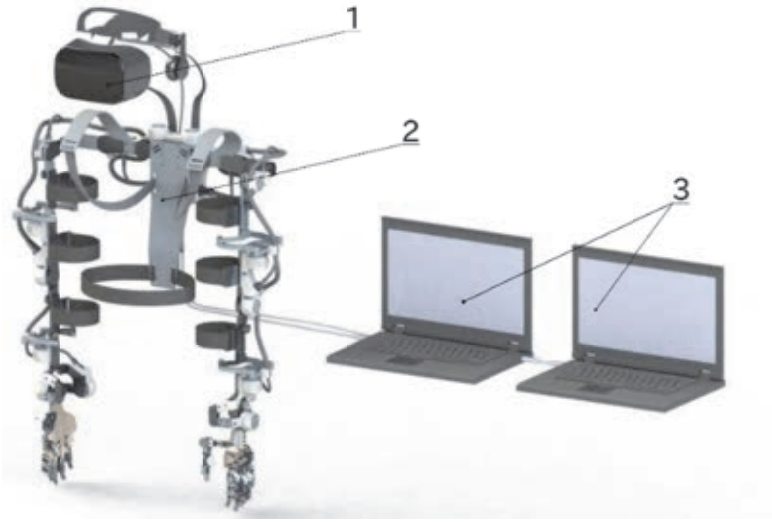


Рисунок 11 — Мобильное автоматизированное место: 1 – ШВР; 2 – ЗУКТ-М; 3 – ноутбуки

Сложность оценки точности управления и позиционирования кинематических звеньев АР заключается в том, что количество звеньев, линейные размеры, компоновка ЗУКТ с одной стороны, и управляемого АР с другой, как правило, отличаются.

Если условно пренебречь этими возможными ошибками, то, безусловно, можно считать, что полная кинематическая адекватность копирующего режима может быть достигнута за счет достижения полного сходства количества кинематических звеньев и их линейных размеров АР с количеством кинематических звеньев и их линейных размеров ЗУКТ. Для достижения полной кинематической адекватности копирующего режима не представляется возможным подобрать космонавта-оператора с соответствующими задающему устройству антропоморфными параметрами.

Для удобства облачения и работы космонавта-оператора в ЗУКТ-М предусмотрена возможность изменения линейных размеров некоторых кинематических звеньев задающего устройства под антропоморфные параметры конкретного космонавта-оператора (рис. 12).

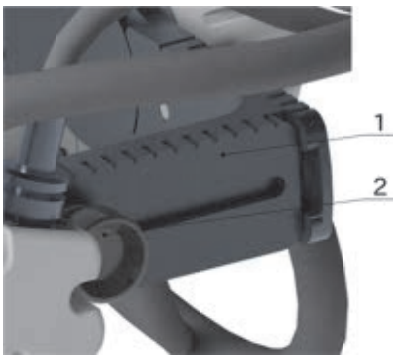
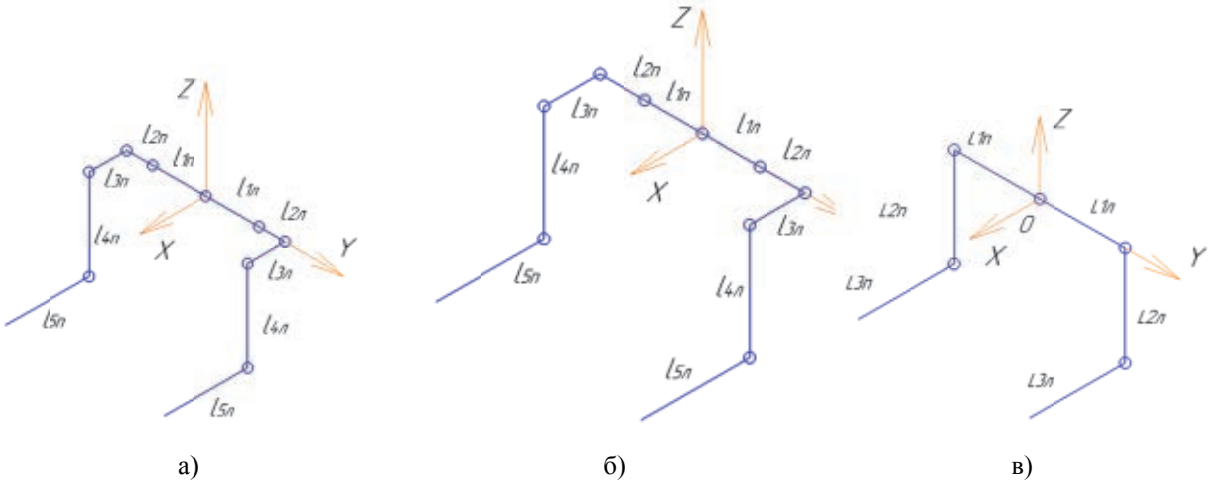


Рисунок 12 — Элементы для настройки длины звеньев: 1 – пластина с рисками; 2 – болт фиксации

Рисунок 13 — Узел ротации плеча предплечья ЗУКТ-М

В том числе, для этих целей предусмотрен узел ротации плеча и предплечья (рис. 13), выполненный в виде рычажного механизма с вынесенной осью поворота, что позволяет совместить ось ротации плеча/предплечья оператора и ЗУКТ-М.

Изменения линейных размеров некоторых кинематических звеньев задающего устройства (рис. 14) под антропоморфные параметры конкретного космонавта-оператора способствует ухудшению качества управления, и, как следствие, вызывает рассогласованность в действиях АР и космонавта-оператора, облаченного в ЗУКТ.



а) б) в)

Рисунок 14 — Аксонометрия кинематических схем ЗУКТ и АР: а) минимальные размеры кинематических звеньев ЗУКТ; б) максимальные размеры кинематических звеньев ЗУКТ; в) кинематическая схема АР

В целях избежания критической, приводящей к срыву выполнения заданий рассогласованности действий АР и космонавта-оператора, облаченного в ЗУКТ, требуется проведение предварительного сопоставления кинематических характеристик АР с соответствующими текущими кинематическими характеристиками ЗУКТ для определения параметров, демпфирующих потенциально возможные рассогласования.

Это позволит обеспечить согласованность кинематических характеристик исполнительных и задающих устройств АРТС под индивидуальные антропоморфные параметры космонавтов-операторов. Исследование и апробация механизмов по определению параметров, демпфирующих потенциально возможные рассогласования кинематических характеристик АР и ЗУКТ, планируется выполнять в ходе предварительного проектирования типовых полетных заданий (операций) ППКП [6] на УКС РТС [11]. Наличие таких апробированных механизмов обеспечит в процессе наземной подготовки основных и дублирующих экипажей к КЭ «Теледроид» [7] с использованием УКС РТС и образцов ЗУКТ и АР сформировать с учетом антропоморфных параметров космонавта «персональную базу данных». Это позволит демпфировать потенциально возможные рассогласования кинематических характеристик летных образцов, предварительно загруженного в лэптопы МКС, что обеспечит антропоморфную совместимость космонавтов с научной аппаратурой во время бортовой реализации КЭ и некоторую чистоту экспериментальных данных, полученных в ходе проведения КЭ «Теледроид».

Объективный комплексный контроль применения робототехнических систем антропоморфного типа

Модернизированный УКС РТС [11] планируется к использованию для проведения серии лабораторно-экспериментальных исследований, в том числе, в интересах проектирования коллаборативного взаимодействия космонавтов с РТС [5]. Для этого, в целях повышения качества объективного комплексного контроля (ОКК) и обеспечения возможности воспроизведения с помощью виртуальных интерактивных 3D-моделей таких исследований в ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина», проводятся работы по разработке информационной системы (ИС) регистрации результатов (РР) лабораторно-экспериментальных исследований взаимодействия космонавтов с РТС. Полученный опыт, в том числе в процессе подготовки космонавтов к бортовой реализации КЭ «Испытатель» [3], использования УКС РТС для выполнения элементарных технологических операций (нажатие кнопок, переключение тум-

блеров, захват используемых на борту ПКА инструментов и др.) как опытными операторами, так и людьми без навыков работы на подобных стендах, позволил сделать выводы об обучаемости операторов и о возможностях подготовки космонавтов с помощью УКС РТС к ППКП с применением РТС. На основании проведенных лабораторно-экспериментальных исследований взаимодействия космонавтов с РТС разработана модель развития УКС РТС (рис. 15) [11].

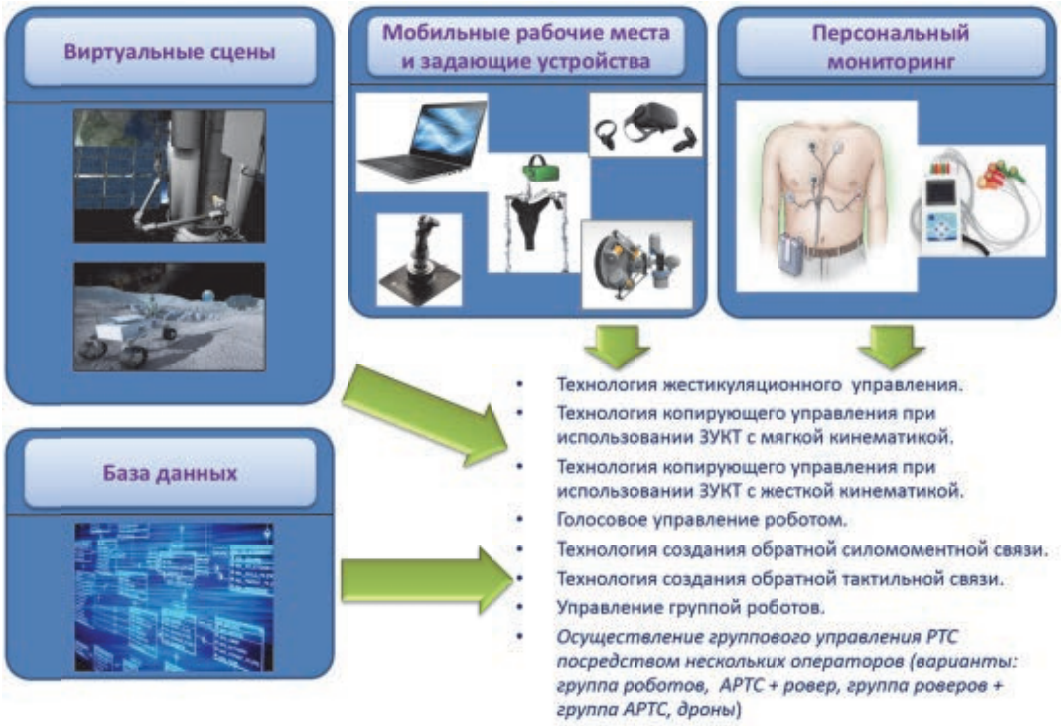


Рисунок 15 — Модель развития УКС РТС

В рамках этой модели одной из новых систем УКС РТС стала система медицинского контроля (СМедК) оператора, интерфейс которой изображен на рис. 16. Созданная на базе холтеровского монитора, СМедК оператора позволяет производить контроль физического состояния космонавта-оператора РТС по таким параметрам, как: электрокардиограмма (минимум в 3 отведениях); частота сердечных сокращений; пневмограмма и артериальное давление. СМедК оператора мобильна и может использоваться совместно с АРМ-М, входящим в состав УКС РТС.

Рисунок 16 — Интерфейс СМедК оператора

Результаты медицинского контроля хранятся в базе данных регистрации информации. Использование СМедК дает возможность более точного оценивания нагруженности операторов при выполнении различных типов задач в привязке ко времени, что, в свою очередь, позволит корректировать имеющиеся и разрабатывать новые методические рекомендации по подготовке космонавтов к управлению РТС в различных условиях. С целью обеспечения видеофиксации процесса подготовки космонавтов-операторов и проведения исследований их действий для дальнейшего разбора и устранения ошибок, стенд был дооснащен переносной видеокамерой.

Кроме этого, в составе УКС РТС появилась база данных результатов исследований (БДРИ), имеющая встроенные программно-аппаратные средства объективного контроля для фиксации данных процесса управления оператором с помощью одного из двух, имеющихся в составе УКС РТС, стационарного или мобильного ЗУКТ виртуальным АР (рис. 8, рис. 17).

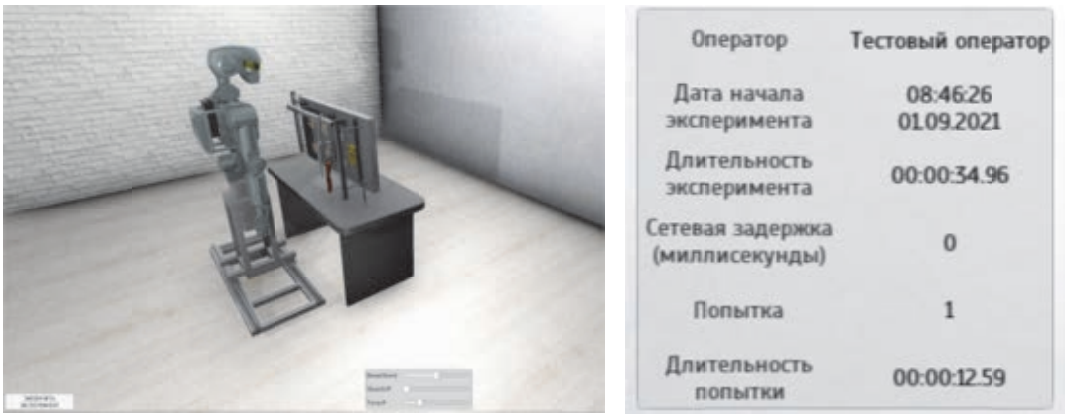


Рисунок 17 — Виртуальная сцена с отражением времени выполнения эксперимента

Эти средства позволяют формировать и накапливать в БДРИ информацию о выполнении операторами технологических операций при проведении экспериментальных исследований в видеоформате. Однако, имеющиеся формат данных не позволяет автоматически сформировать массив кинематических параметров ЗУКТ, следовательно, произвести оценку достижимости коллаборативного взаимодействия космонавтов с РТС [3] при выполнении операторами технологических операций.

По завершении модернизации УКС РТС [11] по инициативе научно-исследовательской лаборатории робототехнических и интеллектуальных систем для пилотируемых космических полётов (НИЛ РИСПКП) ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина» осуществлена предварительная апробация его потенциальных возможностей с участием космонавтов-испытателей отряда космонавтов ГК «Роскосмос» (рис. 4а, 18а) и членов экипажа эксперимента «SIRIUS 21» (рис. 18б) («Комплексное изучение адаптационных процессов, происходящих в организме человека при моделировании отдельных факторов космического полёта в условиях изоляции в гермообъекте с искусственной средой обитания») при отработке выполнения исследования «Использование робототехнических систем для поддержания операторской деятельности экипажей при реализации перспективных пилотируемых космических программ» по направлению «Космическая робототехника».

В ходе предварительной апробации модернизированного УКС РТС подтверждена необходимость продолжения работ по его усовершенствованию, в том числе, в части доработки встроенных программно-аппаратных средств объективного контроля в интересах создания ИС РР для обеспечения ОКК. В рамках этих работ совместно с АО «НПО «Андроидная техника» выполнена доработка существующих программно-аппаратных средств объективного видеоконтроля УКС РТС, позволяющих в виде синхронизированных видеопотоков формировать и накапливать в БДРИ данные о кинематических характеристиках ЗУКТ. В дальнейшем совместно с АО «НПО «Андроидная техника» планируется разработка программно-аппаратных средств объективного контроля, позволяющих формировать и накапливать в БДРИ данные о динамических характеристиках ЗУКТ, кинематических и динамических характеристи-

ках АР, синхронизированных с информацией системы видеоконтроля и СМедК. Разрабатываемая ИС РР применения РТС для обеспечения ОКК может стать инструментальным средством для фиксирования и накапливания кинематических и динамических характеристик исполнительных и задающих устройств различных РТС, характеристик нагруженности операторов. Это может способствовать формированию «расширенной базы данных» выполнения операторами технологических операций при проведении экспериментальных исследований, их детализации по элементам, а затем – применению РТС под контролем оператора или автономно. Этим может быть расширена возможность впоследствии управлять роботами не только локально с борта ПКА, но и дистанционно, например, с Земли, выводя управляющую программу роботу в виде как отдельного действия, так и последовательности команд. ИС РР применения РТС может стать дополнительным инструментарием для отбора кандидатов в космонавты и пролонгированного отбора космонавтов к ППК с применением РТС.

а) б)

Рисунок 18 — Апробация АРМ-М УКС РТС: а) космонавтом-испытателем А.В. Федяевым на выставке форума «Армия-2021»; б) членами экипажа эксперимента «SIRIUS 21» О.В. Блиновым и В.В. Кириченко

Предложен вариант робототехнического обеспечения антропоморфного типа для операционной поддержки ВКД космонавтов, заключающийся в совместном коллаборативном применении РМ и АР. В ситуации, когда космонавты при работе с оборудованием на поверхности РС МКС вынуждены выходить из рабочей зоны АР, появляется возможность с помощью РМ производить коррекцию местоположения АР относительно космонавтов, чтобы его рабочая зона была в области досягаемости космонавтов. Данный вариант является перспективным для пилотируемых космических полётов, в том числе, на новой Российской орбитальной станции, и поэтому требует проведения предварительных исследований возможностей и особенностей его реализации в интересах обеспечения коллаборативного взаимодействия космонавтов с РТС.

Представлен в эскизном виде способ достижения согласованности кинематических характеристик исполнительных и задающих устройств РТС антропоморфного типа, который направлен на избежание критической, приводящей к срыву выполнения заданий рассогласованности действий АР и космонавта-оператора, облаченного в ЗУКТ. Для этого требуется проведение предварительного сопоставления кинематических характеристик АР с соответствующими текущими кинематическими характеристиками ЗУКТ для определения параметров, демпфирующих потенциально возможные рассогласования. Это позволит обеспечить согласованность кинематических характеристик исполнительных и задающих устройств АРТС под индивидуальные антропоморфные параметры космонавтов-операторов.

Показаны возможности создания ИС РР применения РТС как инструментария обеспечения ОКК, что позволяет фиксировать и накапливать кинематические и динамические характеристики исполнительных и задающих устройств различных РТС, характеристики нагруженности операторов. Формирование «расширенной базы данных» выполнения операторами технологических операций позволит ис-

пользовать ее не только для локального управления роботами с борта ПКА, но и дистанционно, например, с Земли.

Литература

1. Контур-2: эксперимент. – https://tsniimash.ru/science/scientific-experiments-onboard-the-isrs/cnts/experiments/kontur_2/ (дата обращения 07.02.2022).

2. Робонавт: эксперимент. – https://tsniimash.ru/science/scientific-experiments-onboard-the-isrs/cnts/experiments/robonavt_/ (дата обращения 07.02.2022).

3. Испытатель: эксперимент. – https://tsniimash.ru/science/scientific-experiments-onboard-the-isrs/cnts/experiments/ispytatel/ (дата обращения 07.02.2022).

4. Дикарев В.А., Чеботарев Ю.С. К проектированию компонентов коллаборативного взаимодействия космонавтов с робототехническими системами для пилотируемых космических полетов. /Пленарные и избранные доклады Десятого Международного Аэрокосмического Конгресса «IAC'2021» (26-31 августа 2021 г.). – М.: РИА, 2021. – С. 253-258.

5. Чеботарев Ю.С., Дикарев В.А., Харламов М.М. Некоторые аспекты коллаборативного взаимодействия космонавтов с антропоморфными робототехническими системами для пилотируемых космических полетов. /XIV Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2021): материалы XIV мультиконференции (Дивноморское, Геленджик, 27 сентября – 2 октября 2021 г.): в 4 т. /Южный федеральный университет [редкол.: И. А. Каляев, В. Г. Пешехонов и др.]. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2021. – Том 1. – С. 215-217.

6. Чеботарев Ю.С., Дикарев В.А. О некоторых направлениях обеспечения коллаборативного взаимодействия космонавтов с робототехническими системами для пилотируемых космических полетов. //Труды международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника» (Proceedings of the International scientific and technological conference «Extreme robotics»). – 352 с. – 10.31776/ConfER.32.2021. – С. 65-77.

7. Теледроид: эксперимент. – https://tsniimash.ru/science/scientific-experiments-onboard-the-isrs/cnts/experiments/teledroid/ (дата обращения 07.02.2022).

8. Белоножко П.П. Космическая робототехника. Современное состояние, перспективные задачи, тенденции развития. Аналитический обзор. /Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электронный журнал. – 2016. – № 12. – С. 110-153.

9. Начата интеграция 11-метровой роборуки ERA в состав МКС. – https://3dnews.ru/1049695/nachata-integratsiya-robotizirovannoy-11metrovoy-ruki-era-v-sostav-mks (дата обращения 07.02.2022).

10. Специализированный тренажер «Дон-ERA». – http://www.gctc.ru/main.php?id=2892 (дата обращения 07.02.2022).

11. Предпосылки и результаты модернизации универсального компьютерного стенда робототехнических систем / В.А. Дикарев, В.А. Довженко, Э.В. Никитов, Ю.С. Чеботарев. // Пилотируемые полеты в космос. – №4 (41)/2021. – С 36-47.

К.Г. Райкунов

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ АВТОМАТИЧЕСКИХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НА НАЧАЛЬНОМ ЭТАПЕ РАЗВЁРТЫВАНИЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ НАУЧНОЙ СТАНЦИИ НА ПОВЕРХНОСТИ ЛУНЫ

АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения», г. Королёв, RaykunovKG@tsniimash.ru

Аннотация

Для создания и обеспечения длительного функционирования долгосрочной автоматической научной станции на поверхности Луны [1] недостаточно обеспечить лишь доставку её составных элементов. При поэтапном увеличении размерности и длительности эксплуатации станции возникают потребности не только в дополнительных космических средствах для её развёртывания, но и в средствах обслуживания. Учитывая высокую стоимость и длительность создания автоматических космических средств представляется целесообразным рассмотреть возможность создания унифицированных базовых платформ мобильной робототехники для реализации с их помощью программы фундаментальных исследований, прикладных экспериментов и решения задач обслуживания инфраструктуры долгосрочной научной станции на поверхности Луны. Использование данных унифицированных платформ позволит сократить сроки изготовления отдельных космических аппаратов за счет серийности и преемственности технических решений.

Разработка российской программы исследования и освоения Луны должна основываться на идеологии создания базового состава средств, который позволит сохранить устойчивость программы в случае изменения приоритетов исследований и состава научных и прикладных задач. Номенклатура базовых платформ космических средств должна формироваться с учётом максимальной гибкости характеристик и востребованности этих средств для научных исследований Луны как космического тела и исследования глубокого космоса с поверхности Луны, проведения технологических экспериментов [2].

Ключевые слова

Луноход, космическая робототехника, Луна, лунная база, лунная научная станция, ровер.

K.G. Raykunov

GOALS AND OBJECTIVES OF ROBOTIC SPACECRAFT AT THE PRIMARY STAGE OF A ROBOTIC SCIENTIFIC STATION ON THE LUNAR SURFACE DEPLOYMENT

Central Research Institute for Machine Building (JSC TSNIIMASH), RaykunovKG@tsniimash.ru

Abstract

To deploy a robotic scientific station on the lunar surface [1] and ensure its long-term operation, it is not enough to deliver its constituent elements. With a gradual increase in the station dimensions and duration of its operation, there arises a need for additional spacecraft not only for its deployment, but also for its maintenance. Taking into account the high cost and duration of robotic space vehicles development and construction, it seems reasonable to consider the possibility of unified basic mobile robotics platforms development to implement a fundamental research and applied experiments program, to solve the tasks of a long-term scientific station on the lunar surface infrastructure maintenance. The use of such unified platforms will reduce the individual spacecraft development time due to the unification and continuity of technical solutions.

The development of Russian lunar research and exploration program should be based on the principals of development of a list of baseline spacecraft which would provide flexibility and sustainability of the program in case of scientific priorities and the list of scientific and applied tasks changes. The list of baseline spacecraft platforms should be formed to provide maximum performance flexibility and ensure demand for these

spacecraft to explore the Moon as a space body, explore deep space from the lunar surface and perform technological experiments. [2].

Key words

Lunar rover, space robotics, Moon, Moon base, lunar scientific station, rover.

Создание исследовательской инфраструктуры на поверхности Луны является следующим этапом программы исследования Луны, который следует за разовыми миссиями. Переход от разовых краткосрочных миссий к постоянно действующей научной базе на поверхности Луны является закономерным шагом в плане экспансии человека в более глубокий космос за пределы низких околоземных орбит, где эксплуатируется в настоящее время Международная космическая станция (МКС). Луна является близким и доступным полигоном для отработки технологий, которые могут позволить обеспечить создание посещаемой или постоянно обитаемой базы на Луне, создать и отработать технологии для исследования дальнего космического пространства и пилотируемых миссий к Марсу.

Возможные варианты развития архитектуры автоматической научной станции на поверхности Луны

На первом этапе развёртывания автоматической лунной научной станции должны быть реализованы единичные пуски миссий с доставкой орбитальных автоматических космических аппаратов (АКА) и посадочных АКА. На данном этапе производится отработка лунной транспортной системы, которая должна обеспечить надёжную доставку грузов на поверхность Луны и выведение КА на орбиту Луны. На посадочных АКА размещается научная аппаратура (НА) начальной программы экспериментов, которая будет функционировать непосредственно на борту посадочной платформы или в её окрестности. Кроме того, на посадочных АКА может быть доставлена и мобильная робототехника, использование которой значительно расширит область исследований, поскольку может позволить транспортировать и размещать НА на значительном удалении от посадочной платформы.

Вторым этапом формирования лунной научной станции можно считать создание обеспечивающей инфраструктуры на Луне, подразумевающей наличие штатных унифицированных средств обеспечения функционирования научной аппаратуры и её обслуживания. На данном этапе должны использоваться унифицированные стандарты электропитания, интерфейсы сопряжения научной аппаратуры, стандарты связи и ретрансляции, средства обслуживания. При этом могут быть рассмотрены различные парадигмы формирования научной станции. Элементы автоматической научной станции могут быть размещены концентрированно в одном районе, а могут быть разбиты на несколько специализированных плацдармов:

- в низких широтах на видимой стороне Луны для решения задач астрономии, наблюдений Земли и Солнца, проведения опытных работ по отработке технологий освоения;
- в приполярной зоне для использования преимуществ наличия постоянно освещенных и постоянно затененных районов, для наблюдений Солнца, Земли, астрофизических объектов;
- на обратной стороне Луны, в зоне, максимально защищенной от радиопомех, для размещения радиотелескопа;
- в уникальных зонах, например, вблизи лавовых труб или магнитных аномалий для их углублённого исследования.

Кроме того, отдельно может быть рассмотрена парадигма комплексирования двух вышеуказанных подходов. В таком случае возможно одновременное наличие одной централизованной части автоматической научной станции и размещение на значительном удалении отдельных элементов её научной инфраструктуры с высокой степенью автономности. В первую очередь это относится к телескопам и датчикам, требующим минимизации помех для наблюдения, и малым автоматическим научным станциям, которые могут быть доставлены на одном посадочном АКА и разнесены луноходом.

На первых этапах создания автоматической научной станции наиболее востребованными будут научные луноходы. По мере роста числа элементов в составе автоматической научной станции на вто-

ром этапе её развития может появиться необходимость в создании специального робототехнического средства их обслуживания на поверхности Луны. Для внедрения технологий обслуживания на научной лунной станции должны быть предусмотрены общие подходы к разработке размещаемой на ней научной и служебной аппаратуры. Она должна быть разработана изначально ремонтопригодной и сборно-разборной с возможностью проведения всех сервисных операций в автоматическом режиме.

В задачи лунохода обслуживания автоматической научной станции входит не только проведение инспекционных, регламентных и ремонтных работ, но и регулярные работы по разгрузке автоматических унифицированных грузовых платформ, развертыванию доставленной научной аппаратуры, в том числе на значительном удалении от зоны посадки, подключению её к обслуживающей инфраструктуре (подключение кабельного питания, кабельных средств информационного обмена в случае невозможности организации беспроводных интерфейсов), доставке и погрузке образцов экспериментов на взлётную ракету для доставки их на Землю.

Кроме того, на этапе появления пилотируемых лунных средств внедрение автоматических робототехнических средств обслуживания позволит повысить процент научно-технической и исследовательской деятельности космонавтов за счет сокращения объема рутинных работ, выполняемых экипажами космических аппаратов (КА) при внекорабельной деятельности и внутри гермоотсеков, повысить безопасность выполняемых операций, расширить перечень робототехнических операций, обеспечивающих обнаружение и ликвидацию нештатных и аварийных ситуаций, а также обеспечить поддержку внутри- и внекорабельной деятельности космонавтов при выполнении исследовательских и технологических операций на поверхности Луны, а в перспективе и других планет.

Таким образом, помимо решения научных задач существует необходимость решения значительного объёма задач, носящих прикладной характер, к которым можно отнести следующие задачи космической робототехники:

- контроль состояния обслуживаемых объектов;
- перестыковка модулей космических станций и кораблей;
- монтажно-демонтажные работы;
- парирование нештатных ситуаций;
- проведение ремонтно-восстановительных работ;
- обслуживание целевых и служебных систем космической станции;
- строительство защитных сооружений;
- техническое обслуживание элементов станции;
- сборка крупногабаритных космических комплексов.

Приоритетные автоматические средства для программы освоения поверхности Луны

С целью формирования научной программы исследования и освоения Луны Советом РАН по космосу были разработаны предложения в «Программу исследования и освоения Луны на период до 2030 года и дальнейшую перспективу», среди которых можно выделить следующий перечень приоритетных научных направлений:

- выбор места и принципов функционирования лунной базы (поиск залежей воды и летучих, поиск других полезных ресурсов, отработка технологий in-situ, определение толщины реголита и размеров пустот, исследование влияния факторов среды на лунной поверхности, медико-биологические исследования на Луне, исследование лавовых труб, …);
- уточнение происхождения и эволюции Луны (анализ грунта до глубины 30 м., сейсмометрия, гравиметрия, магнитометрия, тепловой мониторинг, …);
- поиск межзвездного вещества (комет) на Луне (исследование межзвездной и межпланетной пыли, исследование мест падений комет – поиск воды, минералов, соединений, …);
- исследования Солнца и Земли (исследование короны Солнца и солнечного ветра, наблюдение Земли с Луны, …);

– исследования дальнего космоса (радиоастрономия на обратной стороне Луны, спектрометрия космических лучей, …).

Для ряда экспериментов и проектов, предложенных Советом РАН по космосу, размещение научной аппаратуры на Луне позволит преодолеть ряд существенных ограничений, сопутствующих проведению исследований на Земле или на орбитальных КА, и получить принципиально новые недоступные для существующих проектов результаты.

В работе [2] на основе анализа Предложений Совета РАН по космосу в «Программу исследования и освоения Луны на период до 2030 года и дальнейшую перспективу» произведена оценка востребованности различных платформ АКА для выполнения предложенных научных задач, результаты которой показаны на рисунке 2. В рамках данных предложений выделено 17 направлений исследований (некоторые эксперименты объединены в одну группу). В столбце «Доля решаемых научных задач» приведено процентное отношение числа научных задач, которые могут быть решены с помощью рассматриваемого космического средства, к общему числу задач. Для посадочных платформ в скобках на рисунке 1 также указаны значения этого параметра с учётом необходимости доставки на лунную поверхность луноходов соответствующей размерности.

Базовая платформа	Размерность	Масса ПН	Научные задачи																Доля решаемых научных задач, %
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
Посадочная платформа	Лёгкая	300-500 кг	или	или	или	или	или							и	или		и			53,0% (58,8%)
	Тяжёлая	1-2 т								или					или			и		17,6% (82,3%)
	Сверхтяжёлая	6 т													или				и	11,7% (23,5%)
Взлётно-посадочная платформа (МБВПК)	Лёгкая	~ 20 кг													или					5,8%
	Средняя	100 кг; на орбиту Луны 50 кг	или	или	или	или	или	и		и	и		и		или					52,9%
Луноход-ровер	Луноход для лавовых труб	до 40 кг						и												5,8%
	Лёгкий m ~ 300 ± 50 кг	50-60 кг			или						или				или		или			23,5%
	Лёгкий m ~ 500 кг	50 - 100 кг	или	или	или	или	или				или				или		или			47,0%
	Тяжелый	200 кг	или	или	или	или	или	и			или		и	и	или		или			70,5%
	Сверхтяжёлый	Геолог: НА ~5 т; ГМ: ~500кг								или					или					11,7%
		Строитель: НА ~300 кг; ГМ: ~ 4т													или			и	и	17,6%
Орбитальная платформа	-						и								и					17,6%

– Научная задача может быть решена с помощью рассматриваемого космического средства.
– Научная задача может быть частично решена с помощью рассматриваемого космического средства.
– Посадочная платформа задействована в ходе доставки других средств.
и – Рассматриваемое космическое средство необходимо для решения научной задачи.
или – Научная задача может быть решена одним из рассматриваемых космических средств.
ГМ – Грузоподъёмность манипулятора.

Рисунок 1 — Востребованность различных лунных автоматических космических средств для решения приоритетных научных задач [2]

Из рисунка 1 можно видеть, что наиболее востребованной мобильной платформой для решения проанализированных задач является платформа тяжёлого лунохода (массой 1 – 2 т.), которая может быть использована для решения 70,5% приоритетных научных задач программы исследования и освоения Луны.

Платформа лёгкого лунохода с массой порядка 500 кг задействована в решении 47% задач, однако более легкие её модификации, с массой порядка 300 кг могут принять эффективное участие в решении лишь 23,5% задач. Существенное уменьшение процента решаемых задач при снижении массы лёгкого лунохода вызвано существенным уменьшением оценочного резерва полезной нагрузки для такой платформы.

В тех экспериментах, где необходимо размещение малогабаритной научной аппаратуры в качестве полезного груза мобильных передвижных платформ, анализ массово-габаритных характеристик этой аппаратуры показал, что для проведения большинства таких экспериментов достаточно будет использования лёгкого лунохода. Однако задействование тяжелого лунохода может позволить успешно совместить выполнение задач нескольких лёгких луноходов в рамках одной миссии, что делает его ис-

пользование более эффективным. Кроме того, при наличии на лёгком луноходе манипулятора масса транспортируемой им ПН будет весьма значительной , что существенно осложняет его использование для развёртывания элементов автоматической лунной базы. Принимая во внимание, что лёгкий луноход востребован в основном для фундаментальных исследований и мало востребован для задач развёртывания автоматической научной станции в рамках данной статьи далее будет рассмотрено использование луноходов на тяжелой и сверхтяжёлой платформе.

Приоритетные научные эксперименты, для проведения которых требуются робототехнические средства

Анализ перечня приоритетных задач по мнению РАН показал, что значительную часть экспериментов можно выполнить за счет использования автоматических космических средств без привлечения космонавтов. При этом характеристики научной аппаратуры и условия проведения экспериментов в значительной мере определяют функциональные и технические требования к автоматическим средствам для их развёртывания. В связи с этим планирование научных экспериментов должно осуществляться, исходя не только из их научной актуальности, но и из готовности разрабатываемых космических средств. Таким образом многие приоритетные в настоящее время научные задачи могут быть решены не на первом этапе создания автоматической научной станции, а на более поздних этапах, если они требуют большой грузоподъёмности средств доставки и развертывания или большого энергопотребления, которое сложно обеспечить солнечными батареями. В частности, к энергоёмким задачам относятся технологические эксперименты по добыче и переработке полезных ископаемых, к экспериментам с большой требуемой грузоподъёмностью средств доставки и развертывания можно отнести, например, эксперимент НЕЙТРОНИЙ (НИИЯФ МГУ).

Для конкретизации задач робототехники и определения предварительных требований к ней можно рассмотреть, в качестве примера некоторые эксперименты, по которым опубликовано развернутое описание и которые получили широкое обсуждение на Совете РАН по космосу и обладают признанной высокой актуальностью и научной значимостью.

В частности, упомянутый выше эксперимент НЕЙТРОНИЙ (НИИЯФ МГУ) предназначен для изучения космических лучей сверхвысоких энергий [3] и подразумевает перемещение по лунной поверхности модулей с массами 100 – 500 кг (в зависимости от модификаций), при этом площадь для установки одного модуля составляет порядка 1 квадратного метра. При этом, помимо погрузочных работ необходимо проведение выравнивания лунной поверхности для обеспечения надёжного контакта детекторов на максимальной площади и заглубление элементов конструкции.

Эксперимент ФИАН «Корона-Л» (солнечная обсерватория) из серии экспериментов «Корона» [4] – телескоп для коронографических исследований Солнца. Среди публикаций по этой теме можно выделить зарубежный аналог - First Lunar Outpost, проект был предложен NASA [5], масса коронографа составляла порядка 100 кг. Лунная солнечная обсерватория должна была быть создана в три этапа. На начальной фазе в состав обсерватории должны были быть включены солнечный УФ-телескоп, телескоп мягкого рентгеновского диапазона и также простой базовый пакет инструментов для наблюдения Солнца в высоких энергиях. На второй фазе в состав инструментов должны были быть включены коронографы, а также должен был быть существенно усилен набор инструментов для физики высоких энергий. Оценки массы и энергопотребления обсерватории на трёх этапах представлены в таблице 1.

Таблица 1 — Оценка массы и энергопотребления обсерватории проекта First Lunar Outpost по этапам [5]

Фаза	Масса, кг	Энергопотребление, Вт.
1	2 500	3 000
2	38 500	15 000
3	82 500	30 000

Согласно докладам, сделанным на Совете РАН по космосу, российский проект «Корона-Л» по оценкам обладает значительно меньшей массой и может быть доставлен пуском к Луне двух модулей – целостата и коронографа, которые будет необходимо установить с высокой точностью. Установка платформы должна быть произведена на плоской части возвышенности, либо на подготовленном плоском участке лунного грунта. Точность выдерживания посадочной плоскости – 1 градус. Выравнивание платформы производится по входящим в её состав оптическим визирам с использованием в качестве ориентиров объектов небесной сферы. Следующим шагом является установка платформы для монтажа коронографа. Так как зеркала целостата являются плоскими, то есть не влияют на фокусное расстояние системы, к точности установки платформы не предъявляется значительных требований. Платформа коронографа может быть установлена в любом месте при условии видимости из этого расположения места размещения целостата. Расстояние между двумя платформами при установке может быть выбрано любым в диапазоне 100 ± 50 метров, где 100 метров – оптимальное расстояние, а 50 – диапазон допустимых отклонений. Впоследствии, при установке самого коронографа, он юстируется под фактическое расстояние. Требования к точности установки платформы коронографа такие же, как и к точности установки платформы целостата – посадочная плоскость с точностью 1 градус с возможностью её измерения по объектам звёздного неба. Так как коронограф является электрическим прибором, размещение также должно производиться с учётом возможности обеспечения прибора питанием в данной точке.

Рисунок 2 — Антенна решетки OVRO-LWA

Эксперимент «Лунный низкочастотный радиотелескоп» (ИКИ РАН, ФИАН) предполагает размещение на поверхности Луны массива антенн и также требует проведения предварительных работ по подготовке поверхности. Масса одного элемента оценивается на уровне 5-10 кг, количество элементов от 300 до 1000. В случае доставки большого числа малых антенн может потребоваться выравнивание больших площадей, измеряемых квадратными километрами. В качестве иллюстрации можно привести наземный эксперимент LEDA & OVRO-LWA для наблюдения темных веков на рисунке 2 и станцию NenuFars - Новое расширение в модернизируемой станции LOFAR (New Extension in Nançay Upgrading LOFAR) на рисунке 3.

В части планетарных исследований ГЕОХИ РАН предлагает проект по созданию сети малых автономных научных станций (АНС), которые выполнены в форме единого модуля и могут быть доставлены автоматическими грузовыми посадочными платформами и потом разнесены на значительные расстояния от места посадки и установлены луноходом. При этом в составе АНС могут быть:

- стационарный сейсмометр;
- стационарный глубинный каротажный термозонд;
- стационарный гравиметр;
- стационарный магнитометр;
- температурный датчик для измерения температуры на поверхности;

- детектор космических лучей и солнечного ветра;
- обзорная фото и видеокамера (ТВ-спектрометр) ;
- уголковый отражатель для лазерной навигации;
- радиомаяк для радионавигации;
- электростанция на радиоизотопном источнике;
- центральная станция управления (ЦСУ).

Рисунок 3 — Центральная группа из шести станций радиотелескопа LOFAR

Помимо предложения ГЕОХИ РАН есть и другие проекты изучения внутренней структуры Луны. В частности, проект «Сейсмо-ЛР» [6] подразумевает установку сейсмометра на поверхности Луны в месте посадки АКА для проведения сейсмических и гравиметрических измерений. Масса прибора вместе с термостатом оценивается в 5 – 6 кг, размеры 400×400×500 мм. Площадь под прибор ~ 600×600 мм. При установке необходима первоначальная настройка прибора – выставка его по местной гравитационной вертикали с точностью до 10 угл. мин.

Кроме того, имеется значительный перечень задач, носящих научный интерес вне привязки к конкретным экспериментам:

1. Отбор образцов лунного грунта.

Одной из задач будет являться отбор и доставка на Землю образцов лунного грунта для их исследования в лабораторных условиях, что представляет интерес не только с точки зрения фундаментальной науки, но и для решения задач прикладного характера, включая разработку методов аддитивного производства на Луне, моделирование процессов извлечения из реголита полезных ресурсов и другие. Использование лунохода позволит провести исследование удаленных от посадочного аппарата областей лунной поверхности и может дать возможность отобрать уникальные образцы из большего разнообразия типов лунных пород со значительно большей площади.

При работе в автоматическом режиме луноход должен осуществлять анализ и документированный сбор представляющих интерес для изучения объектов на лунной поверхности по маршруту своего движения. При этом каждый отобранный образец должен помещаться в отдельную ячейку и сопровождаться данными о времени и координатах места забора, физических условиях, фотографией. Таким образом, могут быть отобраны фрагменты пород, выброшенных при образовании крупных лунных кратеров или ударных бассейнов.

2. Проведение тематической геологической, геохимической и геофизической съемки, включающей проведение магнитометрии, гравиметрии и других исследований.

Проведение тематической съемки с необходимым крупномасштабным разрешением вдоль трассы движения лунохода по заранее разработанному маршруту позволит получить информацию, необходимую для геологического и морфологического картирования лунной поверхности в окрестности взлетно-посадочного корабля. Полученные таким образом данные могут внести важный вклад в понимание происхождения и эволюции Луны как планетного тела, построение моделей её внутреннего строения, гравитационного и магнитного полей.

3. Проведение программы исследований и экспериментов в окрестности района посадки на удалении от посадочного аппарата (проведение научных экспериментов, установка и настройка научной аппаратуры).

Одной из задач может являться проведение глубокого каротажного бурения на глубину до 15 метров с отбором стратифицированных колонок реголита с последующей доставкой отобранных образцов на Землю. После отбора на базе пробуренной скважины может быть развернута, в том числе АНС, представляющая собой комплекс научных приборов, состав которых представлен выше, размещаемых непосредственно в скважине и на поверхности. Такие АНС должны быть установлены на достаточном удалении друг от друга, образуя общую сеть. По мере увеличения числа установленных станций будет повышаться информативность сети, точность и достоверность моделей, формируемых на основании данных, получаемых в результате проводимых измерений.

Ещё одной задачей является установка сейсмометров для проведения пассивных измерений, а также закладка по маршруту следования и последующий дистанционный подрыв зарядов по заданной программе с целью проведения активного сейсмического эксперимента. Сейсмические исследования необходимы для оценки распределения плотностей лунных недр, мощности лунной коры, получения данных о наличии, размере и физическом состоянии ядра Луны.

4. Оснащение места планируемого развёртывания лунной базы навигационными комплексами.

Важной практической задачей является установка в окрестности района посадки навигационных комплексов (радиомаяков, уголковых отражателей, реперов и т.п.) для формирования общей сети баллистико-навигационного обеспечения на поверхности Луны. Наличие такой сети позволит повысить точность посадки, определения координат и параметров орбит автоматических и пилотируемых аппаратов исследования и освоения Луны.

5. Проведение экспериментальных исследований по отработке перспективных технологий на поверхности Луны.

Луноход может выступать в роли технологической лаборатории. На платформе лунохода может быть размещено съёмное технологическое оборудование для проведения экспериментов по запеканию лунного грунта, отработке различных аддитивных технологий (включая 3D-печать из лунного реголита), а также экспериментальные установки по переработке лунного реголита с целью добычи полезных компонентов (вода, кислород, металлы и т.д.) и другое.

Таким образом, по результатам проведенного анализа можно видеть, что использование платформы тяжёлого лунохода может позволить решить достаточно широкий спектр научных задач и прикладных задач для развёртывания и обслуживания автоматической научной станции на поверхности Луны. Однако для решения ряда задач требуется не только высокая масса транспортируемой луноходом полезной нагрузки, но и высокая грузоподъёмность манипулятора – порядка 500 кг, что может быть реализовано на базе сверхтяжёлого лунохода.

Возможные задачи тяжёлого научного лунохода

Данный аппарат может послужить на первом этапе для проведения геологических и фундаментальных исследований, собрать на своём пути значительное количество образцов лунного грунта и результатов бурения и доставить их к месту посадки беспилотного возвращаемого аппарата. По результатам работ, проведённых с использованием тяжёлого научного ровера, может быть уточнена зона высадки космонавтов и уточнён район размещения будущей посещаемой базы на поверхности Луны.

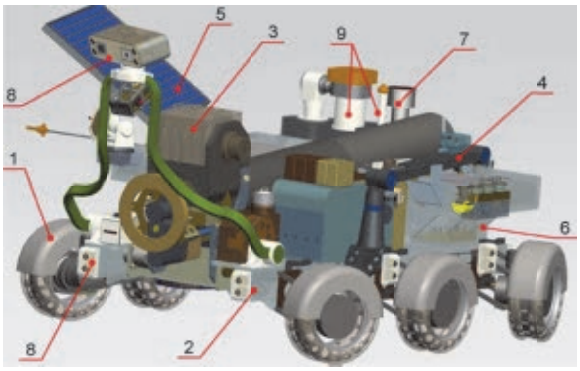


Рисунок 4 — Проект тяжёлого научного лунохода «Робот Геолог», разрабатываемый ЦНИИ РТК, ГЕОХИ РАН и АО «ЦНИИмаш»

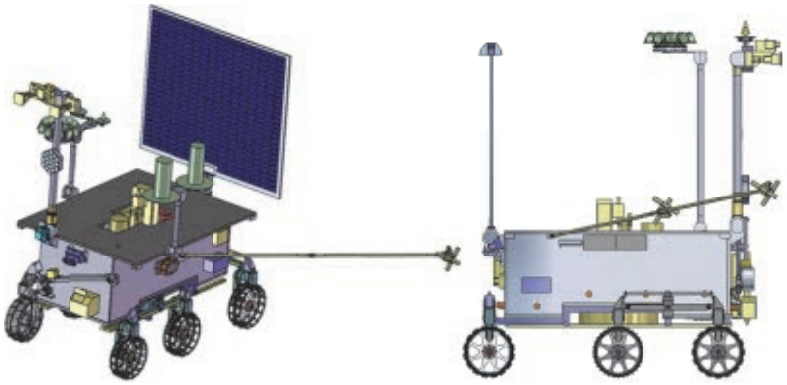


Рисунок 5 — Проект тяжёлого лунохода, разрабатываемого НПО им. Лавочкина и АО «ЦНИИмаш»

Тяжёлый научный луноход должен обеспечивать выполнение следующих задач:

– доставка и транспортировка научного оборудования на поверхность Луны для проведения исследований, работа с научным оборудованием, электропитание научной аппаратуры;

– проведение колонкового бурения вдоль маршрута движения с забором стратифицированной колонки реголита и последующим каротажем скважины;

– проведение криогенного бурения с целью забора грунта;

– сбор и погрузка образцов осколочных материалов с помощью манипулятора;

– сбор и журналирование образцов реголита (отдельная ячейка для каждого образца, каждый образец сопровождается описанием времени, места и координат забора, физических условий, фотографией);

– установка по маршруту и подрыв взрывчатых веществ по заданной программе с целью проведения активного сейсмического эксперимента;

– фотографирование местности и макрофотографирование объектов;

– оценка запасов полезных ресурсов;

– измерения радиационной обстановки;

– возможность исследования лавовых труб;

– перегрузка и установка АНС долговременного мониторинга контейнерного типа;

– луноход должен иметь возможность функционировать в постоянно затенённых участках на дне кратеров, где температура может опускаться до температур порядка -230°C.

Одним из вариантов облика тяжёлого научного лунохода является проект лунохода «Робот Геолог», разрабатываемый ЦНИИ РТК, ГЕОХИ РАН и АО «ЦНИИмаш», предварительный облик которого показан на рисунке 4, и тяжёлый научный луноход, разрабатываемый НПО им. Лавочкина и АО «ЦНИИмаш», предварительный облик которого показан на рисунке 5.

Возможные задачи тяжёлого сервисно-технологического лунохода

На базе шасси тяжёлого лунохода может быть создан ровер обслуживания инфраструктуры на

поверхности Луны. Сервисно-технологический ровер обслуживания может выступать, например, в роли мобильной технологической лаборатории. На данной платформе может быть размещено технологическое оборудование для проведения экспериментов по запеканию лунного грунта, отработке различных аддитивных технологий (включая 3D-принтинг из лунного реголита) и другое. По окончанию программы экспериментов беспилотный возвращаемый КА или космонавт может доставить результаты на Землю.

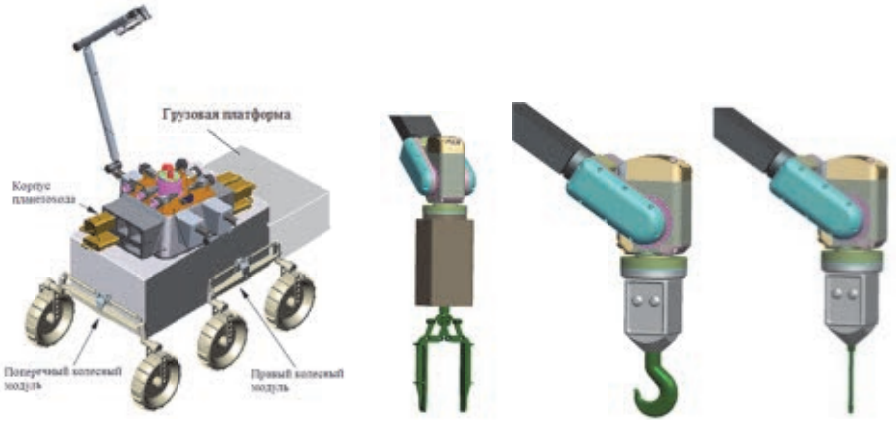


Рисунок 6 — Возможный облик сервисного лунохода, на платформе лунохода НПО им. Лавочкина с использованием средств робототехнического обеспечения ЦНИИ РТК

Рисунок 7 — Возможный облик сервисного лунохода, разрабатываемого ЦНИИ РТК

Помимо проведения технологических экспериментов возможно проведение ремонтных работ, в том числе при помощи удалённого управления манипулятором со сменными инструментами. Ровер такого класса мог бы позволить не только производить обслуживание посещаемой инфраструктуры (наносить защитные покрытия, заменять расходные элементы, устранять повреждения обшивки конструкции, заменять и перепрокладывать кабели по поверхности и прочее), но и транспортировать малые полезные грузы, менять оснастку других роверов и осуществлять частично их ремонт и обслуживание.

Обслуживание объектов лунной инфраструктуры с помощью сервисных луноходов является важнейшей задачей, т.к. может позволить существенно продлить сроки функционирования обслуживаемых объектов, тем самым уменьшая потребность в изготовлении и запуске новых образцов (взамен утративших работоспособность), что может позволить снизить затраты на создание и поддержание лунной инфраструктуры.

Возможные задачи сверхтяжёлого лунохода строителя

Начиная со второго этапа развития лунной автоматической станции, которая будет иметь модульную архитектуру построения, возникает потребность в специальной технике, которая будет способна осуществлять строительные работы и перемещать тяжёлые грузы. Во избежание столкновений и повреждений крупногабаритные модули будут доставляться на поверхность Луны на расстоянии друг от друга. После обеспечения мягкой посадки необходимо будет снять их с посадочной платформы, транс-

портировать друг к другу и состыковать при помощи лунного транспортно-грузового манипулятора. Транспортно-грузовой манипулятор может быть установлен на сверхтяжёлой мобильной платформе.

Создание базовой платформы ровера сверхтяжёлого класса (порядка 5-6 т) с элементами телеуправления и искусственного интеллекта существенно расширит возможности не только по освоению, но и по исследованию Луны. Наличие даже одного такого ровера с манипулятором может позволить использовать сменное оборудование для проведения широкого спектра работ (кран, ковш, буровая установка для бурения на глубину до 15 метров).

Таким образом, рассматриваемая платформа может обеспечить развертывание крупноформатных обсерваторий на поверхности Луны, установку тяжелых научных инструментов (в числе предлагаемых РАН экспериментов присутствуют задачи, требующие размещения на лунной поверхности научных инструментов массой порядка 4 тонн), обеспечить постановку экспериментов, которые не могут быть осуществлены с помощью АКА более легкого класса.

После посадки на лунную поверхность луноход должен иметь возможность:

– производить строительные работы, связанные с установкой тяжёлых конструкций и элементов инфраструктуры автоматической научной станции на поверхности Луны;

– произвести расчистку посадочной площадки для приема грузовых кораблей и пилотируемых лунных взлетно-посадочных комплексов;

– проводить эксперименты по экскавации реголита;

– проводить опытное рытье котлованов и траншей;

– проводить пробную транспортировку реголита на различные расстояния;

– производить отработку способов использования реголита как строительного материала (обваловка и обсыпка обитаемых помещений);

– транспортировать крупногабаритное научное, промышленное и технологическое оборудование;

– проводить подъемно-такелажные работы краном;

– осуществлять буксировку тележек с тяжелым технологическим оборудованием;

– проводить работы манипулятором;

– предоставлять электропитание для промышленного технологического оборудования;

– осуществлять фотографирование местности и макрофотографирование объектов;

– проводить опытные работы по извлечению из реголита летучих имплантатов (водород, кислород, вода, гелий-3 и т.п.);

– проводить опытные работы по извлечению из реголита химически связанных элементов (кислород, кремний, металлы);

– проводить эксперименты по термообработке реголита (спекание, плавление);

– производить отработку элементов грунторойной и строительно-монтажной техники;

– проводить погрузку результатов экспериментов на взлётный модуль;

– функционировать под управлением наземного пункта.

Предварительные проработки в инициативном порядке уже проводятся в НПО им. Лавочкина совместно с АО «ЦНИИмаш».

В работе показано, что для исследования и освоения поверхности Луны целесообразно создание платформы тяжёлого лунохода, которая является более эффективной, чем платформа лёгкого ровера с точки зрения её функциональных возможностей и перспектив применения на последующих этапах освоения.

Разработка унифицированной тяжёлой мобильной платформы позволит в последующем с минимальными затратами и использованием отработанных технических решений создать на её базе тяжёлые роверы различной узкой специализации:

– научно-технологический ровер, с возможностью разведки полезных ресурсов, решения картографических и прочих прикладных задач, в том числе проведения фундаментальных научных экспериментов со сменной научной аппаратурой, а также технологических экспериментов (например, за-

пекание грунта, аддитивные технологии и др.), может являться мобильной лабораторией, сопровождающей космонавтов во время миссий на поверхности Луны;

– ровер обслуживания первых элементов посещаемой инфраструктуры, который мог бы расставлять навигационные маяки, менять сменное оборудование, расходные элементы посещаемых модулей и т.д.

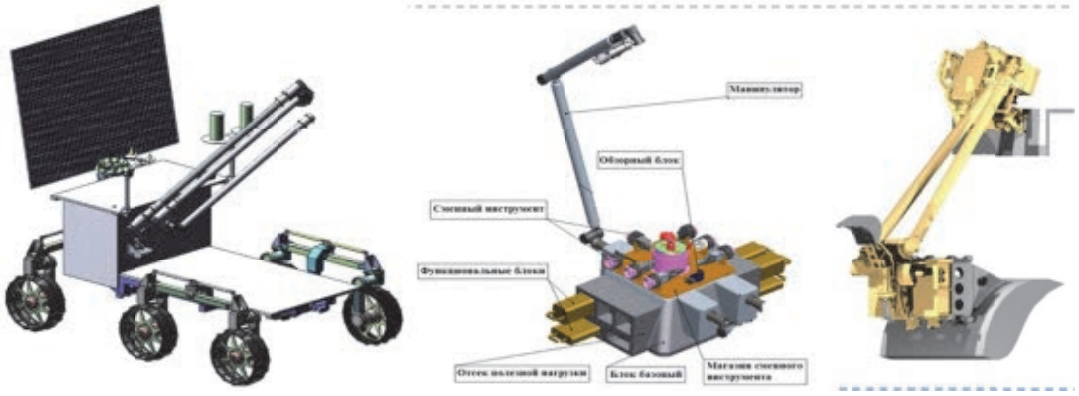


Рисунок 8 — Возможный вид лунохода строителя, разрабатываемого НПО им. Лавочкина и АО «ЦНИИмаш», с возможностью использования средств робототехнического обеспечения ЦНИИ РТК

На основе анализа задач, которые могут быть поставлены перед лунной робототехникой и обзора приоритетных экспериментов, были сформированы, в первом приближении, функциональные требования для робототехнических средств, которые могут быть задействованы на первом этапе развёртывания автоматической научной станции на поверхности Луны.

Для ряда экспериментов, которые можно отнести ко второму этапу развертывания автоматической научной станции, т.е. на этапе создания обеспечивающей инфраструктуры на Луне, подразумевающей наличие штатных унифицированных средств обеспечения функционирования научной аппаратуры и её обслуживания, может быть необходимо использование платформы сверхтяжёлого лунохода. Грузоподъёмность манипулятора такого лунохода должна составлять не менее 500 кг для реализации экспериментов с тяжёлой научной аппаратурой.

Литература

1. К.Г. Райкунов, «Возможности российских лунных автоматических миссий для поддержки будущих пилотируемых полётов к Луне» («Capabilities of Russian lunar robotic missions to support future manned spaceflights to the Moon», сборник тезисов докладов IAC-2017, Аделаида, Австралия, 2017г.

2. Ю. С. Бодрова, Г. Ф. Карабаджак, К. Г. Райкунов, «Мобильные платформы космической робототехники, их приоритетные задачи и возможные сценарии использования для поддержки российской программы пилотируемого освоения Луны», Сборник трудов конференции «Экстремальная робототехника 2019», Санкт-Петербург, 2019 г.

3. «Научный комплекс на поверхности Луны НЕЙТРОНИЙ-100», НИИЯФ МГУ, [Электронный ресурс] URL: http://www.sinp.msu.ru/ru/project/17397.

4. «ПРОЕКТ КОРОНА», [Электронный ресурс] URL https://www.lebedev.ru/ru/mezhdunarodnoe-sotrudnichestvo/proekt-korona.html.

5. Charles P. Sonett. Report of the Ad Hoc Working Group on Apollo Experiments and Training on the Scientific Aspects of the Apollo Program / Charles P. Sonett // National Aeronautics and Space Administration – December 15, 1963 – FOREWORD [Электронный ресурс] URL: https://www.lpi.usra.edu/lunar/documents/SonettReport.pdf.

6. «Сейсмические исследования Луны Программы Луна – Ресурс, Луна – Глоб», ИКИ РАН, [Электронный ресурс] URL: http://www.iki.rssi.ru/conf/2011-lg/2/presentations_pdf/1_DAY/20110531_Manukin(IFZ)_SeismoScience.pdf.

Е.В. Власенков, Н.М. Хамидуллина

ОЦЕНКА РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ДАТЧИКИ ЭФФЕКТА ХОЛЛА В ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ РАБОТЫ В СОСТАВЕ ЛУНОХОДОВ И НА ВНЕШНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПЕРСПЕКТИВНОЙ РОССИЙСКОЙ ОРБИТАЛЬНОЙ СЛУЖЕБНОЙ СТАНЦИИ

АО «НПО им. С.А. Лавочкина», г. Химки, veb@laspace.ru

Аннотация

В докладе представлен подход обеспечения требований по стойкости к дозовым эффектам электродвигателей в робототехнических системах и приводах перспективного российского лунохода «Геолога-разведчика» на примере испытанного на стойкость к дозовым эффектам электродвигателя EC-max22 фирмы «Maxon motor» (Швейцария). Также, проведена оценка дозовой нагрузки на электродвигатели антропоморфного робота нового поколения, предназначенного для работы в открытом космосе на внешней поверхности перспективной российской орбитальной служебной станции (РОСС).

Ключевые слова

Ионизационная доза, датчики положения ротора на основе эффекта Холла, луноход, манипулятор, роботизированная система, радиоизотопный источник.

E.V. Vlasenkov, N.M. Khamidullina

ESTIMATION OF RADIATION IMPACT ON HALL EFFECT SENSORS IN ELECTRIC MOTORS OF ROBOTIC SYSTEMS FOR OPERATION AS PART OF MOON ROVER AND ON THE EXTERNAL SURFACE OF THE PROSPECTIVE RUSSIAN ORBITAL SERVICE STATION

Lavochkin Association, Khimki, Moscow region, Russia, veb@laspace.ru

Abstract

The report presents an approach to ensuring the requirements for resistance to dose effects of electric motors in robotic systems and drives of the prospective Russian Moon rover "Reconnaissance Geologist" using the example of the EC-max22 electric motor tested for resistance to dose effects by Maxon motor (Switzerland). Also, an assessment was made of the dose load on the electric motors of a new generation anthropomorphic robot designed to work in open space on the outer surface of a prospective Russian orbital service station (ROSS).

Key words

Ionizing dose, rotor position sensors based on the Hall effect, moon rover, manipulator, robotic system, radioisotope source.

В России, Китае и других странах разрабатываются программы исследования и освоения Луны, включая строительство обитаемых лунных научных станций. Начальным этапом изучения мест предполагаемого размещения лунной станции является проведение поисково-разведочных работ с применением среднего автоматического лунохода «Геолога-разведчика», имеющим в своем составе роботизированные устройства, приводимые в движение электродвигателями [1].

Современные условия развития российской космонавтики ускорили создание РОСС на которой возможно применение антропоморфного робота нового поколения [2]. На предполагаемой орбите функционирования РОСС будут повышенные радиационные нагрузки на электронные компоненты по сравнению с орбитой международной космической станции (МКС), что требует более обстоятель-

ного подхода в определении дозового воздействия на электродвигатели приводных систем и антропоморфного робота нового поколения, работающего на внешней поверхности РОСС.

Возможным техническим решением является использование в приводах направленной антенны, системы технического зрения и манипулятора бесколлекторных электродвигателей, имеющих в своем составе датчики положения ротора на основе эффекта Холла (в дальнейшем – датчик Холла). Одним из лидеров в производстве электродвигателей для применения в космосе является швейцарская фирма «Maxon motor», и в определенных приводных системах космического назначения применяется электродвигатель EC-max22 этой фирмы (рис. 1).

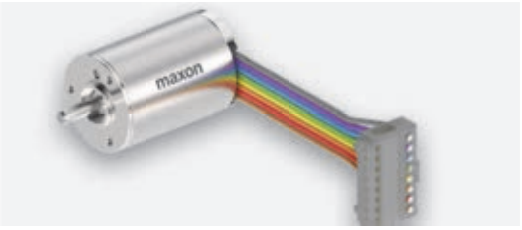


Рисунок 1 — Электродвигатель EC-max22

Определенный в ходе радиационных испытаний уровень стойкости к воздействию фактора 7.К1 и 7.К4 по ГОСТ РВ 20.39.414.2 составляет 1,61E+04 рад (16,1 Крад), что с учетом нормы испытаний соответствует суммарному значению 7,00E+03 рад (7,0 Крад).

Выполненный анализ причины отказа по результатам проведенных радиационных испытаний на стойкость к дозовым эффектам данного электродвигателя показывает, что стойкость электродвигателя определяется стойкостью датчика Холла. Таким образом, для определения допустимости применения электродвигателя, имеющего в своем составе такой датчик, необходимо корректно определить дозовую нагрузку в месте расположения электродвигателей за весь срок активного существования (САС) изделия.

Рассматриваемые приводные системы лунохода

В рассматриваемой конфигурации лунохода для прохождение периода лунной ночи и для обеспечения возможности проведения ряда научных экспериментов в условиях лунной ночи, имеется радиоизотопный термоэлектрический генератора (РИТЭГ). Проектный облик поисково-разведочного лунохода представлен на рисунке 2.

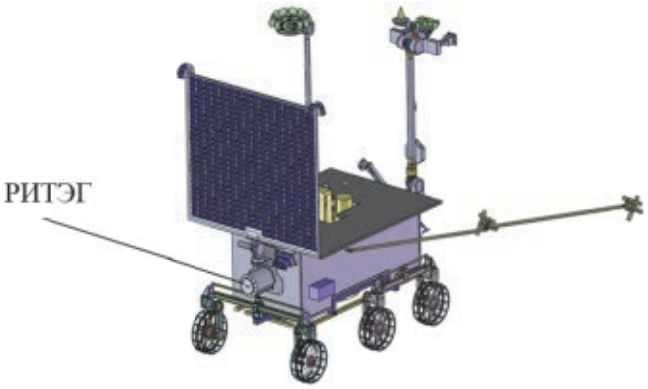


Рисунок 2 — Общий вид перспективного лунохода с РИТЭГ на борту

Также, в данной конфигурации лунохода размещен один радиоизотопный источник тепла (РИТ) на штанге технического зрения, обеспечивающий поддержание температурного режима бортовой аппаратуры (БА), входящей в состав системы автономного технического зрения (САТЗ), предназначенной для управления движением лунохода (рис. 3). Целесообразно рассмотреть дозовую нагрузку на типовые приводные системы лунохода: манипулятор, приводы антенны и солнечной батареи. Расположение расчетных точек представлено на рисунке 4.

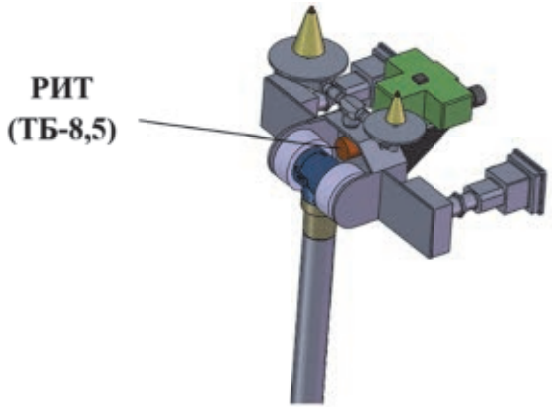


Рисунок 3 — Расположение РИТ на штанге технического зрения

Рисунок 4 — Расчетные точки

Рассматриваемые приводные системы РОСС

В связи с тем, что работы по созданию РОСС находятся на начальном этапе, рассмотрим в настоящей работе приводные системы перспективного антропоморфного робота и типовой привод направленной антенны. Рассматриваемые устройства представлены на рисунках 5-6.

Рисунок 5 — Антропоморфный робот

Рисунок 6 — Типовой привод антенны

Радиационные условия функционирования

Радиационные условия функционирования, в том числе, зависят от САС робототехнического устройства. Опыт современной мировой космонавтики говорит о том, что САС роверов может составлять 5 лет и более, а робототехнические устройства и приводы на внешней поверхности МКС функционируют, также уже более 5 лет. Таким образом, целесообразно рассматривать радиационные условия функционирования с САС 5 лет.

Луноход. На бортовую аппаратуру лунохода воздействует ионизирующее излучение космического пространства (ИИ КП) и радиоизотопных источников.

Расчеты параметров воздействия ИИ КП проводились с помощью программного комплекса «COSRAD» [3], основанного на моделях AE8 и AP8 для радиационных поясов Земли (РПЗ) [4], динамической модели ГКЛ [5], и вероятностной модели СКЛ [6]. Воздействие РПЗ кратковременно: заряженные частицы РПЗ вносят вклад в дозу только на коротком участке выведения КА с луноходом на межпланетную траекторию.

Результаты расчетов поглощенных доз (в Si) за сферическими защитными экранами (из Al) различной толщины от СКЛ и ГКЛ за 5 лет САС, протонов и электронов РПЗ на кратковременном этапе выведения на межпланетную траекторию, представлены в таблице 1.

Таблица 1 — Поглощенные дозы, рад

Толщина защиты (Al), г/см^2	СКЛ	ГКЛ	РПЗ		Суммарная поглощенная доза
			Электроны	Протоны	
1,00E-02	5,43E+05	8,06E-02	6,10E+03	4,40E+04	5,93E+05
3,16E-02	2,76E+05	5,06E-02	4,84E+02	4,98E+01	2,77E+05
1,00E-01	1,23E+05	4,06E-02	1,18E+01	6,29E-02	1,23E+05
3,16E-01	4,55E+04	3,73E-02	6,96E-02	6,59E-02	4,55E+04
1,00E+00	1,17E+04	3,77E-02	5,55E-02	3,62E-03	1,17E+04
3,00E+00	2,85E+03	3,63E-02	2,20E-02	0,00E+00	2,85E+03
1,00E+01	5,57E+02	3,37E-02	0,00E+00	0,00E+00	5,57E+02
3,16E+01	9,41E+01	2,63E-02	0,00E+00	0,00E+00	9,41E+01
1,00E+02	1,07E+01	2,27E-02	0,00E+00	0,00E+00	1,07E+01

Примечание: число 5,43E+05 читать как $5{,}43\times10^5$ рад

Радиоизотопные источники вносят вклад в поглощенную дозу в соответствии с расчетными данными о значениях мощности поглощенной дозы излучения в зависимости от расстояния до источника. Расчетные зависимости для РИТ и РИТЭГ представлены на рисунках 7-8.

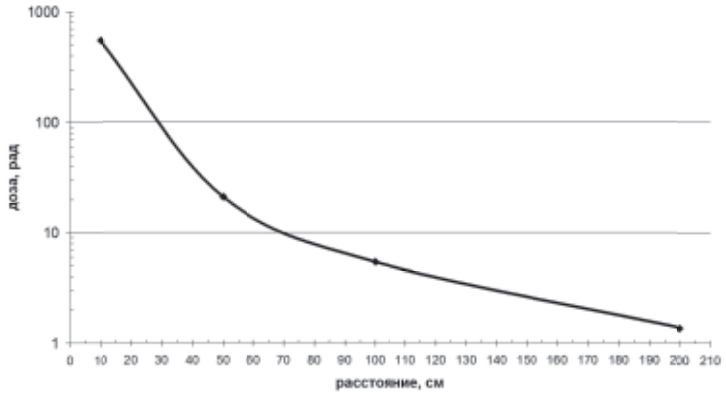


Рисунок 7 — Зависимость суммарной (от всех видов излучений) поглощенной дозы от расстояния до одного РИТ за 1 год САС

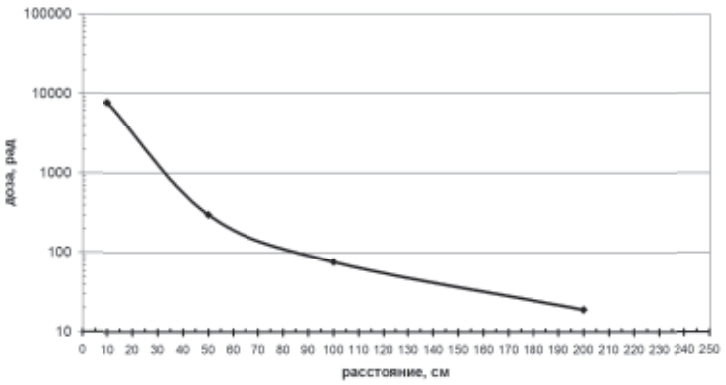


Рисунок 8 — Зависимость суммарной (от всех видов излучений) поглощенной дозы от расстояния до РИТЭГ за 1 год САС

РОСС. На приводные системы, установленные на внешней поверхности РОСС, воздействует только ИИ КП, параметры которого также рассчитаны помощью программного комплекса «COSRAD».

Результаты расчетов поглощенных доз (в Si) за сферическими защитными экранами (из Al) различной толщины от СКЛ и ГКЛ, протонов и электронов РПЗ за 5 лет САС представлены в таблице 2.

Таблица 2 — Поглощённые дозы, рад

Толщина защиты (Al), г/см^2	**СКЛ**	**ГКЛ**	**РПЗ**		**Суммарная поглощенная доза**
			Электроны	**Протоны**	
1,00E-02	1,35E+05	3,22E-01	8,55E+02	1,06E+02	1,36E+05
3,16E-02	7,01E+04	1,42E-01	4,32E+02	3,07E+01	7,06E+04
1,00E-01	3,14E+04	8,05E-02	1,27E+02	6,85E+00	3,15E+04
3,16E-01	1,14E+04	6,00E-02	2,37E+01	1,70E+00	1,14E+04
1,00E+00	2,88E+03	5,50E-02	1,57E+00	5,80E-01	2,88E+03
3,00E+00	7,22E+02	5,25E-02	1,61E-02	2,67E-01	7,22E+02
1,00E+01	1,51E+02	4,98E-02	7,15E-03	8,05E-02	1,51E+02
3,16E+01	2,81E+01	3,22E-01	8,55E+02	1,06E+02	1,36E+05
1,00E+02	3,68E+00	1,42E-01	4,32E+02	3,07E+01	7,06E+04
Примечание: число 1,35E+05 читать как $1{,}35\times10^5$ рад					

Результаты расчета локальных поглощенных доз

Расчет значений локальных поглощенных доз (ЛПД) в типовых приводных системах лунохода выполнялся с использованием, разработанного в АО «НПО Лавочкина» программного комплекса (ПК) «LocalDose&SEE»v.2 [7-8] который позволяет рассчитать значения ЛПД от ИИ КП методом секторирования и от всех типов радиоизотопных источников с использованием трехмерной модели КА.

Рассчитанные значения ЛПД в расчетных точках от всех действующих на луноход видов ионизирующего излучения за САС 5 лет на поверхности Луны представлены в таблице 3.

Таблица 3 — ЛПД в расчетных точках лунохода, рад

Наименование расчетной точки	**Накопленная ионизационная доза, рад**		**Суммарная накопленная ионизационная доза, рад**
	ИИ КП	**Радиоизотопные источники**	
Манипулятор	2,11E+04	7,55E+02	2,18E+04
Привод антенны	3,44E+04	1,43E+02	3,46E+04
Привод БС	2,11E+04	3,30E+03	2,44E+04

Расчет ЛПД в робототехнических устройствах РОСС выполнялся в соответствии с ОСТ 134-1034-2012 по «наихудшему случаю» при минимальной полной массовой толщине защиты (таблица 4).

Таблица 4 — Массовая защита робототехнических устройств РОСС

Наименование расчетной точки	**Толщина алюминиевой сферической защиты, мм**	**Массовая защита, г/см^2**
Антропоморфный робот	4	1,08
Приводные системы	2	0,54

Рассчитанные значения ЛПД в расчетных точках робототехнических устройств РОСС от ИИ КП представлены в таблице 5.

Таблица 5 — ЛПД в расчетных точках РОСС, рад

Наименование расчетной точки	Суммарная накопленная ионизационная доза, рад
Антропоморфный робот	2,79E+03
Приводные системы	5,25E+03

В соответствии с ОСТ 134-1034-2012 прибор, стойкость которого определена справочными данными (т.е. не проводились радиационные испытания), должен иметь коэффициент запаса не менее трех. Расчетные коэффициенты запаса рассматриваемых в настоящей статье устройств приведены в таблице 6.

Таблица 6 — Коэффициенты запаса

Наименование расчетной точки	Суммарная накопленная ионизационная доза, рад	Уровень стойкости, рад	Коэффициент запаса
Луноход			
Манипулятор	2,18E+04	7,00E+03	0,32
Привод антенны	3,46E+04	7,00E+03	0,20
Привод БС	2,44E+04	7,00E+03	0,29
РОСС			
Антропоморфный робот	2,79E+03	7,00E+03	2,51
Приводные системы	5,25E+03	7,00E+03	1,33

В работе рассмотрена дозовая нагрузка на электродвигатели приводов типовых робототехнических устройств, с учетом конфигурации лунохода, в которой для обеспечения функционирования в условиях приполярных областей Луны в составе применяется РИТ и РИТЭГ. Также рассмотрена дозовая нагрузка на электродвигатели приводов типовых робототехнических устройств для применения на внешней поверхности РОСС.

Рассчитанные значения ЛПД могут быть использованы для формирования требований к стойкости электропривода по дозовому эффекту на ранних этапах проектирования, а также для определения необходимости проведения радиационных испытаний.

Как показывает выполненный предварительный расчет ЛПД, при радиационной стойкости электродвигателя 7,0 Крад определяющейся стойкость датчика Холла, применение именно электродвигателя EC-max22 фирмы “Maxon motor” в рассматриваемых расчетных случаях возможно при условии увеличения коэффициенты запаса. Например, это можно реализовать следующими возможными конструктивными решениями:

- увеличения толщины корпуса прибора;
- рационального размещения в составе прибора с обеспечением максимальной защиты другими комплектующими прибора;
- введения в состав прибора локальной массовой защиты критичного элемента.

Стоит отметить, что в современных условиях во вновь разрабатываемых робототехнических устройствах космического применения необходимо использовать электродвигатели с датчиками Холла с известной радиационной стойкостью, определённой непосредственно по результатам проведения прямых радиационных испытаний образцов из закупленной партии электродвигателей для комплектования изделия.

Литература

1. Воронцов В.А., Крайнов А.М., Власенков Е.В., Черников П.С и др., Предложения по космическому аппарату с луноходом. Инженерный журнал: наука и инновации, 2016, вып. 5.

2. Тимофеев А.Н., Шардыко И.В. Проблемы применения в космосе антропоморфных роботов// Робототехника и техническая кибернетика, 2013. Вып. 1. С. 37-4.1

3. Кузнецов Н.В., Малышкин Ю.М., Н.И. Николаева Н.И., Ныммик Р.А. и др. Программный комплекс COSRAD для прогнозирования радиационных условий на борту космических аппаратов // Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ). Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, 2011. Вып. 2. С. 72-78.

4. Bilitsa D. Models of trapped particle fluxes AE8 (electrons) and AP8 (protons) in inner and outer radiation belts // National Space Science Data Center, PT-11B, 1996.

5. ГОСТ 25645.150-90. Галактические космические лучи. Модель изменения потоков частиц. М.: Госстандарт, 1991.

6. ГОСТ Р 25645.165-2001. Лучи космические солнечные. Вероятностная модель потоков протонов. М.: Госстандарт, 2001.

7. Пичхадзе К.М., Хамидуллина Н.М., Зефиров И.В. Расчет локальных поглощенных доз с учетом реальной конфигурации космического аппарата. Космические исследования, 2006. Т. 44, № 2. С. 179-182.

8. Власенков Е.В., Хамидуллина Н.М., Зефиров И.В. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2022665130 «LocalDose&SEE»v.2, 10.08.2022 г.

А.В. Васильев, И.В. Шардыко, В.А. Гольдберг, В.М. Копылов

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МОДУЛЬНЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ В КОСМИЧЕСКОЙ РОБОТОТЕХНИКЕ

ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург, andrey@rtc.ru

Аннотация

Ставится задача создания манипуляционных робототехнических систем (РТС) космического назначения, конструкция которых предусматривает возможность их ремонта непосредственно в условиях эксплуатации, в том числе, без непосредственного участия человека. Анализируются существующие в мире проекты, а также опыт собственных разработок ЦНИИ РТК, в области создания модульных манипуляторов наземного и космического назначения. Формируются базовые требования к модульному ремонтопригодному космическому манипулятору (МРКМ) и направления дальнейших исследований.

Ключевые слова

Космические манипуляторы, модульность, ремонтопригодность, сборка крупногабаритных конструкций в космосе, обслуживание в космосе.

A.V. Vasiliev, I.V. Shardyko, V.A. Goldberg, V.M. Kopylov

PROSPECTS FOR APPLICATION OF MODULAR MANIPULATORS IN SPACE ROBOTICS

Russian State Scientific Centre for Robotics and Technikal Cybernetics, St.Peterburg, Russia, andrey@rtc.ru

Abstract

The work is aimed to develop manipulator robotic systems (RS) for space purposes, the design of which provides the possibility of their repair directly in operating conditions, including without direct human participation. Existing projects in the world as well as the RTC own projects experience are analyzed in the field of ground and space modular manipulators development. Basic requirements for a modular repairable space manipulator (MRSM) and directions for further research are being formed.

Key words

Space manipulators, modularity, repairability, large structures assembly in space, in-space servicing.

Наращивание интенсивности исследований и освоения космического пространства требует создания целого комплекса новых орбитальных и напланетных космических аппаратов, а также средств их робототехнического обслуживания. Широкое привлечение робототехники в ходе реализации космических программ обещает как общее повышение их эффективности, так и существенное расширение технологических возможностей будущих миссий и создаваемых для их реализации космических средств.

Одним из примеров области возможного применения роботов в открытом космическом пространстве являются задачи развёртывания на борту космических аппаратов (КА) крупногабаритных конструкций, варианты которых показаны на рисунке 1. Схожие задачи построения крупногабаритных ферменных конструкций ожидаются в будущем при построении наповерхностных станций и объектов научной, жилой и промышленной инфраструктуры на Луне и других планетах.

Всё это потребует привлечения широкого спектра манипуляционных робототехнических систем (РТС), необходимых для выполнения работ по автоматизированному возведению крупногабаритных пространственных конструкций как в открытом космическом пространстве, так и на поверхности

небесных тел (см. рис. 2), обслуживания собственных систем КА и др. Одним из проблемных вопросов в этой связи становится задача обеспечения долговременного надёжного функционирования таких РТС, в том числе, за счёт осуществления их ремонта в космосе. Такой ремонт может производиться как с привлечением космонавтов (что само по себе является достаточно затратной и опасной задачей), так и полностью автономно – с помощью другой РТС, берущей на себя роль ремонтного робота. Поэтому вопрос исследования путей создания ремонтопригодных космических манипуляторов является актуальной научно-технической задачей.

Решать вопрос ремонтопригодности манипуляторов в космосе наиболее рационально на основе модульного принципа их построения. В этом случае под ремонтом манипулятора понимается замена вышедшего из строя модуля. Конструктивно-функциональное разбиение манипулятора на модули производится исходя из анализа и группировки его составных частей по принципу обеспечения сопоставимых значений прогнозируемого ресурса их работы. Сама же задача обеспечения ремонта манипулятора в космосе в широком смысле требует разработки целого комплекса организационно-технических и технологических средств.

а) солнечные батареи; б) радиаторные фермы; в) антенны радиодиапазона; г) фермы и стержни для размещения массивов малогабаритной аппаратуры; д) штанги гравитационной стабилизации; е) фермы отодвижения для аппаратов с ядерным источником энергии (космических буксиров)

Рисунок 1 — Варианты применения крупногабаритных трансформируемых конструкций в составе КА

В рамках настоящей работы ставится задача исследования путей создания модульного ремонтопригодного космического манипулятора (МРКМ) для орбитальных и напланетных миссий. Предполагаемые сценарии ремонта такого манипулятора могут быть разбиты на три группы по составу исполнителей, выполняющих ремонт: 1) непосредственно человеком (космонавтом); 2) человеком совместно с другой РТС; 3) автономной РТС без непосредственного участия человека (его участие предполагается лишь в контуре управления манипулятором через СТЗ и каналы связи). Очевидно, что последний вариант является наиболее сложной технической и технологической задачей, поэтому именно этот вариант рассматривается как целевой для исследуемых МРКМ.

Общие требования к МРКМ можно сформулировать следующим образом:

модульная архитектура построения,

– быстросъёмная конструкция межмодульных интерфейсов с возможностью выполнения операций стыковки/расстыковки модулей как вручную человеком, так и автономным роботом-манипулятором без непосредственного участия человека,

– общие концептуальные и конструктивные решения манипулятора с учётом предполагаемой технологии ремонта в заданных условиях эксплуатации.

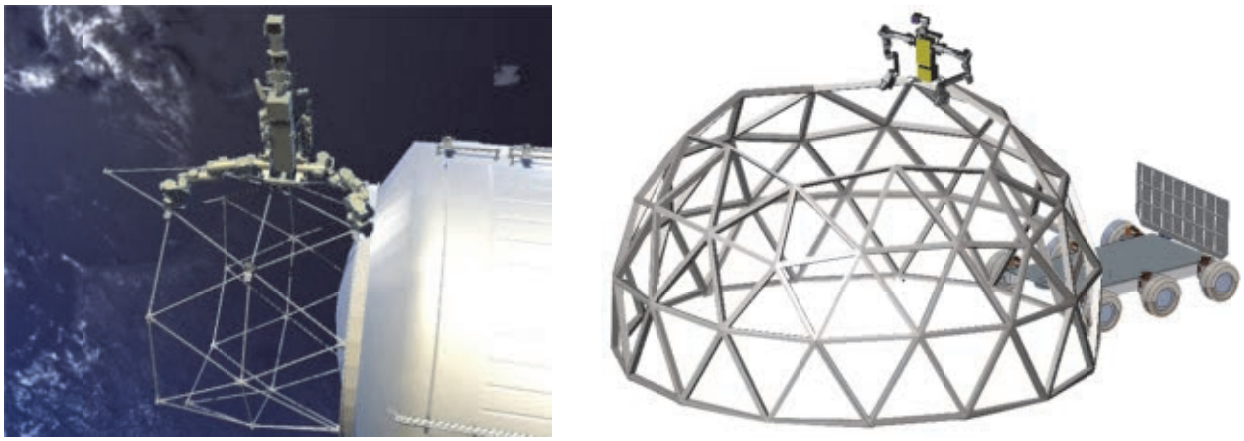


Рисунок 2 — Построение пространственной крупногабаритной конструкции космическим роботом на орбитальном КА (слева) и на поверхности Луны/Марса (справа)

Развитие и применение модульных манипуляторов в промышленности

Модульный принцип построения РТС был предложен и начал активно применяться и внедряться при создании промышленных манипуляторов ещё с 80-хх гг. прошлого столетия [1-5]. Причиной развития модульного принципа стало стремление к стандартизации и унификации компонентов робототехники с целью оптимизации усилий по её внедрению в промышленность [1], а также к расширению технологических возможностей производств путём перенастройки под новые задачи.

Исследования в этом направлении продолжаются и в настоящее время. Так в работе [6] приводится анализ типовых кинематических схем распространённых типов промышленных манипуляторов (PUMA, Elbow, DLR, ETL) и предлагается набор модулей под названием proModular.1, состоящий из восьми типов стандартных модулей, из которых может быть сложен манипулятор любой из этих кинематических схем.

На рисунке 3 представлены некоторые примеры современных промышленных модульных манипуляторов. Некоторые разработки в настоящее время перешли к стадии коммерческого внедрения готовых продуктов в виде покупаемых заказчиком наборов модулей и построения из них на своём производстве РТС той конфигурации, которая необходима для решения текущих задач, с возможностью при необходимости реконфигурации РТС под новые задачи изменившегося технологического процесса [3, 6].

а) б) в) г)

а) Robotnik, Испания [7], б) ModMan, Ю. Корея [8], в) AMBER B1 Robot Arm [9], г) MARA, Швейцария, Испания [10, 11]

Рисунок 3 — Примеры современных промышленных модульных манипуляторов

Переход промышленности на стандарты технологического уклада Индустрия 4.0, базирующегося на максимальной гибкости и адаптивности создаваемых производств, требует создания промышленных роботов с возможностью быстрой (оперативной) реконфигурации самим пользователем с наименьшими трудозатратами. Такие роботы должны содержать универсальные межмодульные ин-

терфейсы, обеспечивающие надёжные механические и электрические связи наряду с простотой процесса стыковки/расстыковки модулей. Система управления модульного манипулятора должна также автоматически реконфигурироваться в соответствии с изменившейся структурой и кинематической схемой.

На рисунке 4 показан пример такого модульного реконфигурируемого промышленного манипулятора, разработанного немецкой компанией RobCo [12, 13].

Рисунко 4 — Варианты конфигураций манипулятора RobCo (слева) и схема соединения его модулей (справа)

Компания заявляет своей целью создание доступных комплектов модулей с возможностью интуитивно понятной сборки и автоматизации производств предприятий малого и среднего бизнеса на пути перехода к технологическим процессам Индустрии 4.0 [14]. Замена модулей производится пользователем РТС вручную (рисунок 5) в течение нескольких минут за счёт универсального интерфейса стыковки, механически фиксируемого накидным хомутом. Аналогичное решение механического интерфейса было ранее применено для закрепления сменных инструментов и хорошо себя зарекомендовало в разработанном в ЦНИИ РТК манипуляторе для автоматизации диагностических работ на объектах атомной промышленности [15].

Концептуальные преимущества модульных реконфигурируемых роботов в промышленности очевидны. Это:

- гибкость и адаптируемость к изменяющимся задачам;
- возможность оперативного ремонта путём замены повреждённого модуля;
- снижение стоимости роботов за счёт серийного производства стандартных модулей.

Рисунок 5 — Замена модулей манипулятора RobCo

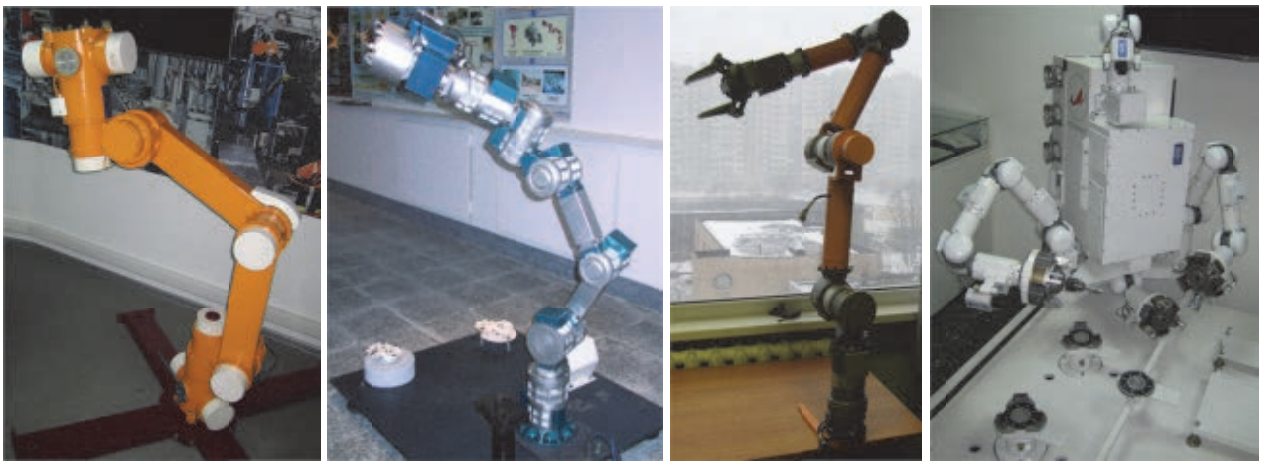
Обзор модульных манипуляторов космического назначения

Развитие реконфигурируемых космических манипуляторов, построенных по модульному принципу, объективно сдерживается спецификой области применения подобных РТС, характеризуемой сравнительно малым их количеством и крайней ограниченностью доступа к ним с целью обслуживания и ремонта. Тем не менее, интерес к модульным манипуляторам не снижается, а в последние годы лишь возрастает ввиду того, что планируемый рост спутниковых группировок и интенсификация исследований Луны и других небесных тел неизбежно приведёт к кратному росту числа используемых РТС. Приме-

нение модульного подхода для таких РТС позволит как минимум на первом этапе: снизить расходы на разработку новых РТС для очередной миссии, адаптировать и реконфигурировать имеющиеся РТС под новые задачи планируемой миссии, а в перспективе – повысить надёжность длительных космических миссий за счёт обеспечения возможности реконфигурации и ремонта манипуляционных РТС непосредственно в месте эксплуатации, т.е. без необходимости возврата РТС на Землю или отправки новой РТС на замену исчерпавшей свой ресурс или вышедшей из строя.

Проведённый обзор существующих на сегодняшний день разработок в мире показывает, что до сих пор внимание разработчиков сосредотачивалось в основном на достижении первой цели – создании модульных манипуляторов с возможностью реконфигурации под нужды планируемой миссии. Исследования по созданию таких модульных манипуляторов проводились, в том числе, в ЦНИИ РТК, начиная с 1990-х гг. Первой и наиболее масштабной работой по созданию космических (немодульных) манипуляторов явилась разработка системы бортовых манипуляторов для многоразового транспортного космического корабля «Буран», получившей название «Аист» [1]. Лётная эксплуатация этих манипуляторов планировалась на втором, так и не полетевшем, корабле. Тем не менее, опыт этой масштабной работы был использован в дальнейших исследованиях и разработках ЦНИИ РТК в области создания манипуляционных РТС космического назначения. На рисунке 6 представлены экспериментальные образцы таких систем: шагающего космического манипулятора «Циркуль», демонстратора модульного манипулятора «DORES», модульного манипулятора на основе электромеханических функциональных модулей «Роботрон-РТК», демонстратора космической транспортно-манипуляционной системы (КТМС) «Перспектива».

Примером апробации модульного манипулятора в космосе является реализованный немецким аэрокосмическим центром DLR в 2004-2011 гг. космический эксперимент ROKVISS (ROboter Komponenten Verifikation auf der ISS) по отработке и исследованию двухстепенного манипулятора, работающего в реальных условиях космического пространства на внешней поверхности РС МКС [16, 17]. Целью эксперимента была лётная квалификация модулей шарниров манипулятора LWR, разработанного Институтом робототехники и мехатроники (RMC), модифицированных для работы в космосе. Обобщение по модульным технологиям института RMC, – манипуляторам ROKVISS, LWR, DEXHAND приведены в [16], некоторые результаты космического эксперимента ROKVISS представлены в [16, 18, 19].



а) б) в) г)

а) макет-демонстратор космического шагающего робота «Циркуль» (1996 г.); б) функциональная модель космического технологического манипулятора «DORES» (2001 г.); в) одна из конфигураций космического манипулятора «Роботрон-РТК» (2012 г.); г) экспериментальный образец КТМС «Перспектива» (2015 г.)

Рисунок 6 — Экспериментальные манипуляционные РТС космического назначения

В настоящее время проходят лётные испытания два технологических грузовых манипулятора, которые также можно отнести к модульным РТС по их конструктивному исполнению: манипулятор ERA (European Robotic Arm) в составе РС МКС [20] и манипулятор CMM (Core Module Manipulator) на борту китайской национальной орбитальной станции [21, 22]. Манипуляторы предназначены для переноса и позиционирования грузов большой массой (до 8 тонн для ERA, до 25 тонн для CMM), имеют длину 11,3 м и 10,2 м соответственно [20-23]. Европейским космическим агентством (ЕКА) совместно с DLR на основе опыта, полученного в проекте ROKVISS, разрабатывается модульный манипулятор CAESAR (Compliant Assistance and Exploration SpAce Robot) [24, 25]. Манипулятор в номинальной конфигурации имеет семь степеней подвижности, длину 2,4 м и массу около 60 кг. Благодаря модульной архитектуре CAESAR может конфигурироваться под планируемую миссию за счёт установки различного числа шарниров и звеньев различной длины.

В ЦНИИ РТК на основе предыдущих работ (рисунки 6в и 6г) был разработан опытный образец КТМС «Косморобот», предназначенной для выполнения технологических операций на внешней поверхности КА и поддержки экипажа при внекорабельной деятельности. КТМС имеет два семистепенных манипулятора, также построенных по модульному принципу на основе идентичных шарниров. Благодаря двум манипуляторам и дополнительному двухстепенному опорному узлу «Косморобот» имеет возможность автономного перемещения по внешней поверхности КА (по поручням) и закрепления на специализированных такелажных элементах. Манипуляторы снабжены стыковочными устройствами для установки сменных инструментов. Конструкция шарниров и архитектура манипулятора потенциально позволяют космонавту производить замену шарниров и блоков управления шарнирами в условиях обитаемых отсеков МКС.

Исследования по реконфигурируемым модульным манипуляторам активно ведутся в мире в последние годы. Эти работы в основном связаны с возрастающим интересом к задаче сервисного обслуживания КА в космосе (On-Orbit Servicing). На рисунке 7 показан ряд примеров таких манипуляторов.

а) б) в) г) д)

а) MARGE; б) MOSAR-WM; в) TINA; г) xLink; д) KRAKEN

Рисунок 7 — Модульные космические манипуляторы

В основе концепции построения манипулятора MARGE (рисунок 7а), основным разработчиком которого является Институт строительной механики и лёгких конструкций (Institute of Structural Mechanics and Lightweight Design) университета Аахена (Германия), лежит вращательный шарнир, ось вращения которого направлена под углом 45° к оси цилиндра корпуса. Подобная конструкция, по мнению авторов, устраняет необходимость в различных типах шарниров, снижает сложность модульной системы и требует меньше места для хранения по сравнению с универсальным соединением традиционных шарниров [27]. Модуль шарнира MARGE основан на концепции iBOSS (intelligent Building Blocks for On-orbit Satellite Servicing and Assembly), разработанной тем же коллективом в 2010-2018 гг. и нацеленной на создание модульных спутников, собираемых из отдельных многофункциональных модулей [28]. Для соединения блоков iBOSS между собой был разработан универсальный интерфейс iSSI (intelligent Space System Interface – интерфейс интеллектуальной космической системы) [29-31]].

Проект Европейского космического агентства (ЕКА) под названием MOSAR (Modular Spacecraft Assembly and Reconfiguration Demonstrator) нацелен на разработку общей архитектуры построения мо-

дульных КА и технологий для проведения миссий обслуживания, сборки и реконфигурации на орбите, и включает шагающий манипулятор MOSAR-WM, модули КА и стыковочный интерфейс HOTDOCK [32]. Показанный на рисунке 7б манипулятор предназначен для перемещения по такелажным точкам по поверхности КА и манипулирования модулями полезной нагрузки. Манипулятор длиной 1,6 м и массой около 30 кг оснащён семью шарнирами. Каждый конец манипулятора оснащён стандартным соединением HOTDOCK, позволяющим роботу перемещаться. На конференции IROS-2020 в качестве развития проекта была заявлена реализация проекта ESA MIRROR по созданию робота MAR (Multi-Arm Robot) для проведения обслуживания на орбите (сборочных операций), разработка которого ведётся под руководством ЕКА (участники: DLR, Space Application Services, Leonardo). Концепция робота включает центральный модуль и два семистепенных манипулятора.

Манипулятор TINA (рисунок 7в), название которого расшифровывается как «This Is Not an Arm», разрабатывается DLR на базе шарниров эксперимента ROKVISS в рамках работ по подготовке миссии по возвращению на Землю марсианского грунта. Это не столько манипулятор, сколько набор моментных шарниров, которые могут быть скомпонованы необходимым образом [33]. Подобно CAESAR шарниры сформированы попарно в двухстепенные модули, из которых формируется манипулятор. В рамках проекта OSAM-2 (On-Orbit Servicing, Assembly, and Manufacturing 2) компания Motiv Space Systems (США) разрабатывает модульный семистепенной манипулятор xLink (рисунок 7г) [34]. Также в рамках программы OSAM компания Tethers Robotics (США) разработала модульный манипулятор KRAKEN (рисунок 7д), имеющий семь степеней подвижности (шарниров). Основная конфигурация манипулятора имеет длину 1 м и массу 7,1 кг. Типоразмерный ряд шарниров включает четыре варианта (на 10, 30, 60 и 120 Нм), из которых может быть собрана нужная конфигурация манипулятора. На конце манипулятора предусмотрен интерфейс смены инструмента ARTIE [35].

Общие выводы и принципы построения МРКМ для применения в космосе

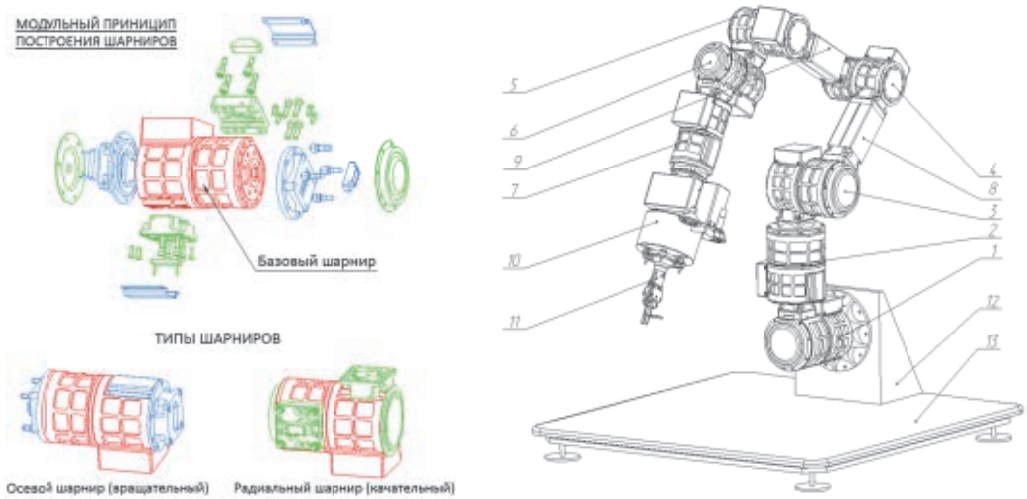
Сам по себе модульный принцип построения манипулятора ещё не гарантирует возможность его реконфигурации (в смысле изменения своей структуры путём замены модулей), тем более, – возможность автономной реконфигурации, которая требуется для создания МРКМ. Для выполнения этого условия, во-первых, модули манипулятора должны иметь законченный функциональный и конструктивный вид (например, модуль не должен предполагать необходимости прокладки кабелей снаружи или внутри, или выполнения каких-то других дополнительных операций, при его замене), во-вторых, должна быть предусмотрена конструктивно-технологическая возможность автономной замены модулей и, как следствие, продумана и отработана технология автономной реконфигурации/ремонта МРКМ.

Анализ рассмотренных конструкций показывает, что на сегодняшний день практически не существует проектов, нацеленных на решение задачи создания МРКМ. Модульные манипуляторы для промышленности предусматривают только ручную реконфигурацию оператором или технологом производственной линии, что объясняется отсутствием на таких производствах самой задачи реконфигурации или ремонта РТС без участия человека. Такая задача теоретически может возникнуть лишь на безлюдных опасных производствах. Иначе обстоит дело в космосе. Но и здесь пока модульный подход используется в основном с целью удешевления разработки новых РТС путём сборки на Земле вручную необходимой конфигурации таких РТС из готовых модулей. В большинстве разработок автономная, без участия человека, реконфигурация манипулятора заявляется только на уровне смены рабочего инструмента, пристыковываемого к конечному звену (MOSAR-WM, TINA, xLink, «Косморобот», ERA, CMM). Только в проекте MARGE авторы упоминают потенциальную возможность реконфигурации манипулятора прямо на орбите за счёт используемого между шарнирами универсального интерфейса iBOSS, не конкретизируя технологию такой реконфигурации [28].

Если говорить о модульности с точки зрения обеспечения ремонтопригодности манипулятора путём относительно быстрой замены модулей, то задача рациональной декомпозиции манипулятора на

конструктивно и функционально законченные модули очевидно связана с выделением в каждый из таких модулей составных частей с приблизительно одинаковым расчётным ресурсом работы, так чтобы прогнозируемая долговечность модуля не была ограничена снизу каким-либо из его компонентов. Так, например, целесообразно всю управляющую электронику шарнира или другого исполнительного узла (захватного устройства и др.) стремиться выносить в отдельный блок управления мехатронным модулем (БУММ) с возможностью его замены независимо от механических компонентов. Предварительно проведённые оценки показали, что рациональным является выделение следующих модулей (по возрастанию степени их надёжности): БУММ, обзорные модули (камеры, лидары), электромеханические шарниры/актуаторы, пассивные звенья.

С целью разработки МРКМ целесообразно обратиться к опыту уже разработанных проектов космических манипуляторов ЦНИИ РТК. Большой интерес в этом плане представляет манипулятор «DORES» (рисунок 6б). Этот модульный манипулятор предназначался для отработки перспективных технологий обслуживания орбитальных космических станций, действующая модель манипулятора впервые демонстрировалась на выставке «МАКС-2001» [36]. На рисунке 8 проиллюстрирован модульный принцип построения шарниров, а также приведена схема и состав манипулятора в семистепенной конфигурации (на рисунке 6б – манипулятор в шестистепенной конфигурации).



1 – шарнир крена плеча; 2 – шарнир рысканья плеча; 3 – шарнир тангажа плеча; 4 – шарнир тангажа локтя; 5 – шарнир тангажа кисти; 6 – шарнир рысканья кисти; 7 – шарнир крена кисти; 8 – плечевое звено; 9 – локтевое звено; 10 – специализированное ЗУ; 11 – узел адаптивного ЗУ; 12 – узел базового крепления манипулятора; 13 – технологическое основание

Рисунок 8 — Модульное построение шарниров (слева) и манипулятора «DORES» (справа)

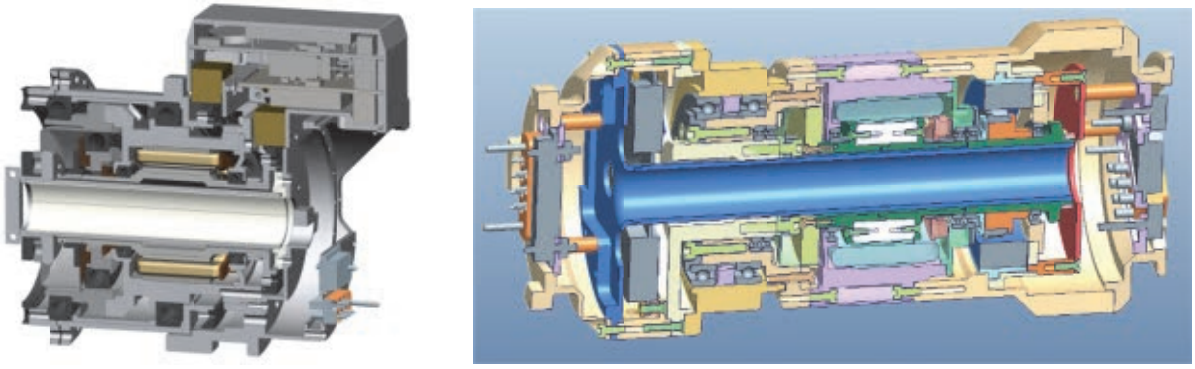
Манипулятор собирается из шарниров, соединённых непосредственно между собой или через соединительные звенья. При этом одна и та же базовая конфигурация шарнира используется для получения как осевого (вращательного), так и радиального (качательного) вариантов. Прокладка кабелей выполнена внутри звеньев и шарниров. Соединение обеспечивается через унифицированные механические и электрические интерфейсы. Ввиду направленности манипулятора на работу на борту КА в условиях орбитального полёта удалось выполнить все шарниры всего в двух исполнениях по моменту (три шарнира на 350 Нм и четыре шарнира на 170 Нм).

Построение манипуляторов КТМС «Косморобот» также выполнено по модульному принципу. Манипуляторы построены на основе единого модуля-шарнира, внешний вид которого показан на рисунке 9а. На каждом шарнире установлен БУММ. Как упоминалось ранее, имеется потенциальная возможность замены модулей-шарниров или отдельно БУММ космонавтом в условиях обитаемого отсека КА.

В состав шарнира входят: бесколлекторный электродвигатель постоянного тока, датчик положения входного вала, волновой редуктор, датчик момента, подвижный и неподвижный корпус, датчик

положения выходного вала, электрические соединители, кабель, блок управления шарниром.

Основным недостатком манипуляторов «DORES» и «Косморобот» с точки зрения построения МРКМ является технологически достаточно сложный процесс замены модулей, осуществимый только человеком в относительно комфортных внешних условиях. Таким образом, требуется переработка указанных конструкций и организация интерфейсов межмодульной стыковки с возможностью автоматизации процесса расстыковки/стыковки модулей.



а) б)

Рисунок 9 — Варианты построения шарниров модульных космических манипуляторов: а) «Косморобот»; б) «Роботрон-РТК»

Наиболее близким аналогом к МРКМ является проект «Роботрон-РТК», в котором разработан функциональный ряд модулей манипулятора космического назначения (модули-шарниры нескольких типоразмеров по моменту в двух модификациях каждый (вращательной и качательной), захватное устройство, два варианта функциональных устройств фиксации на поручнях). Одна из возможных конфигураций манипулятора показана на рисунке 6в. На рисунке 9б показано устройство модульного шарнира манипулятора. Крепление модулей осуществлялось с помощью хомута аналогично, тому как показано на рисунке 5. Недостатком такого решения со стороны задачи построения МРКМ является малый диаметр стыковочного узла, что может быть критично для манипуляторов, работающих в условиях гравитации, а также необходимость привлечения человека к операции смены модуля.

Анализ имеющегося научно-технического задела ЦНИИ РТК, а также разработок в мире, позволяет сделать следующие выводы по основным принципам построения МРКМ:

– построение манипулятора на основе модульных шарниров и пассивных звеньев;

– универсальный быстросъёмный межмодульный интерфейс стыковки с возможностью как роботизированного, так и ручного привода;

– выполнение БУММ в виде однотипных быстросъёмных модулей;

– оснащение модуля шарнира механизмом разблокировки тормоза (при его наличии) с возможностью внешнего привода ручным или электрическим инструментом;

– оснащение модуля шарнира валом принудительного внешнего привода с возможностью подключения ручного или электрического инструмента (для случая необратимого редуктора);

– оснащение концевого модуля манипулятора специализированным стыковочным устройством для установки сменного инструмента, подсоединения к базовым такелажным элементам на поверхности КА или к другим кооперируемым объектам.

Заключение и направления дальнейших исследований

В рамках проекта по созданию МРКМ в настоящей работе на начальном этапе выполнен поиск и анализ существующих решений модульных манипуляторов для наземного и космического применений, оценка опыта их создания, в том числе, собственного опыта ЦНИИ РТК в области разработки и создания манипуляторов космического назначения. Проведённый обзор и анализ подтвердили акту-

альность и перспективность применения МРКМ в случае роста интенсивности космических исследований и роста применяемого числа РТС и требований по длительности их работы.

Модульность космических манипуляционных РТС приводит к возможности унификации их компонентов. В результате появляется возможность разработки единого типоразмерного ряда шарниров, охватывающего широкий диапазон моментов, что существенно сокращает время на разработку РТС в целом. К достоинствам таких манипуляторов также относятся гибкость и адаптируемость к изменяющимся задачам, возможность реконфигурации и замены модулей более совершенными вновь разработанными аналогами, возможность ремонта и продления срока службы РТС. К недостаткам МРКМ относятся: повышение сложности компонентов и манипуляционной РТС в целом, повышение размеров и массы системы за счёт дополнительных межмодульных узлов.

Дальнейшие работы связаны с исследованием и предварительным проектированием конструкции МРКМ для выполнения сборочных операций в космосе, концептуальной проработкой и компьютерным моделированием сценариев выполнения работ по ремонту такого манипулятора.

В качестве прототипа шарниров для МРКМ рассматриваются шарниры проекта «Роботрон-РТК». При разработке МРКМ также целесообразно учесть опыт разработки манипуляторов «DORES» и «Косморобот».

Отдельного внимания требует вопрос концептуальной проработки и дальнейшей детализации технологии осуществления ремонта МРКМ непосредственно в условиях его эксплуатации. Требуют проработки вопросы границ целесообразности использования МРКМ и возможные варианты сценариев ремонта МРКМ, что, в свою очередь, во многом зависит от общего сценария планируемой космической миссии или программы и предполагаемой в них области применения манипуляционных РТС. Успешная реализация концепции ремонтируемых РТС в космосе также требует организации целого комплекса соответствующих технологических и организационных мер на всех стадиях реализации миссии, предусматривающей применение таких РТС.

Рассматриваемые манипуляционные РТС могут найти применение в ходе решения задач по построению объектов научного и промышленно-технологического назначения на орбите Земли, на поверхности Луны, Марса.

Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России FNRG-2022-0007 1021060307686-0-2.2.2 №075-01623-22-00 «Исследование методов и технологий сборки крупногабаритных конструкций в космическом пространстве».

Литература

1. История ЦНИИ РТК: 1973. Робототехника [Электронный ресурс] // RTC.RU: официальный сайт ГНЦ РФ ЦНИИ РТК. – URL: https://rtc.ru/history/ (дата обращения: 04.08.2022).

2. Fukuda T., Nakagawa S. Dynamically reconfigurable robotic system // Proceedings of 1988th IEEE International Conference on Robotics and Automation (Philadelphia, PA, USA). – Vol.3. – 1988. – pp. 1581-1586. – DOI: 10.1109/ROBOT.1988.12291.

3. Schmitz D., Khosla P.K., Kanade T. The CMU Reconfigurable Modular Manipulator System // Proceedings of the International Symposium and Exposition on Robots. – 1988. – URL: https://www.researchgate.net/publication/243605301_The_CMU_Reconfigurable_Modular_Manipulator_System (дата обращения 18.03.2022).

4. Design of the IRIS Facility - A Modular, Reconfigurable and Expandable Robot Test Bed / R. Hui, N. Kircanski, A.A. Goldenberg [et al.] // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 1993. – URL: https://www.researchgate.net/publication/3556540_Design_of_the_IRIS_Facility_-_A_Modular_Reconfigurable_and_Expandable_Robot_Test_Bed (дата обращения 04.08.2022). – DOI: 10.1109/ROBOT.1993.291856.

5. Matsumaru T. Design and Control of the Modular Robot System: TOMMS // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 1995. – URL: https://www.researchgate.net/

publication/3655784_Design_and_control_of_the_modular_robot_system_TOMMS (дата обращения 18.03.2022). – DOI:10.1109/ROBOT.1995.525575.

6. Liu S. B., Althoff M. Optimizing performance in automation through modular robots // 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – IEEE, 2020. – pp. 4044-4050.

7. Robotnik Modular Arm [Электронный ресурс]. – URL: http://mindtrans.narod.ru/pdfs/Modular_robotic_arm.pdf (дата обращения: 05.08.2022).

8. Modman: an advanced reconfigurable manipulator system with genderless connector and automatic kinematic modeling algorithm / A. Yun [et al.] // IEEE Robotics and Automation Letters. – 2020. – Vol. 5. – №. 3. – pp. 4225-4232.

9. World Debut Of 7-Axis Adaptive & Modular Robot LAN Supported [Электронный ресурс]. – URL: https://www.kickstarter.com/projects/amberobotics/a-new-generation-of-7-axis-robot-arm-for-creative-tasks (дата обращения: 05.08.2022).

10. MARA. World's first modular cobot [Электронный ресурс]. – URL: https://acutronicrobotics.com/products/mara/ (дата обращения: 05.08.2022).

11. Kojcev R. MARA, a fully Modular Articulated Robot Arm. The first ROS 2.0 based Industrial Robot [Электронный ресурс]. – URL: https://static1.squarespace.com/static/51df34b1e4b08840dcfd2841/t/5d102746871dcf00015ffd72/1561339746896/1_9_Kojcev.pdf (дата обращения: 05.08.2022).

12. Modular Industrial Robots / RobCo. – URL: https://info.robco.de/hubfs/Robco Collateral/Modular Industrial Robots Robco [EN].pdf (дата обращения: 04.08.2022).

13. RobCo. Technical specifications [Электронный ресурс]. – URL: https://info.robco.de/hubfs/ROBCO Technical Specifications.pdf (дата обращения: 05.08.2022).

14. Robot automation for industrial SMBs – Made in Germany [Электронный ресурс] // ROBCO.DE: официальный сайт компании RobCo. – URL: https://robco.de/en/ /company (дата обращения: 04.08.2022).

15. Контроль-ВБ. Манипуляционная система контроля состояния верхнего блока реактора [Электронный ресурс] // RTC.RU: официальный сайт ГНЦ РФ ЦНИИ РТК. – URL: https://rtc.ru/solution/manipulyacionnaya-sistema-kontrol-vb/ (дата обращения: 05.08.2022).

16. DLR's dynamic actuator modules for robotic space applications / A. Wedler [et al.] // 41st Aerospace Mechanisms Symposium. – 2012. – Vol. 41.

17. Springer Handbook of Robotics / Ed. by B. Siciliano, O. Khatib; 2nd Edition. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2016. – 2227 p. – DOI: 10.1007/978-3-319-32552-1

18. ROKVISS robotics component verification on ISS / G. Hirzinger [et al.] // Proc. of the 8th Int. Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space – iSAIRAS (Munich, Germany, 2005). – 12 p.

19. ROKVISS – robotics component verification on ISS current experimental results on parameter identification / A. Albu-Schaeffer, W. Bertleff, B. Rebele, B. Schaefer, K. Landzettel, G. Hirzinger // IEEE International Conference Robotics and Automation. – 2006. – P. 3879-3885.

20. Начало новой «эры» [Электронный ресурс] // ROSCOSMOS.RU: официальный сайт госкорпорации Роскосмос. – Опубл. 11.12.2021. – URL: https://www.roscosmos.ru/33594/ (дата обращения: 05.08.2022).

21. Tian S., Tang X., Xiang C. Equivalence analysis of mass and inertia for simulated space manipulator based on constant mass // Machines. – 2017. – Vol.5, 31. – 14 pp.

22. China has tested the manipulator arm of the new orbital station [Электронный ресурс]. – URL: https://vpk.name/en/570208_china-has-tested-the-manipulator-arm-of-the-new-orbital-station.html; https://vpk.name/news/570026_kitai_provel_ispytanie_ruki-manipulyatora_ustanovlennoi_na_orbitalnoi_stancii_knr.html (дата обращения: 28.04.2022).

23. Liu H. An Overview of the Space Robotics Progress in China // International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space. – 2014.

24.CAESAR. Compliant Assistance and Exploration SpAce Robot / DLR. – URL: https://www.dlr.de/rm/Portaldata/52/Resources/Flyer/Systeme/CAESAR_Flyer_engl_2018.pdf (дата обращения: 05.08.2022).

25.Caesar: Space robotics technology for assembly, maintenance, and repair / A. Beyer [et al.] // Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC. – 2018.

26.The Active Test Facility and Experimental Study of the Multi-link Space Robot in Ground Conditions / A. Truts, I. Dalyaev, R. Chizhevskiy, V. Titov // Proceedings of the 2017 IEEE International Symposium on Robotics & Manufacturing Automation (ROMA), Makaysia, 19-21 Sept. – 2017. – 6 pp. – DOI: 10.1109/ROMA.2017.8231831.

27.New approach on robotic arm design: fully modular arm architecture utilizing novel space interface / M. Kortmann, C. Zeis, C. A. de Alba-Padilla [et al.] // Proceedings of International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (i-SAIRAS 2020) (Virtual Conference 19–23 October 2020). – Paper 5059. – 8 p. – URL: https://www.hou.usra.edu/meetings/isairas2020fullpapers/pdf/5059.pdf (дата обращения 04.08.2022).

28.New horizons for exploration via flexible concepts based on building blocks using the standardized iSSI (intelligent space system interface) modular coupling kit by iBOSS / T.A. Schervana, J. Kreiselb, K. Schroederc, D.R. Wingo // Proceedings of Global Space Exploration Conference (GLEX 2021), St Petersburg, Russian Federation, 14-18 June 2021. – Paper GLEX-21-7.3.2. – 10 p. – URL: https://www.iboss.space/wp-content/uploads/2021/08/iBOSS-GLEX2021_7_3_2_x61815-manuscript-FinalN-sz.pdf (дата обращения 04.08.2022).

29.iSSI – intelligent Space System Interface [Электронный ресурс]. – URL: https://www.iboss.space/products/ (дата обращения: 04.08.2022).

30.Multifunctional interface for modular satellite systems with robotic servicing capabilities / M. Kortmanna [et al.] // Proceedings of 68th International Astronautical Congress. – 2017.

31.Design and qualification of a multifunctional interface for modular satellite systems / M. Kortmanna [et al.] // Proceedings of 69th International Astronautical Congress, Bremen, Germany. – 2018. – pp. 1-5.

32.MOSAR: Modular Spacecraft Assembly and Reconfiguration Demonstrator / P. Letier [et al.] // 15th Symposium on Advanced Space Technologies in Robotics and Automation (ASTRA). – 2019. – 7 pp.

33.TINA: The Modular Torque Controlled Robotic Arm-A Study for Mars Sample Return / M. Maier [et al.] // 2021 IEEE Aerospace Conference (50100). – IEEE, 2021. – pp. 1-10.

34.On-Orbit Servicing, Assembly, and Manufacturing 2 (OSAM-2) [Электронный ресурс] // NASA.GOV: сайт National Aeronautics and Space Administration. – URL: https://www.nasa.gov/mission_pages/tdm/osam-2.html (дата обращения: 04.08.2022).

35.Robotic Arm. Kraken [Электронный ресурс] / Tethers Unlimited, Inc. (TUI). – URL: https://www.tethers.com/robotic-arm/ (дата обращения: 04.08.2022).

36.Модульный манипулятор для обслуживания космических аппаратов / А.В. Полин, С.А. Половко, В.И. Юдин // Экстремальная робототехника: Материалы XIII научно-технической конференции. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. – С.116-119.

ТРУДЫ

33-й Международной научно-технической конференции

ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА

29-30 сентября 2022 года, Санкт-Петербург

PROCEEDINGS

of the 33rd International Scientific and Technological Conference

EXTREME ROBOTICS

September 29-30, 2022, Saint Petersburg, Russia

СЕКЦИИ

Наземная робототехника

• Технологии и компоненты наземных роботов (системы технического зрения, навигация, связь) • Робототехнические комплексы высокой проходимости для движения по пересеченной местности • Миниатюрные робототехнические комплексы • Беспилотный транспорт для работы в структурированной среде • Экзоскелеты, увеличивающие мышечную силу (промышленность, строительство, логистика и пр.)

Морская робототехника

• Технологии и компоненты подводной связи и навигации • Перспективные области применения подводной робототехники • Проектирование и отработка безэкипажных катеров и необитаемых подводных аппаратов

Искусственный интеллект и цифровые технологии в экстремальной робототехнике

• Ситуационный анализ и формирование поведения автономных роботов • Самодиагностика, самообучение и самоорганизация роботов • Автоматизация разметки данных, машинного обучения и формирования структурированных баз данных • Человеко-машинные интерфейсы для мультиагентных робототехнических систем • Интеллектуализация робототехнических комплексов на базе распределенных вычислительных ресурсов • Перспективные технологии и компоненты обеспечения взаимодействия робота и оператора

КРУГЛЫЕ СТОЛЫ

Роботизация атомной отрасли

• Автоматизированный радиационный мониторинг • Оборудование для аварийных служб • Роботизированный вывод реактора из эксплуатации

Медицинская робототехника

• Ассистирование при хирургических операциях • Роботизированные процедуры • Экзоскелеты для восстановительной медицины (реабилитационные, протезирующие, вспомогательные)

Космическая робототехника

• Орбитальные и напланетные робототехнические базы и планетоходы • Мониторинг земной поверхности на базе беспилотной авиации

Организатор конференции

Государственный научный центр Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ГНЦ РФ ЦНИИ РТК)

При поддержке

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

9 772658 764009