ER-2020

ТРУДЫ

31-й Международной научно-технической конференции

"ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА"

28-29 сентября 2020, Санкт-Петербург, Россия

PROCEEDINGS

of the International Scientific & Technological Conference

EXTREME ROBOTICS

PROCEEDINGS

of the 31st International Scientific and Technological Conference

"EXTREME ROBOTICS"

September 28-29, 2020, Saint-Petersburg, Russia

ER.RTC.RU

9 772658 764009

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

ОРГАНИЗАТОР КОНФЕРЕНЦИИ

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

ГНЦ РФ ЦНИИ РТК один из крупнейших исследовательских центров России. Институт обладает развитой научно-исследовательской и конструкторско-технологической базой, уникальными испытательными стендами и опытным производством.

CONFERENCE ORGANISER

Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics

The Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, one of the largest research centers in Russia. The Center has a developed research and designengineering base, unique testing facilities and pilot production.

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ

SUPPORTED BY

Российская Академия Наук

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА

ЖУРНАЛ «Мехатроника,автоматизация, управление»
ЖУРНАЛ «Робототехника и техническая кибернетика»
ЖУРНАЛ «Новый Оборонный Заказ. Стратегии»
ЖУРНАЛ «Труды СПИИРАН»

INFORMATION SUPPORT

JOURNAL «Mechatronics, Automation, Control»
JOURNAL «Robotics and Technical Cybernetics»
JOURNAL «New Defensive Order. Strategy»
JOURNAL «Proceedings SPIIRAS»

ТРУДЫ

31-й Международной научно-технической конференции

ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА

28-29 сентября 2020 года, Санкт-Петербург

PROCEEDINGS

of the 31st International Scientific and Technological Conference

EXTREME ROBOTICS

September 28-29, 2020, Saint-Petersburg, Russia

er.rtc.ru

УДК 004.896:007.5
Э41

Э41 Труды международной научно-технической конференции ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА (Proceedings of the International scientific and technological conference EXTREME ROBOTICS). – Санкт-Петербург: ООО «Издательско-полиграфический комплекс «Гангут», 2020. – 322 с. – 10.31776/ConfER.31.2020.

Материалы сборника отражают круг актуальных проблем и задач в сфере робототехнических систем и средств безопасности, представленных на 31-й Международной научно-технической конференции «ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА». Доклады опубликованы в авторской редакции.

УДК 004.896:007.5

Proceedings of the International Scientific and Technological Conference EXTREME ROBOTICS. – SaintPetersburg: OOO «Izdatel'sko-poligraficheskii kompleks «Gangut» Publ., 2020. – 322 p.

Proceeding’s materials highlight an array of challenging issues and tasks in the sphere of robotic systems and safety facilities discussed at the 31st International Scientific and Technological Conference «EXTREME ROBOTICS». Papers are published with author's edition.

ISSN 2658-7645
© ЦНИИ робототехники и технической кибернетики, 2020
© The Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, 2020

Юревич Евгений Иванович

(25.11.1926 −03.06.2020)

Основатель и первый директор ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, почетный главный конструктор ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, почетный сопредседатель программного комитета конференции «ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА»

Evgeny Yurevich

(25.11.1926 −03.06.2020)

Founder and First Director of the Russian Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics (RTC), Doctor of Technical Sciences, Professor, Honoured Science and Technology Worker of the Russian Federation, Honorary Chief Designer of RTC, Honorary Co-Chairman of the Program Committee of EXTREME ROBOTICS Conference

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»
- Общероссийского отраслевого объединения работодателей «Союз машиностроителей России»
- Правительства Санкт-Петербурга
- Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого
- ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова» Минздрава России

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

ORGANIZER

The Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics (RTC), Saint-Petersburg, Russia

---

WITH SUPPORT OF

- Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation
- Military-Industrial Commission of the Russian Federation
- EMERCOM of Russia
- Ministry of Health of the Russian Federation
- Russian Academy of Sciences
- State Scientific Centers of the Russian Federation Association
- All-Russian branch association of employers «Russian Engineering Union»
- Government of St. Petersburg
- Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
- Almazov National Medical Research Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation

INFORMATION SUPPORT

- Journal «Mechatronics, Automation, Control», Moscow, Russia
- Journal «Proceedings SPIIRAS», Saint-Petersburg, Russia
- Journal «Robotics and Technical Cybernetics», Saint-Petersburg, Russia
- Journal «New Defensive Order. Strategy», Saint-Petersburg, Russia

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Председатель:

Грязнов Николай Анатольевич, к.ф.-м.н., заместитель директора по научной работе ГНЦ РФ ЦНИИ РТК

Ученый секретарь:

Спасский Борис Андреевич, к.т.н., начальник сектора ГНЦ РФ ЦНИИ РТК

Члены программного комитета:

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

Анцев Георгий Владимирович, к.т.н., генеральный директор - генеральный конструктор, АО «Моринформсистема-Агат»

Верба Владимир Степанович, д.т.н., проф., чл.-корр. РАН, генеральный конструктор, АО «Концерн «Вега»»

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

Желтов Сергей Юрьевич, д.т.н., академик РАН, генеральный директор ФГУП «ГосНИИАС»

Каляев Игорь Анатольевич, д.т.н., академик РАН, председатель совета по приоритету научно-технологического развития РФ

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

Пешехонов Владимир Григорьевич, д.т.н., академик РАН, генеральный директор ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»

Плегер Пауль, доктор, профессор Бонн-Рейн-Зиг университета прикладных наук, Германия

Половко Сергей Анатольевич, к.т.н., научный руководитель центра ГНЦ РФ ЦНИИ РТК

Пряничников Валентин Евгеньевич, д.т.н., зав. базовой кафедрой МГТУ «СТАНКИН» при ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

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

Рудианов Николай Александрович, к.т.н., начальник отдела ФГБУ 3 ЦНИИ Минобороны России

Самойлов Александр Сергеевич, д.м.н., проф., чл.-корр. РАН, генеральный директор ГНЦ ФМБЦ имени А.И. Бурназяна ФМБА России

Юн Джи Суп, доктор, научный руководитель Корейского научно-исследовательского института атомной энергии KAERI, Корея

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Председатель:

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

Секретарь:

Николаев Александр Борисович, к.ф.-м.н., заместитель начальника сектора ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург

Члены организационного комитета:

Анцев Иван Георгиевич, к.т.н., исполнительный директор АО «НПП «Радар ММС»

Воробьев Иван Семенович, начальник ФГБУ «Центральный научно-исследовательский испытательный институт инженерных войск имени Героя Советского Союза генерал-лейтенанта инженерных войск Д.М. Карбышева»

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

Каталинич Бранко, доктор, президент Международной ассоциации DAAAM, Австрия

Кудж Станислав Алексеевич, д.т.н., ректор ФГБОУ ВО «Московский технологический университет»

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

Медведев Вадим Викторович, к.э.н., директор Департамента инноваций и перспективных исследований Минобрнауки России

Пшихопов Вячеслав Хасанович, д.т.н., директор НИИ робототехники и процессов управления ЮФУ

Рудской Андрей Иванович, академик РАН, ректор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

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

Туричин Глеб Андреевич, д.т.н., проф., ректор СПбГМТУ

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

Шмаков Олег Александрович, заместитель главного конструктора ГНЦ РФ ЦНИИ РТК

ОГЛАВЛЕНИЕ

СИМПОЗИУМ «СЕРВИСНАЯ РОБОТОТЕХНИКА»

В.П. Андреев, В.Э. Тарасова ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ПОКАЗАНИЙ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ И ИНФРАКРАСНЫХ ДАТЧИКОВ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТЬЮ
V.P. Andreev, V.E. Tarasova OBJECT IDENTIFICATION BY ULTRASONIC AND INFRARED SENSORS DATA FUSION USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORK 12

Н.А. Павлюк, А Д. Ковалев, П.А. Смирнов МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ СТЕРЕОЗРЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ НАВИГАЦИИ
N.A. Pavliuk, A.D. Kovalev, P.A. Smirnov MATHEMATICAL FOUNDATION OF A STEREO-VISION SYSTEM OF A ROBOTIC PLATFORM IN TERMS OF NAVIGATION PROBLEM SOLVING 19

К.И. Кий, Д.А. Анохин, Р.В. Досаев КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ДОРОЖНЫХ СЦЕН
K.I. Kiy, D.A. Anokhin, R.V. Dosaev INTEGRATED ANALYSIS OF THE STATE OF ROAD SCENES 28

А.В. Плотников, В.Е. Пряничников АЛГОРИТМ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ОПЕРАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА РОБОТА ПО УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ДАННЫМ
A.V. Plotnikov, V.E. Pryanichnikov ALGORITHM FOR MAPPING THE ROBOT'S OPERATING SPACE USING ULTRASOUND DATA 34

П.М. Близнец ШАГАЮЩАЯ ПЛАТФОРМА МОБИЛЬНОГО РОБОТА
P.M. Bliznets MOBILE ROBOT WALKING PLATFORM 41

А.В. Антонов, В.А. Глазунов ВЛИЯНИЕ УПРУГИХ СИЛ НА ТОЧНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРА ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ
A.V. Antonov, V.A. Glazunov INFLUENCE OF ELASTIC FORCES ON MOVEMENT ACCURACY OF PARALLEL MANIPULATOR 47

Д.С. Яковлев, А.А. Тачков ПОДСИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗАВАРИЙНОГО ДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА
D.S. Iakovlev, A.A. Tachkov THE SUBSYSTEM OF PROVIDING ACCIDENT-FREE MOTION OF A MOBILE ROBOT 56

А.Г. Почежерцев, А.В. Васильев, В.М. Копылов, И.В. Шардыко ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНЫХ ПРИЧИН НЕУСТОйЧИВОГО ПОВЕДЕНИЯ КОЛЕСНОГО РТК НА НАКЛОННОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ
A.G. Pochezhertsev, A.V. Vasiliev, V.M. Kopylov, I.V. Shardyko RESEARCH OF POSSIBLE CAUSES OF WHEELED RTC UNSTABLE BEHAVIOR ON AN INCLINED SURFACE BY COMPUTER SIMULATION 63

Д.С. Лавыгин, В.В. Левщанов, В.В. Приходько ПРОГРАММНЫЙ ИНТЕРФЕЙС ДЛЯ УДАЛЁННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМИ РОБОТАМИ KUKA
D.S. Lavygin, V.V. Levshchanov, V.V. Prikhodko SOFTWARE INTERFACE FOR REMOTE CONTROL OF KUKA INDUSTRIAL ROBOTS 73

А.В. Козов ДИНАМИЧЕСКАЯ РЕКОНФИГУРАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМИ РОБОТАМИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ГРУППОВОГО ДЕЙСТВИЯ
A.V. Kozov THE DYNAMIC RECONFIGURATION OF THE CONTROL SYSTEM FOR MOBILE ROBOTS DURING THE EXECUTION OF A GROUP ACTION 78

О.В. Кофнов, Б.В. Соколов ПОСТАНОВКА И МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ДИНАМИЧЕСКОГО ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФУНКЦИЙ ПРИ ГРУППОВОМ УПРАВЛЕНИИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ
O.V. Kofnov, B.V. Sokolov FORMULATION AND METHODS FOR SOLVING THE PROBLEM OF DYNAMIC REALLOCATION OF FUNCTIONS OF GROUP CONTROL OF ROBOTIC COMPLEXES 84

Р.В. Мещеряков, А.А. Саломатин, Д.В. Сенчук ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ ТРАНСПОРТИРОВКИ ГРУЗОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОАГЕНТНОЙ АВИАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ
R.V. Mescheryakov, A.A. Salomatin, D.V. Senchuk OPTIMIZING THE TASK OF CARGO TRANSPORTATION BY USING TOOLS OF THE MULTI-AGENT SYSTEM..... 89

С.В. Минчук, Л.В. Октябрьская, И.С. Козлов, О.Н. Резник, А.Е. Скворцов, В.М. Теплов, А.В. Лопота, В.В. Харламов ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ АППАРАТОВ LIFE STREAM ECMO ДЛЯ БОРЬБЫ С НОВОЙ КОРОНАВИРУСНОЙ ИНФЕКЦИЕЙ COVID-19
S.V. Minchuk, L.V. Oktyabrskaya, I.S. Kozlov, O.N. Reznik, A.E. Skvortsov, V.M. Teplov, A.V. Lopota, V.V. Kharlamov APPLICATION PERSPECTIVE OF THE LIFESTREAM ECMO DEVICES FOR TREATMENT OF THE NEW CORONAVIRUS DISEASE (COVID-19)..... 95

В.Е. Пряничников, М.Д. Соловьева, Р.Б. Тарасов, В.В. Чернышев АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПЛАНЕТАРНО-ЦЕВОЧНОГО РЕДУКТОРА ДЛЯ МАНИПУЛЯТОРА СЕРВИСНОГО РОБОТА АМУР-307 И ШАГАЮЩЕГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА
V.E. Pryanichnikov, M.D. Soloveva, R.B. Tarasov, V.V. Chernyshev ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF APPLICATION OF THE CYCLOIDAL SPEED REDUCER FOR THE MANIPULATOR OF THE AMUR-307 SERVICE ROBOT AND THE PASSING UNDERWATER VEHICLE 100

А.П. Федин, Я.В. Калинин, Е.А. Марчук ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ YOULA – KUCERA В МОДЕЛИ КОНТРОЛЛЕРА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОРМОЗНЫХ УСИЛИЙ КОЛЕСНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА
A.P. Fedin, Ya.V. Kalinin, E.A. Marchuk YOULA – KUCERA PARAMETERIZATION IN THE MODEL OF BRAKE FORCES DISTRIBUTING CONTROLLER OF WHEELED VEHICLE 104

И.И. Нестеров, Н.В. Мальгин, А.Б. Кутман, А.А. Торопков ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПЛАТФОРМЕННЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ГИРОСТАБИЛИЗИРОВАННЫХ ПЛАТФОРМ ПРОИЗВОДСТВА ООО «ГИРОЛАБ» ДЛЯ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РАЗРАБОТКИ
I.I. Nesterov, N.V. Malgin, A.B. Kutman, A.A. Toropkov APPLICATION EXPERIENCE OF STRAPDOWN INERTIAL NAVIGATION SYSTEMS AND GYROSTABILIZED PLATFORMS FOR EXTREME ROBOTICS PRODUCED BY GYROLAB LLC. PERSPECTIVE ENGINEERING 110

С.В. Голубев, И.В. Поляков ПОДХОДЫ К ДЕМОНТАЖУ И ФРАГМЕНТАЦИИ КОНСТРУКЦИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ВЫВОДЕ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ
S.V. Golubev, I.V. Polyakov APPROACHES TO THE DISMANTLING AND FRAGMENTATION OF THE STRUCTURES AND EQUIPMENT DURING DECOMMISSIONING OF NUCLEAR FACILITIES 118

А.А. Иванов ФОРМАЛИЗМ ДУАЛЬНЫХ ЧИСЕЛ В ЗАДАЧЕ РАВНОВЕСИЯ НЕСУЩЕГО ТЕЛА НА ШЕРОХОВАТОЙ ПЛОСКОСТИ
A.A. Ivanov FORMALISM OF DUAL NUMBERS IN THE PROBLEM OF EQUILIBRIUM OF A CARRIER BODY ON A ROUGH PLANE..... 125

А.Б. Николаев КООПЕРАТИВНЫЕ РОБОТЫ – СПАСЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ РОБОТОТЕХНИКИ РОССИИ
A.B. Nikolaev COOPERATIVE ROBOTS – SALVATION OF INDUSTRIAL ROBOTICS IN RUSSIA..... 132

СИМПОЗИУМ «КОСМИЧЕСКАЯ РОБОТОТЕХНИКА. ОТ ЛУНОХОДА-1 ДО ЛУННЫХ БАЗ»

А.Б. Железняков ЛУННЫЕ БАЗЫ: ИЗ ПРОШЛОГО – В БУДУЩЕЕ
A.B. Zheleznyakov LUNAR BASES: FROM THE PAST – TO THE FUTURE.....140

М.Э. Самородова, И.В. Шардыко, В.В. Титов СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРОМ С УПРУГИМИ ШАРНИРАМИ НА ОСНОВЕ РЕГУЛЯТОРА С АКТИВНЫМ ДЕМПФИРОВАНИЕМ
M.E. Samorodova, I.V. Shardyko, V.V. Titov CONTROL SYSTEM OF MANIPULATOR WITH ELASTIC JOINTS BASED ON REGULATOR WITH ACTIVE DAMPING 146

Е.В. Власенков АНАЛИЗ ИОНИЗАЦИОННЫХ И НЕИОНИЗАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ В БОРТОВОЙ АППАРАТУРЕ ЛУНОХОДА С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ БОРТОВЫХ РАДИОИЗОТОПНЫХ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛА
E.V. Vlasenkov ANALYSIS OF IONIZING AND NON-IONIZING EFFECTS IN ON-BOARD EQUIPMENT OF THE MOON ROVER TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF ON-BOARD RADIOISOTOPE HEAT UNITS 155

А.И. Быков, А.В. Артемьев ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ НАТУРНО-ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ХОДОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАНЕТОХОДА
A.I. Bykov, A.V. Artemev SUBSTANTIATION OF NATURAL-IMITATION MODELING METHODS APPLICATION FOR ESTIMATION OF A PLANETARY ROVERS' DRIVING CHARACTERISTICS.....166

М.В. Михайлюк, Б.И. Крючков, В.М. Усов, А.А. Алтунин, П.П. Долгов ВИРТУАЛЬНОЕ ПРОТОТИПИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ МОБИЛЬНОСТИ КОСМОНАВТОВ ПРИ ВЫХОДЕ В ОТКРЫТЫЙ КОСМОС
M.V. Mikhailyuk, B.I. Kryuchkov, V.M. Usov, A.A. Altunin, P.P. Dolgov VIRTUAL PROTOTYPING OF DEVICES FOR INCREASING THE MOBILITY OF COSMONAUTS DURING SPACEWALKS.....175

С.А. Матвеев, Е.Б. Коротков, Ю.А. Жуков, М.И. Надежин СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ЗАДАЧАХ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА
S.A. Matveev, E.B. Korotkov, Yu.A. Zhukov, M.I. Nadezhin COMPARISON OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS IN TASKS OF ELECTRIC DRIVE DIAGNOSTICS 183

Д.В. Васильков, Е.Б. Коротков, Н.С. Слободзян, О.В. Широбоков ДИАГНОСТИКА МЕХАНИЧЕСКИХ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ
D.V. Vasilkov, E.B. Korotkov, N.S. Slobodzyan, O.V. Shirobokov MECHANICAL FAULT DIAGNOSTICS SPACE APPLICATIONS MOTORS 188

МОРСКАЯ РОБОТОТЕХНИКА

В.В. Сергеев, Ю.С. Прибылов, В.А. Соколов ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ПОДВОДНОГО ВИДЕНИЯ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ
V.V. Sergeev, Yu.S. Pribylov, V.A. Sokolov EVALUATION OF TECHNICAL CHARACTERISTICS OF THE ACTIVE UNDERWATER VISION SYSTEM UNDER LABORATORY CONDITIONS 195

В.В. Сергеев, Ю.С. Прибылов, В.Н. Карпов, В.А. Соколов, О.К. Пшеничная АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА ФОТО И ВИДЕО РЕГИСТРАЦИИ ДЛЯ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

V.V. Sergeev, Yu.S. Pribylov, V.N. Karpov, V.A. Sokolov, O.K. Pshenichnaya ADAPTIVE PHOTO AND VIDEO SYSTEM FOR AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLES 201

А.И. Машошин, И.В. Пашкевич ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ
A.I. Mashoshin, I.V. Pashkevich PROBLEM ISSUES OF AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLES INTELLECTUALISATION 206

Л.А. Мартынова, Г.В. Конюхов, Т.А. Гриненкова, Г.А. Подшивалов, А.И. Стариков, А.В. Червинский, Н.И. Горбачев, С.А. Сырцов МЕТОД СНИЖЕНИЯ ВНУТРИОТСЕЧНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА
L.A. Martynova, G.V. Konyukhov, T.A. Grinenkova, G.A. Podshivalov, A.I. Starikov, A.V. Chervinsky, N.I. Gorbachev, S.A. Syrtsov METHOD FOR REDUCING INTRACERABLE TEMPERATURE AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE 213

Е.И. Абрамова, А.А. Кошурина, М.С. Крашенинников РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ОПЕРАТИВНОЙ ЛИКВИДАЦИИ АВАРИЙНЫХ РАЗЛИВОВ НЕФТЕПРОДУКТОВ НА АРКТИЧЕСКОМ ШЕЛЬФЕ
E.I. Abramova, A.A. Koshurina, M.S. Krasheninnikov FAST LIQUIDATION ROBOTIC COMPLEX OF EMERGENCY OIL SPILLS ON THE ARCTIC SHELF 223

Е.С. Брискин, В.Н. Платонов, Н.Г. Шаронов, В.А. Серов, С.А. Устинов О РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМАХ ДВИЖЕНИЯ ЯКОРНО-ТРОСОВЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ ПРИ ПЕРЕНОСЕ В НОВОЕ ПОЛОЖЕНИЕ
E.S. Briskin, V.N. Platonov, N.G. Sharonov, V.A. Serov, S.A. Ustinov ON ANCHOR-ROPE PROPULSION MOTION'S RATIONAL MODES DURING THE MOVEMENT INTO A NEW POSITION 227

А.В. Зуев, А.Н. Жирабок МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ДВИЖИТЕЛЕЙ ПОДВОДНЫХ РОБОТОВ
A.V. Zuev, A.N. Zhirabok METHOD OF CONSTRUCTING FUNCTIONAL DIAGNOSTIC SYSTEMS FOR UNDERWATER ROBOT THRUSTERS 234

А.В. Зуев, А.Н. Жирабок, А.Е. Шумский РАЗРАБОТКА МЕТОДА ИДЕНТИФИКАЦИИ ДЕФЕКТОВ В ДАТЧИКАХ МЕХАТРОННЫХ ОБЪЕКТОВ
A.V. Zuev, A.N. Zhirabok, A.Ye. Shumsky DEVELOPMENT OF A METHOD FOR FAULT IDENTIFICATION IN SENSORS OF MECHATRONIC OBJECTS 240

А.Ю. Коноплин, В.А. Денисов, Т.Н. Даутова, А.Л. Кузнецов, А.В. Московцева ТЕХНОЛОГИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТНПА ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ГЛУБОКОВОДНЫХ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ОПЕРАЦИЙ
A.Yu. Konoplin, V.A. Denisov, T.N. Dautova, A.L. Kuznetsov, A.V. Moskovtseva TECHNOLOGY OF THE ROV USING FOR PERFORMING OF DEEP-WATER RESEARCH OPERATIONS 246

В.Ф. Филаретов, А.Ю. Коноплин, А.В. Зуев, Н.А. Красавин СИСТЕМА ВЫСОКОТОЧНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯМИ ПОДВОДНОГО МАНИПУЛЯТОРА
V.F. Filaretov, A.Yu. Konoplin, A.V. Zuev, N.A. Krasavin SYSTEM OF HIGH-PRECISION MOVEMENTS CONTROL OF UNDERWATER MANIPULATOR 252

А.Ю. Коноплин, А.П. Юрманов, П.А. Пятавин МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИЙ ПОДВОДНОГО МАНИПУЛЯТОРА ДЛЯ СУПЕРВИЗОРНОГО ВЫПОЛНЕНИЯ ОПЕРАЦИЙ
A.Yu. Konoplin, A.P. Yurmanov, P.A. Pyatavin METHOD FOR TRAJECTORY FORMING OF UNDERWATER MANIPULATOR FOR SUPERVISORY IMPLEMENTATION OF OPERATIONS 259

ВОЕННЫЕ И СПЕЦИАЛЬНЫЕ РТК

А.Ю. Волков, А.Н. Косенко, Д.С. Попов МОДУЛЬНОЕ РЕШЕНИЕ АРХИТЕКТУРЫ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
A.Y. Volkov, A.N. Kosenko, D.S. Popov MODULAR SOLUTION FOR THE ARCHITECTURE OF ROBOTIC SYSTEMS 265

С.П. Кульгина, Д.С. Попов, И.Р. Черемный ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ АРХИТЕКТУРЫ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ МОБИЛЬНОГО РОБОТА С УЧЁТОМ РАЗДЕЛЕНИЯ НА ПОДСИСТЕМЫ МЯГКОГО И ЖЁСТКОГО РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ
S.P. Kulgina, D.S. Popov, I.R. Cheremnyy FEATURES OF BUILDING THE ARCHITECTURE OF A DISTRIBUTED INFORMATION AND CONTROL SYSTEM OF A MOBILE ROBOT, TAKING INTO ACCOUNT THE DIVISION INTO SUBSYSTEMS OF SOFT AND HARD REAL TIME 274

И.Б. Прямицын, А.В. Рогов, А.В. Полин СФЕРА ПРИМЕНЕНИЯ УНИВЕРСАЛЬНОЙ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ПЛАТФОРМЫ
I.B. Pryamitsyn, A.V. Rogov, A.V. Polin UNIVERSAL ROBOTIC PLATFORM'S APPLICATION SCOPE 282

А.В. Лобачев, А.В. Местников, А.М. Мудранов РАЗРАБОТКА АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ОБЪЕДИНЕНИЯ И СОГЛАСОВАНИЯ ГРУПП БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАЮЩИХ АППАРАТОВ (ДРОНОВ)
A.V. Lobachev, A.V. Mestnikov, A.M. Mudranov DEVELOPMENT OF THE HARDWARE COMPLEX OF COMBINATION AND ACCORDING TO UNMANNED AIRCRAFT GROUPS (DRONES) 287

А.В. Гордеев, А.М. Мудранов, А.В. Ершов МЕХАТРОННОЕ КОЛЕСО ПОВЫШЕННОЙ ПРОХОДИМОСТИ
A.V. Gordeev, A.M. Mudranov, A.V. Ershov MECHATRONIC WHEEL WITH INCREASED OFF-ROAD CAPABILITIES 291

С*.Г. Цариченко, О.П. Гойдин, С.А. Голь* МОБИЛЬНЫЕ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ И РЕМОНТНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ РАБОТ НА ОБЪЕКТАХ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
S.G. Tsarichenko, O.P. Goidin, S.A. Goll MOBILE ROBOTIC SYSTEMS FOR EMERGENCY RESCUE AND REPAIR WORK AT NUCLEAR FACILITIES 295

Д.С. Попов, О.А. Шмаков ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КАНАЛОВ УПРАВЛЕНИЯ И ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В СОСТАВЕ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НАЗЕМНОГО БАЗИРОВАНИЯ
D.S. Popov, O.A. Shmakov FEATURES OF APPLICATION OF CONTROL AND DATA TRANSMISSION CHANNELS AS PART OF GROUND-BASED MOBILE ROBOTIC SYSTEMS 302

А.А. Шаулин, А.В. Ершов ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МИКРОПРОЦЕССОРОВ «ЭЛЬБРУС» В РОБОТИЗИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ
A.A. Shaulin, A.V. Ershov USING «ELBRUS» MICROPROCESSORS IN ROBOTIC TECHNOLOGICAL COMPLEXES 310

Д.А. Рябухин ПРАКТИЧЕСКИЙ ВЗГЛЯД НА ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙТРОННЫХ МЕТОДОВ ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА ПРИ РАЗВЕДКЕ МИННО-ВЗРЫВНЫХ ЗАГРАЖДЕНИЙ
D.A. Ryabukhin PRACTICAL VIEW OF THE USE OF NEUTRONS METHODS OF ELEMENTAL ANALYSIS IN DEMINING 314

СИМПОЗИУМ «СЕРВИСНАЯ РОБОТОТЕХНИКА»

В.П. Андреев, В.Э. Тарасова

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ПОКАЗАНИЙ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ И ИНФРАКРАСНЫХ ДАТЧИКОВ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТЬЮ

МГТУ «СТАНКИН», МИНОТ РГГУ, Москва, andreevvipa@yandex.ru, viky.ne2@gmail.com

Аннотация

Приведены результаты исследования, цель которого заключается в поиске решений реализации универсального сенсорного модуля для модульного мобильного робота (МР). В данном решении сенсорный модуль представляет собой комплекс ультразвуковых (УЗ) и инфракрасных (ИК) датчиков, комплексирование показаний которых выполняется с помощью искусственной нейронной сети (ИНС). В описанных экспериментах программная реализация ИНС выполняется на платформе Iskra Neo с микроконтроллером ATmega32U4. Цель комплексирования показаний этих датчиков – определить как наличие объекта в окружении мобильного робота (УЗ-датчики), так и его ориентацию по отношению к МР (ИК-датчик). Использование ИНС обеспечивает высокую адаптацию мехатронной системы к объектам окружающего мира. Обучение нейронной сети происходит на ПК с помощью алгоритма Румельхарта-Хинтона-Вильямса (алгоритм обратного распространения ошибки).

Ключевые слова: искусственная нейронная сеть, модульный робот, мобильный робот, сенсорная система.

V.P. Andreev, V.E. Tarasova

OBJECT IDENTIFICATION BY ULTRASONIC AND INFRARED SENSORS DATA FUSION USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

MSTU «STANKIN», International Institute of the New Educational Technologies, RSUH, Moscow, andreevvipa@yandex.ru, viky.ne2@gmail.com

Abstract

The article presents the results of the research, the purpose of which is to find solutions for the implementation of a universal sensor module for a modular mobile robot (MR). In this solution, the sensor module is an fusion of ultrasonic and infrared sensors, the integration of the readings of which is performed using an artificial neural network (ANN). In the described experiments, the software implementation of ANN is performed on the Iskra Neo platform with an ATmega32U4 microcontroller. The purpose of fusion the sensors readings is to determine both the presence of an object (by ultrasound sensors) in the environment of a mobile robot (MR) and its orientation relative to MR (by infrared sensor). The use of ANN provides high adaptation of the mechatronic system to the objects of the environment. Neural network training performed on a PC using the Rumelhart-Hinton-Williams algorithm (back propagation error algorithm).

Key words: artificial neural network, modular robot, mobile robot, sensor system.

Одной из актуальных задач современной робототехники является задача создания автономных мобильных роботов (МР), способных ориентироваться в пространстве, уклоняться от препятствий и манипулировать объектами, т.е. принимать решения в сложной, реальной обстановке. Планирование маршрута мобильных роботов можно разделить на глобальное планирование маршрута на основе карты местности и локальное планирование маршрута на основе сигналов от дистанционных сенсоров, поступающих непрерывно. Особенностью локального планирования является реализация этого процесса в реальном масштабе времени. В настоящее время всё больше применяется теория искусственных нейронных сетей (ИНС) для проектирования системы управления движением мобильных роботов.

Искусственные нейронные сети – совокупность взаимодействующих между собой искусственных нейронов или набор математических и алгоритмических методов для решения широкого круга задач. Искусственный или формальный нейрон (ФН) – математическая абстракция, упрощённая модель биологического нейрона [1].

Уникальное свойство ИНС – универсальность. Хотя для многих задач существуют эффективные математические методы решения и несмотря на то, что ИНС проигрывают специализированным методам для конкретных задач, благодаря универсальности и перспективности решения глобальных задач, например, построения искусственного интеллекта и моделирования процесса мышления, они являются важным направлением исследования, требующим тщательного изучения.

Достоинствами ИНС являются:

1. Обучаемость. Создав ИНС, можно обучить её решению необходимой задачи (естественно, в рамках заданных ограничений).
2. Способность к обобщению. После обучения ИНС становится нечувствительной к малым изменениям входных сигналов (шуму или вариациям входных образов) и даёт с высокой вероятностью правильный результат на выходе. Иными словами, система оказывается робастной и вырабатывает близкое к оптимальному решение.
3. Способность к абстрагированию. Если предъявить сети несколько искажённых вариантов входного образа, то сама сеть может создать на выходе идеальный образ, с которым она никогда не встречалась.

В работе [2] для управления мобильным роботом-экскурсоводом применяется ИНС на основе нейробиологической модели Вальцева В.Б. [3]. На вход сети поступают три сигнала – от ультразвукового датчика препятствия (УЗ-датчика), датчика уровня заряда аккумулятора и датчика, определяющего точность позиционирования робота на полосе движения. Предполагается, что сигналы имеют разные приоритеты или значимость (высший приоритет имеет сигнал от датчика препятствий – требование безопасности). Системе следует определить какую задачу должен решать робот в текущий момент (реакция на препятствие, позиционирование на линии или запуск процедуры реакции на снижение разряда аккумулятора), т.е. динамическое планирование поведения робота. Приведённые в работе [4] результаты экспериментов показывают принципиальную возможность использования ИНС для решения задач управления, но, как указано в статье, данный метод имеет технические сложности, связанные с необходимостью быстрого моделирования, а также трудоёмкостью процесса создания и настройки нейронной сети.

В работе [5] описана мобильная платформа с размещёнными на ней IP-камерой (для определения направления целевой точки), ультразвуковыми и инфракрасными (ИК) датчиками (определение препятствий), магнетометром и акселерометром (ориентировка на местности). За управление платформой отвечает микроконтроллер (МК) Arduino Duemilanove, получающий команды с управляющего персонального компьютера (ПК) через Bluetooth-модуль. Нейронная сеть в виде многослойного персептрона реализована на ПК и рассчитывает направление движения МР на основе данных, получаемых от телекамеры. Информация о направлении по Bluetooth-соединению поступает на МК Arduino, который на основе данной информации и информации от датчиков с помощью реализации алгоритма нечёткой логики производит расчёт параметров движения и формирует команды управления. Данный алгоритм успешно реализован, но его работоспособность зависит от устойчивости каналов связи.

В работе [6] связали готовую библиотеку ИНС, содержащую обучение при помощи алгоритма обратного распространения ошибки, с МК Arduino для реализации управления микроклиматом в инкубационной камере, что показало свою эффективность и простоту решения.

В работах [7], [8] рассмотрен подход, при котором используется распределённая система управления и обработки сенсорной информации. Здесь общая задача разбивается на подзадачи по функционально-модульному принципу, и эти задачи распределяются между модулями. Такой подход обеспечивает существенное снижение требований к вычислительной мощности вычислителей многопроцессорной системы и увеличение быстродействия системы в целом.

Общая цель настоящего исследования заключается в поиске решений реализации универсального сенсорного модуля для модульного мобильного робота. В данном решении сенсорный модуль представляет собой комплекс ультразвуковых и инфракрасных датчиков, комплексирование показаний которых выполняется с помощью искусственной нейронной сети.

Гипотеза исследования: использование УЗ-датчиков позволит обнаружить объект и определить ориентировочную дальность до него, а одновременное использование сканирующих угловых пе-

ремещений ИК-датчика позволит определить форму объекта и его ориентацию по отношению к самому мобильному роботу.

Цель исследования: исследовать возможность использования ИНС для комплексирования данных от УЗ- и ИК-датчиков с целью идентификации объектов окружения или препятствий в процессе движении мобильного робота в недетерминированной среде. В отличие от использования систем технического зрения, данное техническое решение позволяет существенно снизить информационный поток, что обеспечит решение задач навигации робота встраиваемыми системами (микропроцессорами или одноплатными ЭВМ невысокой производительности) в режиме реального времени.

В рамках данного исследования были решены следующие задачи:

1. Разработан и изготовлен лабораторный макет управляемого от микроконтроллера и ЭВМ поворотного устройства с закреплённым на нём ИК-датчиком.
2. Исследована возможность использования ИНС для комплексирования данных от УЗ-датчиков для объезда препятствий МР при условии использования распределённой системы управления: один микропроцессор отвечает за работу ИНС, а второй – за режим работы электродвигателей транспортной платформы.
3. Исследована возможность использования сканирующих угловых перемещений ИК-датчика для определения формы объекта.
4. Реализован на микропроцессоре алгоритм работы ИНС, позволяющий по показаниям УЗ датчиков и сканирующего ИК-датчика определять форму препятствия.

Использование искусственной нейронной сети для комплексирования данных от группы ультразвуковых датчиков расстояния

Цель данного эксперимента: исследовать возможность использования ИНС для комплексирования данных от ультразвуковых датчиков для объезда препятствий мобильным роботом при условии использования распределённой системы управления: один микропроцессор отвечает за работу ИНС, а второй – за режим работы электродвигателей транспортной платформы. В данном случае ИНС включена в обратную связь системы управления движением МР, что отличает данное решение от типового, когда в обратной связи системы управления используется специальный фильтр.

Постановка эксперимента

Для экспериментов использовалась колёсная транспортная платформа с сенсорной системой, состоящей из трёх одновременно запускаемых УЗ-датчиков HC-SR04 (см. рис. 1). Нейронная сеть реализована на платформе Iskra Neo [9].

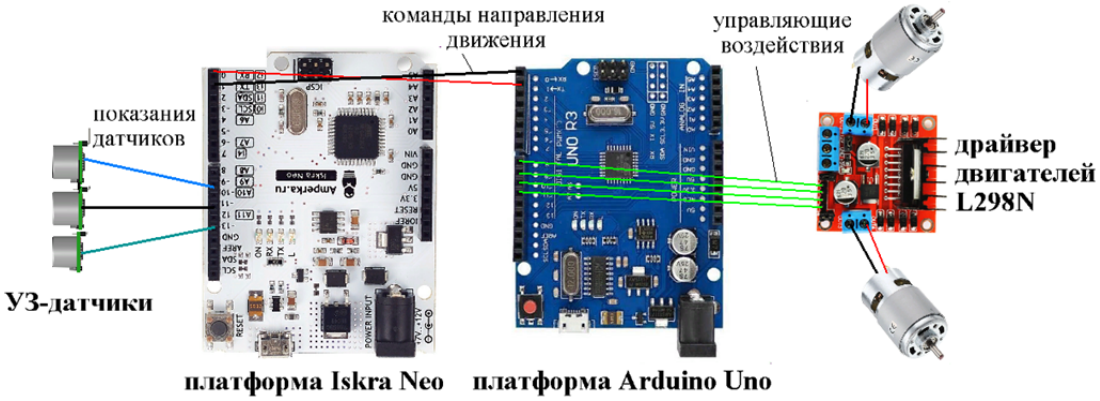


Рисунок 1 – Устройство сенсорной системы

Показания трёх вертикально расположенных УЗ-датчиков поступают на цифровые входы Iskra Neo, что является входными данными для ИНС. Решение ИНС в виде вектора направления дальнейшего движения поступает на вход Arduino Uno. Для управления двигателями управляющие сигналы от Arduino Uno подаются на драйвер L298N.

Использовалась следующая наиболее распространённая архитектура нейронной сети (см. рис. 2):

- три слоя (входной, скрытый и выходной), по 3 нейрона в каждом из слоёв;
- нейроны каждого слоя соединены по принципу «каждый с каждым»;
- на каждый из трёх входов нейронной сети поступают показания от одного из трёх УЗ-датчиков расстояния соответственно (X_1, X_2, X_3);

- выходом нейронной сети является вектор направления дальнейшего движения (y_1, y_2, y_3).

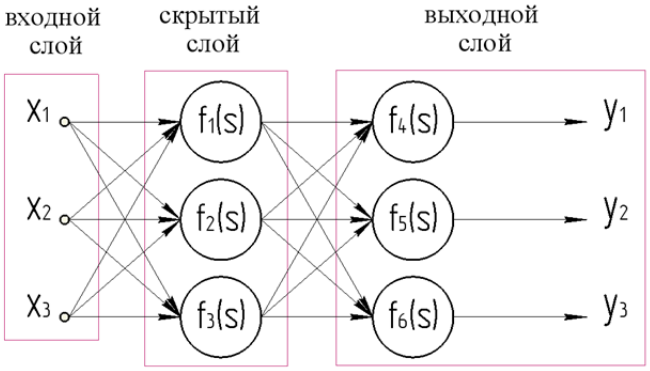


Рисунок 2 – Структура используемой ИНС

Для обучения нейронной сети выполняется подготовка обучающей выборки. Обучающая выборка состоит из входных и выходных значений. Входными данными являются показания от трёх одновременно запускаемых УЗ-датчиков – расстояния до объекта, расположенного как показано на рис. 3, при различном расстоянии L. Выходным значением является вектор, компоненты которого записываются в зависимости от этих показаний. Использовались следующие комбинации значений выходного вектора:

- (0, 1, 0) – движение МР прямо (все три датчика показывают $L > 20$ см);
- (1, 0, 0) – поворот МР направо (первый датчик показывает $L < 20$ см);
- (0, 0, 1) – поворот МР налево (третий датчик показывает $L < 20$ см);

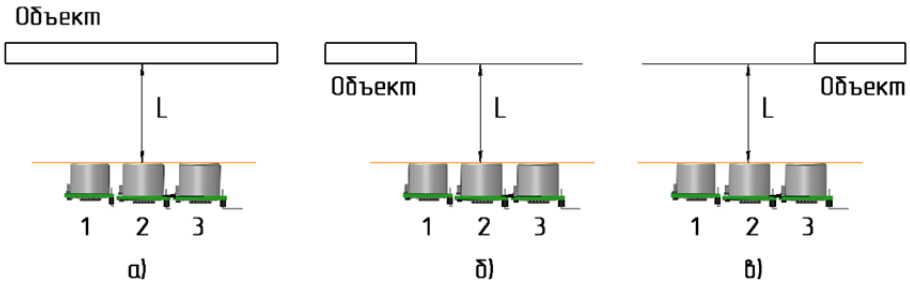


Рисунок 3 – Расположение объекта относительно датчиков (УЗ-датчики ориентированы вертикально)

Обучение проводилось по алгоритму обратного распространения ошибки (алгоритм Румельхарта-Хинтона-Вильямся) [10].

Обучающая выборка формируется следующим образом. Перед мобильным роботом располагается объект на определённом расстоянии L = 5 – 100 см с шагом 5 см. С одновременно запускаемых датчиков снимаются показания, представляемые в виде вектора из трёх значений, которые в последующем подаются на вход ИНС и в зависимости от расстояния L записывается соответствующий выходной вектор направления дальнейшего движения.

Результаты экспериментальных исследований

Результаты экспериментов по идентификации формы объектов с помощью УЗ-датчиков были описаны в статьях [11], [12].

В качестве объектов использовались картонные коробки, расположенные под различными углами. Результаты приведены на рис. 4.

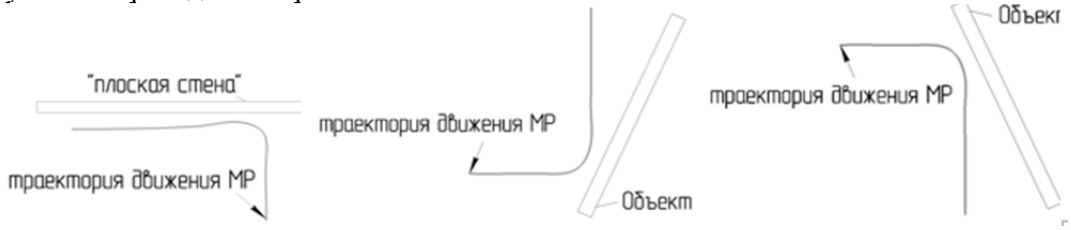


Рисунок 4 – Траектория движения робота

Вывод: МР с ИНС обнаружил препятствие и успешно избежал столкновения; уклонился от наклонных объектов.

Использование сканирующих угловых перемещений ИК-датчика для определения формы объекта

Цель описанных ниже экспериментов состоит в том, чтобы исследовать возможность определения угла наклона объекта, используя показания сканирующего ИК-датчика Sharp.

Эксперимент: определить угол наклона объекта α, взятых при различных углах поворота φ ИК-датчика по двум точкам *(-φ; φ)* (см. рис. 5). В таблицах 1-3 дана часть полученных данных, абсолютная ошибка $\Delta = \left|\alpha - \alpha_{рассчит}\right|$, где $\alpha_{рассчит}$:

$$\alpha_{рассчит} = \operatorname{atan}\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right)$$

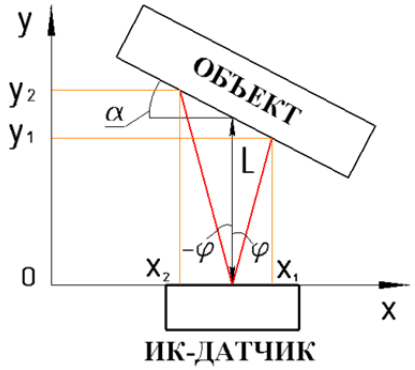


Рисунок 5 – Схема эксперимента

Результаты экспериментальных исследований

1) l = 6 см

Таблица 1 – Результаты

φ	**α**	**-1**	**0**	**1**	$\alpha_{рассчит}$	Δ
1°	30	107,33	106,58	102,35	~ 34	4
	60	109,07	104,84	101,35	~ 56	4
φ	**α**	-2	0	2	$\alpha_{рассчит}$	Δ
2°	30	109,32	106,58	98,86	~ 33	3
	60	109,57	104,84	97,37	~ 62	2

2) l = 9 см

Таблица 2 – Результаты

φ	**α**	**-1**	**0**	**1**	$\alpha_{рассчит}$	Δ
1°	30	72,47	69,23	66,74	~ 35	5
	60	109,07	70,02	97,37	~ 54	6
φ	**α**	-2	0	2	$\alpha_{рассчит}$	Δ
2°	30	72,96	69,23	65,49	~ 30	0
	60	112,57	74,14	94,42	~ 61	1

3) l = 12 см

Таблица 3 – Результаты

φ	**α**	**-1**	**0**	**1**	$\alpha_{рассчит}$	Δ
1°	30	42,48	39,37	36,54	~ 34	4
	60	44,27	39,23	30,31	~ 40	20
φ	**α**	-2	0	2	$\alpha_{рассчит}$	Δ
2°	30	46,60	29,21	25,40	~ 29	1
	60	49,53	34,84	27,32	~ 39	21

Вывод: с помощью ИК-датчика можно определять ориентацию объекта при $L < 12$ см; при $L > 12$ см можно сказать, что объект находится под неопределённым углом; абсолютная погрешность вызвана, скорее всего, случайными составляющими при проведении эксперимента; необходимо использовать алгоритм фильтрации артефактов. Можно использовать разные углы качания ИК-датчика при разных расстояниях.

Использование алгоритма работы ИНС, позволяющий по показаниям УЗ датчиков и сканирующего ИК-датчика определять форму препятствия

Цель данного эксперимента: реализация на микроконтроллере ИНС, выполняющей по показаниям УЗ датчиков и сканирующего ИК-датчика определение формы препятствия.

Был изготовлен комплексный датчик (см. рис. 6), где УЗ датчики зафиксированы неподвижно, а ИК-датчик, с помощью сервопривода совершает сканирующие угловые перемещения в горизонтальной плоскости.

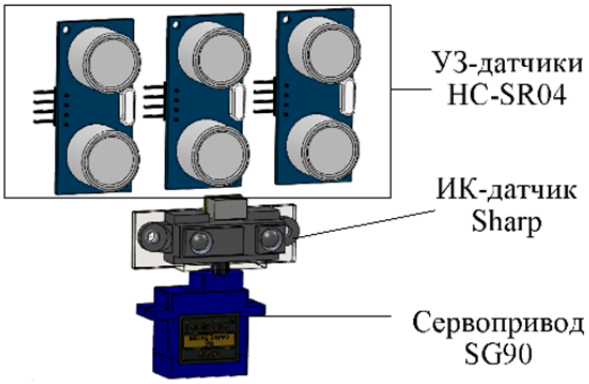


Рисунок 6 – Вид комплексного датчика

Схема управления включает две нейронные сети (см. рис. 7).

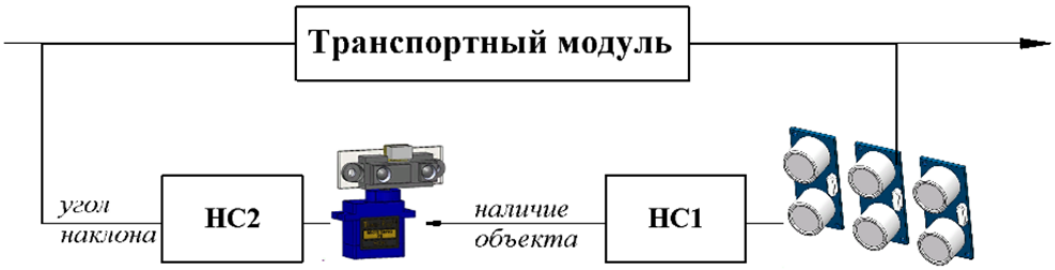


Рисунок 7 –Управляющая схема

Первая ИНС (НС1) имеет два выходных значения – «да», «нет» (выдаёт на свой выход информацию о наличии объекта), вторая ИНС (НС2) три выходных значения – «15», «45», «60» (выдаёт на свой выход информацию о приблизительном угле наклона объекта). Таким образом, обе сети решают такие задачи, как обнаружение объекта и определение его ориентации соответственно.

Объезд препятствия выглядит следующим образом. Расстояния с УЗ-датчиков передаются на вход НС1 – после обнаружения объекта перед МР на расстоянии $L \leq 20$, выходным значением сети становится выход «да». Далее происходит сканирование объекта с помощью ИК-датчика и под управлением НС2 определяется угол наклона объекта.

Эксперименты по идентификации препятствий типа «углы, образованные стенами» (внутренние и внешние), или «дверные проёмы» (с открытыми или закрытыми дверями) дали положительный результат.

На МР реализована часть системы управления, позволяющая огибать препятствия с помощью УЗ- датчиков. Выяснена возможность использования ИК-датчика для определения угла наклона. Эксперименты показали, что использование комплексного датчика расстояний при реализации анализа и комплексирования данных разнотипных датчиков на достаточно простой ИНС обеспечивает идентификацию объектов относительно простых форм. Использование простой ИНС даёт возможность реализовать её на встраиваемых системах при обеспечении режима «real time», что существенно для МР с модульной архитектурой.

В дальнейшем предполагается исследовать возможность использования ИНС с большим количеством входов, на которые одновременно поступают показания как УЗ-датчиков, так и ИК-датчиков расстояния.

Работа выполняется при поддержке РФФИ, грант 19-07-00892а.

Литература

1. [В Интернете]. Доступ: https://neuralnet.info/chapter /%d0%b2% d0%b2%d0% b5%d0% b4%d0%b5% d0%bd%d0%b8%d0%b5/ (дата обращения: 10.08.2020).

2. Карпов В. Э. и Вальцев В. Б. Динамическое планирование поведения роботов на основе сети «интеллектуальных» нейронов. Москва: Искусственный интеллект и принятие решений, 2009. 58-69 с.

3. Valtzev V. B., Grigoriev V. R., Nikonov V. G. и Kobzar I. V. Brainputer and Neural Architecture of Neurocomputers, т. 1, № 1, 1996. pp. 54-59.

4. Зотин А. Г. и Саяпин А. В. Учебная распределенная система управления мобильной колесной платформой с использованием видео- и сенсорной информации, 2015.

5. Зотин А. Г. и Саяпин А. В. Разработка полуавтономной исследовательской системы с использованием видеоданных и сенсорных устройств. Программные средства и информационные технологии, 2013. 203-204 с.

6. Куринька В. С. Синтез нейронной сети на микроконтроллере arduino для эффективного управления в микроинкубационной камере. Инноватика-2017, 2017. 64-68 с.

7. Andreev V.P. The Concept of Using the Theory of Multi-Agent Systems to Design Control Systems for Mobile Robots with Modular Architecture / Proceedings of the International Scientific and Technological Conference EXTREME ROBOTICS. ISSN: 2658-7645. – SaintPetersburg: OOO «Izdatel'sko-poligraficheskii kompleks «Gangut» Publ., 2019. – P.524-534.

8. Андреев В.П., Подураев Ю.В. Функционально-модульный принцип построения гетерогенных мобильных роботов // Экстремальная робототехника (ЭР-2016). Труды международной научно-технической конференции. – Санкт-Петербург: ООО «АП4Принт», 2016. – С.44 – 49.

9. [В Интернете]. Доступ: https://static.chipdip.ru/lib/918/DOC002918079.pdf (дата обращения: 10.08.2020).

10. Лохин В. М. Развитие технологий интеллектуального управления в институте кибернетики МИРЭА, Вестник МГТУ МИРЭА, т. I, № 3, 2015. 30-40 с.

11. Андреев В.П., Тарасова В.Э. Определение формы препятствий мобильным роботом с помощью сканирующих угловых перемещений ультразвукового датчика // Мехатроника, Автоматизация, Управление . – М.: Изд-во «Новые технологии», ISSN: 1684-6427. – 2017. – №11, Том 18. – С.759 – 763.

12. Andreev, V. & Tarasova, V. Identification of the Obstacle Shape Using the Ultrasonic Sensors Module of Modular Mobile Robot, Proceedings of the 29th DAAAM International Symposium, pp.1001-1009, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-20-4, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria.

Н.А. Павлюк, А Д. Ковалев, П.А. Смирнов

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ СТЕРЕОЗРЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ НАВИГАЦИИ

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, antei.hasgard@gmail.com

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы реализации стереоскопического технического зрения на универсальной роботизированной мобильной платформе, предназначенной для обслуживания посетителей торгово-развлекательных комплексов. Проанализированы существующие экспериментальные и индустриальные решения, предназначенные как для применения в сфере логистики, так и для обслуживания клиентов. Описываются программно-аппаратные решения, применяемые при реализации технического зрения на робототехнической платформе. Описаны особенности калибровки видеокамер, служащих для решения задач визуальной одометрии. Особое внимание уделено формированию и настройке стереопар при использовании мобильных платформ. Рассмотрены алгоритмы, позволяющие учитывать расхождения в данных камер. Алгоритмы, представленные в работе, совместимы на практике с любыми типами монокулярных видеокамер и вариантами калибровки. Предложенные решения применимы при использовании камеры как в видимом, так и в инфракрасном спектре.

Ключевые слова: мобильная платформа, техническое зрение, лидар, калибровка, стереопара, сопоставление изображений, навигационные алгоритмы.

N.A. Pavliuk, A.D. Kovalev, P.A. Smirnov

MATHEMATICAL FOUNDATION OF A STEREO-VISION SYSTEM OF A ROBOTIC PLATFORM IN TERMS OF NAVIGATION PROBLEM SOLVING

St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, antei.hasgard@gmail.com

Abstract

This paper considers the problem and details of implementation of stereoscopic technical vision in operation of a mobile robotic platform, intended for customer service and human-machine interactions in retail parks. Currently existing experimental and industrial solutions are analyzed, which are employed as for logistic, as for service purposes. Hardware and software solutions are described, that are utilized on the platform to implement the features of technical vision. Camera calibration details are considered in terms of the visual odometry problem. Particular attention is paid to stereovision, establishment and adjustment of stereo-pairs in mobile platform operation. The paper shows development and discussion of algorithms, which enable accounting for data disparity in cameras in context of stereovision. The algorithms, presented in the paper, can be put in practice with any monocular cameras and calibration variants. The proposed solutions can be applied, when the camera is utilized in the visible or infrared part of the spectrum.

Key words: mobile platform, technical vision, lidar, calibration, stereo pair, image matching, navigation algorithms.

Роботизированные мобильные платформы находят все более широкое применение в различных областях промышленности и сферы услуг. К мобильным платформам предъявляются растущие требования, связанные с обеспечением автономности и интерактивности, среди таких требований — решение логистических задач [1, 2]. Обеспечение навигации мобильной платформы представляет собой особенно сложную задачу при работе в неизвестной или неструктурированной динамической среде. В таких условиях первоочередное значение имеет эффективная работа датчиков и камер, применяемых для построения двухмерной карты помещения и определения препятствий. Камеры требуют точной калибровки, после которой могут использоваться для решения задач визуальной одометрии. Целью данной работы является разработка методов калибровки монокуляр-

ных камер для формирования стереопар при решении описанного набора задач. Здесь рассмотрена конструкция мобильной платформы, оснащенной 2-5 камерами, которые, наряду с инфракрасными датчиками и лидарами, играют важнейшую роль, являются важнейшим средством в обеспечении навигации и человеко-машинного взаимодействия. Также представлено математическое обеспечение для реализации стереозрения с использованием монокулярных камер.

В научной литературе описан ряд роботизированных устройств, ориентированных на активное взаимодействие с пользователем и оборудованных камерами, датчиками и лидарами. Перечислим важнейшие из них. KMR Miiwa [5] — комплексное решение компании KUKA для оптимизации производства. Платформа оснащена шасси на всенаправленных колесах, манипулятором с 7 степенями свободы, камерами и датчиками расстояния. Данная система предназначена для упрощения работы оператора при упаковке продукции и комплектации контейнеров. Индустриальное решение компании Mobile Industrial Robots, MiR100 – мобильная платформа с грузоподъемностью до 100 килограммов [6, 7]. Платформа включает: грузовое шестиколесное шасси, интерфейсы расширения для подключения дополнительного оборудования, датчики для определения препятствий и компьютерной платформы Intel NUC. Система допускает установку дополнительных устройств от различных производителей для построения на базе MiR100 нужной конфигурации оборудования, зависящей от поставленных задач. В работе [8] представлен робот-ассистент Cosiro, разработанный для помощи людей с ограниченными возможностями. В состав устройства входит шасси на всенаправленных колесах, оснащенное 2D и 3D лидарами, камерами и микрофонами для распознавания людей и объектов. Также антропоморфной платформы с двумя манипуляторами с семью степенями свободы, оснащенных захватными механизмами с двумя степенями свободы. Компания Fetch Robotics разработала мобильную платформу-манипулятор Fetch и грузовую мобильную платформу Freight [9], которые предназначены для решения задач складской логистики. Устройства работают в сочетании с облачной платформой FetchCore, управляющей логистикой складских помещений, обеспечивающей автономность платформы и актуальность данных о складе, на территории которой осуществляется работа. Устройство предназначено для работы в закрытом пространстве склада, работа на улице не предусмотрена. Навигация устройств в помещении обеспечивается комбинированным применением лидаров и 3D-камер. Мобильная платформа Lazaro [10] представляет собой транспортное средство для перевозки полезной нагрузки, в частности, оборудования с последующей установкой данного оборудования. Конструкция из двух пар колес и вспомогательного плеча позволяет платформе преодолевать ступени, пандусы и ямы. Lazaro оборудована IMU-сенсором и лидаром для навигации и ориентации в пространстве. Робот SPENCER [13] предназначен для информирования и помощи в ориентации посетителей крупных аэропортов. SPENCER состоит из подвижной части и тела робота, которое содержит две камеры высокого разрешения, сенсорный экран, микрофон, считыватель посадочных талонов и два ноутбука. Подвижная платформа включает в себя колеса, двигатели и лазерный дальномеры.

Во всех рассмотренных решениях важнейшую роль играет обеспечение взаимодействия робота с окружающей средой, реализуемое, прежде всего, на уровне системы очувствления - датчиков и камер. При этом существуют разнообразные условия, в которых лидары и датчики не являются достаточным оснащением для корректной и быстрой навигации роботизированной платформы, и для эксплуатации робота требуется более полная визуальная информация. Обработка визуальных данных, поступающих в режиме реального времени, требует специфического аппаратного обеспечения, в частности, камер. Рассмотрим устройство мобильной платформы, предлагаемой в данной работе, и калибровку камер, используемых на данной платформе.

Конструкция и техническое оснащение мобильной платформы

Основу конструкции мобильной роботизированной платформы составляет алюминиевый профиль, обеспечивающий высокую грузоподъемность и стабильность платформы при передвижении. Конструкция платформы спроектирована таким образом, чтобы компоненты системы перемещения были съемными и сменными, в зависимости от конкретных задач. Съемные компоненты платформы также более удобны в обслуживании. На рис. 1 приведено изображение МРП 1.100 с установленным на ней дополнительным оборудованием (ДИМ).

МРП имеет следующие технические характеристики, техническое оснащение и аппаратное обеспечение:

- Размеры МРП – 60х60х32 см;
- Размеры ДИМ – 60х60х105 см;
- Размеры МРП + ДИМ – 60х60х135 см;
- Грузоподъемность платформы – 20 кг;

- Аккумуляторный блок – LiPo 44000 мАч 14,8V;
- Всенаправленные колеса;
- 2 лидара с полем обзора 360^{O};
- 4 широкоугольные камеры с полем обзора 170^{O};
- 16 ИК-датчиков с дальностью обнаружения препятствий до 0,5 м;
- Вычислительный модуль Nvidia Jetson TX2;
- Операционная система Ubuntu 18 + ROS Melodic.

Конструкция роботизированного устройства МРП 1.100 рассчитана на подключение дополнительного оборудования: это контейнеры, манипуляторы или соединительные устройства. Модульная конструкция устройства позволяет осуществлять замену узлов, отдельных механизмов и электроники для адаптации функциональности под нужды предприятия и пользователей, не затрачивая дополнительные средства. Программно-аппаратное обеспечение устройства позволяет ему функционировать автономно или под управлением оператора.

Рисунок 1 – Конфигурация МРП 1.100 для применения в торгово-развлекательных комплексах

В качестве главного вычислительного модуля платформы используется NVidia Jetson TX2 [12-15]. Лидары используются для построения интерактивной двухмерной карты помещения и локализации устройства. Для получения информации об окружающей среде используются широкоугольные камеры. Также на МРП 1.100 устанавливается дополнительное устройство (терминал) для представления информации пользователю при человеко-машинном взаимодействии. Устройство включает в себя компьютерную платформу Intel NUC, которая обрабатывает информацию, поступающую с контроллера Microsoft Kinect. [6], предназначенного для взаимодействия с пользователем, сенсорный экран и контейнерный блок. Также предусмотрена возможность перевозки стандартных корзин (не более двух).

Широкоугольные камеры, как и лидары, устанавливаются на торцах платформы. Для более полного визуального охвата окружающего пространства, обеспечиваемого применением стереозрения, от 2 до 5 камер устанавливается в корпусе устройства, на высоте 0,9 метра от пола. Для получения корректного представления об окружении платформы производится непрерывная оценка положения устройства и положения объектов, окружающих платформу. Перед использованием камер требуется предварительно оценить их внутренние и внешние параметры калибровки.

В данной конфигурации мобильной платформы используются две монокулярные камеры. Далее мы рассмотрим математический аппарат, предназначенный для решения основных задач калибровки и получения стереоизображения, а также расчета карт глубины сцены. Остановимся на калибровке камеры, расчете ее внутренних и внешних параметров.

Для обеспечения требуемой для стереозрения конфигурации камер разработан алгоритм калибровки монокулярных камер, установленных на платформе. Данный алгоритм включает в себя следующие этапы:

1. Настройка внутренних и внешних параметров камеры. Внутренние параметры калибровки камеры описывают следующие величины: 1) фокусное расстояние, 2) соотношение сторон изображения, 3) угол наклона пикселя, 4) смещение центра сенсора камеры относительно центра изображения, 5) параметры дисторсии линзы. Внешние параметры камеры описывают положение и ориентацию камеры в пространстве.
2. Оптимизация вышеперечисленных параметров для обеспечения совместной работы камер.

3. Расчет карты глубины изображения. Глубина изображения рассчитывается с помощью алгоритмов стерео-сопоставления изображений с двух камер, расчета стоимости расхождения изображений и уточнения показателей расхождения для повышения детализации итогового изображения.

Если камера находится в движении, то требуется постоянно производить расчет ее обновляющихся внешних параметров.

Внутренние и внешние параметры калибровки камеры

Матрица внутренней калибровки K параметризуется 5 значениями: $\alpha = kf$, $\beta = lf$, где f - фокусное расстояние, k, l - параметры масштабирования. Единицами измерения параметров α, β являются пиксели. Угол θ - угол наклона пикселя. Параметры u_0, v_0 - смещение центра сенсора камеры относительно центра изображения c_0 в пикселях. Предполагается, что эффекты дисторсии линзы являются минимальными и ими можно пренебречь. Координаты пикселей изображения u, v из координат точки $[X \quad Y \quad Z]^T$ в системе координат камеры вычисляются следующим образом:

$$\begin{aligned} u &= \alpha \frac{X}{Z} - \alpha \cot\theta \frac{Y}{Z} + u_0, \\ v &= \frac{\beta}{\sin\theta} \frac{Y}{Z} + v_0. \end{aligned} \tag{1}$$

Эти параметры в матричной форме:

$$K = \begin{bmatrix} \alpha & -\alpha\cot\theta & u_0 & 0 \\ 0 & \frac{\beta}{\sin\theta} & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \qquad \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & -\alpha\cot\theta & u_0 & 0 \\ 0 & \frac{\beta}{\sin\theta} & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}. \tag{2}$$

Матрица внешней калибровки преобразует координаты точек сцены из системы координат мира, в систему координат камеры:

$$E = \begin{bmatrix} {}^C_W R & {}^C\mathbf{O}_w \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix}, \tag{3}$$

где, ${}^C_W R$ - матрица вращения системы координат мира W относительно системы координат камеры C, ${}^C\mathbf{O}_w$ – координаты центра системы координат мира W в системе координат камеры C.

Матрица внешней калибровки параметризуется 6 значениями: тремя параметрами из матрицы вращения и тремя параметрами из вектора перемещения. Путем умножения матриц внутренней и внешней калибровки получается матрица калибровки камеры M:

$$\begin{aligned} M &= \begin{bmatrix} \alpha & -\alpha\cot\theta & u_0 & 0 \\ 0 & \frac{\beta}{\sin\theta} & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^C_W R & {}^C\mathbf{O}_W \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \\ &= KE. \end{aligned} \tag{4}$$

Матрица калибровки камеры используется для преобразования из системы координат окружающего мира ${}^W\mathbf{P}$ в систему координат изображения:

$$\begin{aligned} \mathbf{p} &= \begin{bmatrix} \alpha & -\alpha\cot\theta & u_0 & 0 \\ 0 & \frac{\beta}{\sin\theta} & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^C_W R & {}^C\mathbf{O}_W \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} {}^W\mathbf{P}, \\ \mathbf{p} &= M\ {}^W\mathbf{P}. \end{aligned} \tag{5}$$

Матрица калибровки камеры имеет всего 11 параметров: 5 параметров матрицы внутренней калибровки и 6 параметров матрицы внешней калибровки. Имея матрицу калибровки камеры, можно получить координаты u, v в системе координат изображения в пикселях:

$$\begin{aligned} u &= \frac{\mathbf{m}_1^T {}^W\mathbf{P}}{\mathbf{m}_3^T {}^W\mathbf{P}}, \\ v &= \frac{\mathbf{m}_2^T {}^W\mathbf{P}}{\mathbf{m}_3^T {}^W\mathbf{P}}. \end{aligned} \tag{6}$$

Линейная калибровка камеры осуществляется методом непосредственной линейной трансформации. Имея $i = 1, \ldots, n$ известных соответствующих точек в системе координат мира $\mathbf{P}_i$ и в системе координат изображения $\mathbf{p}_i$, необходимо найти матрицу внутренней калибровки камеры:

$$\begin{bmatrix} \mathrm{P}_i^T & 0^T & -u_i\mathrm{P}_i^T \\ 0^T & \mathrm{P}_i^T & -v_i\mathrm{P}_i^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathrm{m}_1 \\ \mathrm{m}_2 \\ \mathrm{m}_3 \end{bmatrix} = 0. \quad (7)$$

Для точек $i = 1, \dots, n$ получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{P}_1^T & \mathbf{0}^T & -u_1\mathbf{P}_1^T \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{P}_1^T & -v_1\mathbf{P}_1^T \\ & \vdots & \\ & \vdots & \\ \mathbf{P}_i^T & \mathbf{0}^T & -u_i\mathbf{P}_i^T \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{P}_i^T & -v_i\mathbf{P}_i^T \\ & \vdots & \\ & \vdots & \\ \mathbf{P}_n^T & \mathbf{0}^T & -u_n\mathbf{P}_n^T \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{P}_n^T & -v_n\mathbf{P}_n^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{11} \\ m_{12} \\ m_{13} \\ m_{14} \\ m_{21} \\ m_{22} \\ m_{23} \\ m_{24} \\ m_{31} \\ m_{32} \\ m_{33} \\ m_{34} \end{bmatrix} = \mathbf{0}. \quad (8)$$

Данная система уравнений относится к классу линейных однородных систем уравнений и сокращенно записывается в следующей форме:

$$A\mathbf{m} = \mathbf{0}. \quad (9)$$

В нашей системе 12 неизвестных (11 в случае, если поделить все элементы матрицы M на элемент m_{34}). Для ее решения нам требуется 6 соответствующих точек. При использовании нелинейной модели дисторсии линзы матрица M, полученная в результате решения данного уравнения, может быть использована как начальное значение для нелинейного метода калибровки [3].

Калибровка стереокамеры

На данном этапе обеспечивается подготовка к получению стереоизображения на основе данных, полученных от монокулярных камер. Предполагая, что две камеры откалиброваны, мы работаем в нормализованных координатах изображения. Тогда соответствующие внутренние матрицы калибровки камер: $K_i = [I, \mathbf{0}]$, где $i = 1{,}2$.

Для случая откалиброванных камер получаем эпиполярное ограничение:

$$\mathbf{x}_2^T\hat{T}R\mathbf{x}_1 = 0, \quad (10)$$

где матрица $E = \hat{T}R$ является существенной матрицей.

Для некалиброванных камер нам необходимо явно включить уравнения матрицы K_i внутренней калибровки камер в уравнение, представленное выше:

$$\mathbf{x}_2^T F\mathbf{x}_1 = 0, \quad (11)$$

где F – фундаментальная матрица, вычисляемая как $F = K_2^{-T}\hat{T}RK_1^{-1}$.

Имеем N соответствующих пар точек $\mathbf{x}_{1n}, \mathbf{x}_{2n}$ с $n = 1, \dots, N$, являющихся проекциями точки $\boldsymbol{X}_n$ координат сцены на сенсор камеры.

$$\lambda_{2n}\mathbf{x}_{2n} = R\lambda_{1n}\mathbf{x}_{1n} + T \quad (12)$$

Для каждой такой точки существует эпиполярное ограничение:

$$\mathbf{x}_{2n}^T F\mathbf{x}_{1n} = 0. \quad (13)$$

Для нахождения фундаментальной матрицы F нам включить N эпиполярных ограничений в систему уравнений:

$$[x_{2n} \quad y_{2n} \quad 1] \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{13} \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} \\ F_{31} & F_{32} & F_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1n} \\ y_{1n} \\ 1 \end{bmatrix} = 0, \quad (14)$$

где матрица F является неизвестной. Нам необходимо оценить 9 неизвестных параметров в матрице F. В результате формула принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} x_{2n}F_{11}x_{1n} &+ x_{2n}F_{12}y_{1n} + x_{2n}F_{13} + \\ y_{2n}F_{21}x_{1n} &+ y_{2n}F_{22}y_{1n} + y_{2n}F_{23} + \\ F_{31}x_{1n} &+ F_{32}y_{1n} + F_{33} = 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Переписав данное выражение в форме системы линейных уравнений с неизвестными F_{ij}, имеем:

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_n^T &= [x_{2n}x_{1n} \quad x_{2n}y_{1n} \quad x_{2n} \quad y_{2n}x_{1n} \quad y_{2n}y_{1n} \quad y_{2n} \quad x_{1n} \quad y_{1n} \quad 1], \\ \mathbf{f} &= [F_{11} \quad F_{12} \quad F_{13} \quad F_{21} \quad F_{22} \quad F_{23} \quad F_{31} \quad F_{31} \quad F_{33}], \\ n &= 1, \dots, N, \\ \mathbf{a}_n^T\mathbf{f} &= \mathbf{0}. \end{aligned} \tag{16}$$

Для $n = 1, \dots, N$ соответсвующих точек мы получаем линейную однородную систему уравнений:

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} a_1^T \\ \vdots \\ a_N^T \end{bmatrix}, \\ A\mathbf{f} &= \mathbf{0}. \end{aligned} \tag{17}$$

Система уравнений $\mathrm{A}\mathbf{f} = \mathbf{0}$ решается методом наименьших квадратов с ограничением $\mathbf{f}^T\mathbf{f} = 1$. Для удобства, данное ограничение можно записать как:

$$1 - \mathbf{f}^T\mathbf{f} = 0. \tag{18}$$

Функция ошибки с ограничением имеет следующий вид:

$$e = \boldsymbol{f}^T A^T A \boldsymbol{f} + \lambda(1 - \boldsymbol{f}^T \boldsymbol{f}), \tag{19}$$

где λ является множителем Лагранжа. Нашей целью является нахождение вектора $\mathbf{f}^*$, который минимизирует данную функцию ошибки:

$$\mathbf{f}^* = \text{?rgmin}_{\mathbf{f}}\, \mathrm{e}, \left(\mathrm{A}^{\mathrm{T}}\mathrm{A} - \lambda \mathrm{I}\right)\mathbf{f} = \mathbf{0}. \tag{20}$$

Уравнение, приведенное выше, является характеристическим. Из этого следует, что λ является собственным значением, а $\mathbf{f}$ — собственным вектором матрицы $A^T A$, что означает:

$$A\mathbf{f} = \lambda\mathbf{f}. \tag{21}$$

Решением этого уравнения будет собственный вектор матрицы $A^T A$, соответствующий наименьшему собственному значению, который может быть найден методом сингулярного разложения. Так как матрица A может иметь максимальный ранг равный 8, то нам необходимо более 8 соответствующих точек для решения этой системы уравнений.

Решением будет сингулярный вектор $\hat{\boldsymbol{f}}$ матрицы A который соответствует наименьшему сингулярному значению. После сингулярного разложения матрицы $A = UDV^T$ и нахождения вектора $\hat{\boldsymbol{f}}$, из этого вектора получается матрица $\hat{F}$ которая является аппроксимацией матрицы F.

В реальности, по причине зашумленности данных с камер, нам понадобится более 8 соответствующих точек. В этом случае, для получения матрицы F из ее аппроксимации $\hat{F}$, нам необходимо обеспечить ранг 2 для матрицы F. Это можно сделать следующим образом:

$$\begin{aligned} svd(\hat{F}) &= UDV^T, \\ F &= Udiag(D_{11}, D_{22}, 0)V^T. \end{aligned} \tag{22}$$

Данные выражения могут быть получены при помощи восьмиточечного алгоритма (8-point algorithm) [2, 3]. Он прост в реализации, однако оригинальная реализация алгоритма очень чувствительна к шуму, сказывающемуся на измерениях. Поэтому было предложено решение этой задачи путем простой нормализации системы координат изображения в диапазон $x \in [-1,1], y \in [-1,1]$ [4].

На данный момент, стандартным алгоритмом оценки существенной матрицы E для двух, трех и более видов, является пятиточечный алгоритм (англ. five-point algorithm) [7]. Данный алгоритм находит возможные решения для относительного положения камер, между двумя (и более) калиброванными камерами, имея 5 соответствующих точек.

После проведения калибровки камер необходимо выполнить ректификацию стереопары - преобразование, проецирующее левые и правые изображения на общую плоскость, которая параллельна линии, соединяющей оптические центры левой и правой камер.

Расчет глубины и стерео-сопоставление

Для построения карты глубины сцены необходимо сопоставить друг другу точки на изображениях, полученных с левой и правой камеры. Целью стерео-сопоставления (stereo matching) являет-

ся вычисление расхождения между двумя соответствующими точками в левом и правом изображениях. Отношение между глубиной z и расхождением d определяется следующей формулой

$$d = Bf\frac{1}{z}, \tag{23}$$

где B – расстояние между оптическими центрами камер, f – фокусное расстояние.

Соответствие между пикселем в исходном изображении (x', y') и пикселем в сопоставимом изображении (x, y) определяется как:

$$x' = x + sd(x, y),\ y' = y, \tag{24}$$

где $s = \pm 1$ — знак, который выбирается таким образом, чтобы значение расхождения всегда оставалось положительным. В процессе стерео-сопоставления производится нахождение такой функции $d(x, y)$ которая наилучшим образом описывает очертания поверхностей в сцене.

Для расчета расхождения используют специализированные алгоритмы, которые, как правило, состоят из следующих четырех этапов [23]: 1) расчет стоимости сопоставления, 2) агрегирование стоимости, 3) расчет / оптимизация расхождения между изображениями, 4) улучшение показателей расхождения.

Этап расчета стоимости. На этапе расчета стоимости при операции сопоставления рассчитывается разница между пикселями левого и правого изображения. Популярными метриками являются разница квадратов яркости (squared intensity differences (SD)), абсолютная разница яркости (absolute intensity differences (AD)).

Этап агрегирования. На этапе агрегирования задействуются локальные методы. В ходе применения этих методов производится агрегирование значений стоимости в определенном регионе. Обычно агрегирование реализуется в виде операции свертки с заданным размером окна.

Этап расчета и оптимизации расхождения. В локальных методах используется простой подход расчета финальных значений расхождения - в каждом пикселе с координатами (x, y) выбирается минимальное значение расхождения. Глобальные методы находят функцию d, которая рассчитывает минимальную глобальную энергию $E(d)$.

Этап уточнения. Большинство алгоритмов стереозрения рассчитывают множество значений расхождения в каком-либо дискретизированном пространстве. Этот шаг, в основном, нужен для применения в области компьютерной графики. На данном этапе производят субпиксельное уточнение результатов расхождения, для получения более детализированного изображения.

В результате выполнения вышеперечисленных операций формируется карта глубины.

Реализация вышеперечисленных этапов на мобильной платформе, оснащенной двумя монокулярными камерами, может быть проиллюстрирована на основе эксперимента, который проводится на материале классического множества данных «New Tsukuba Stereo Dataset», доступного в [24]. Данный набор содержит специально подготовленные изображения для оценки работы алгоритмов, предназначенных для стерео-сопоставления. Была протестирована работа классического алгоритма SSD (Sum of Squared Differences), предназначенного для поиска расхождения между двумя изображениями в стереопаре.

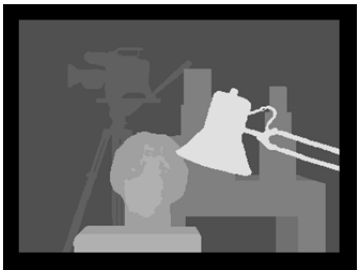
Алгоритм нахождения расхождения SSD (Sum of Squared Differences) состоит из реализации следующих этапов:

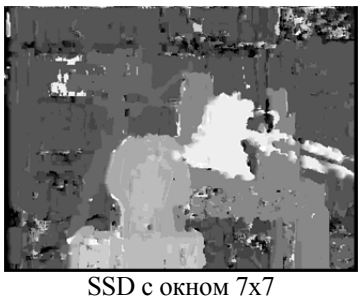
1. Расчет стоимости сопоставления - разница квадратов яркости пикселей в заданном значении расхождения d
2. Метод агрегации стоимости - суммирование стоимости квадратными окнами в заданном значении расхождения d
3. Расхождение вычисляется путем нахождения минимального агрегированного значения стоимости в каждом пикселе.

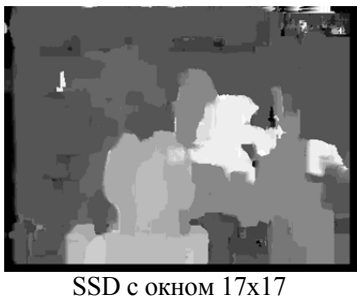
Ошибка алгоритма SSD вычисляется путем расчета средней квадратичной ошибки между исходными значениями расхождения и соответствующими значениями, полученными алгоритмом. Данный алгоритм является локальным. В локальных алгоритмах расчет расхождения в какой-либо точке зависит только от значений яркости в ограниченном регионе (окне). Локальные алгоритмы содержат неявные предположения о гладкости. Локальные алгоритмы отличаются между собой этапами расчета стоимости сопоставления и агрегации. Результаты работы алгоритма приведены на рис. 2.

Левое изображение

Правое изображение


Исходные значения расхождения


SSD с окном 7x7


SSD с окном 17x17

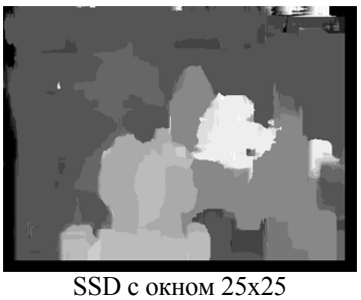

SSD с окном 25x25

Рисунок 2 – Результаты работы алгоритма SSD

Следующие значения были получены нами в ходе применения этого алгоритма для обработки данных, полученных при помощи монокулярных камер, описываемых в данном исследовании.

Таблица 1 – Среднеквадратичная ошибка в зависимости от размера окна

Размер окна	7x7	17x17	25x25
MSE	3084.96	2346.23	2080.18

Результаты эксперимента демонстрируют, что на предложенном нами аппаратном обеспечении базовый алгоритм SSD работоспособен и эффективен для построения стереоизображения на основе данных, полученных с двух монокулярных камер и сопоставленных с его помощью.

Представленная в работе мобильная платформа применяется для обслуживания посетителей торгово-развлекательных комплексов, следовательно, для активного взаимодействия с человеком. Достижение данной цели напрямую зависит, в том числе, от решения задач визуальной одометрии. При решении задачи визуальной одометрии на представленной платформе задействуются широкоугольные камеры, предназначенные для получения информации об окружающем пространстве. Дополнительно используются лидары для построения двухмерной карты помещения, а также датчики, работающие в инфракрасном спектре, для определения препятствий на пути движения устройства. Обработка данных, получаемых от сенсорных устройств с помощью вычислительного модуля Nvidia Jetson TX2, позволяет решать задачи визуальной одометрии, строить карты окружения, обнаруживать элементы обстановки, а также и взаимодействовать с пользователями. Представленное математическое обеспечение для реализации стереозрения на представленной платформе позволяет использовать данную технологию наряду с лидарами и датчиками инфракрасного спектра для решения задач навигации.

Литература

1. Aksamentov E., Zakharov K., Tolopilo D., Usina E. Approach to Robotic Mobile Platform Path Planning Upon Analysis of Aerial Imaging Data // ZR 2020

2. Pavliuk N., Kharkov I., Zimuldinov E., Saprychev V. Development of Multipurpose Mobile Platform with a Modular Structure //Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics «Zavalishin's Readings». – Springer, Singapore, 2020. – P. 137-147.

3. Wu J., Yue X., Li W. Integration of hardware and software designs for object grasping and transportation by a mobile robot with navigation guidance via a unique bearing-alignment mechanism // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2015. V. 21 (1). P. 576 – 583.

4. Mechanical design and control system of an omni-directional mobile robot for material conveying / T. Peng, J. Qian, B. Zi, J. Liu, X. Wang // Procedia CIRP. 2016. V. 56. P. 412 – 415.

5. Pavlichenko, D., Martin Garcia, G., Seong-Yong, K., Behnke, S. (2018). KittingBot: A Mobile Manipulation Robot for Collaborative Kitting in Automotive Logistics.

6. Andersen, R., & Hansen, E., Cerny, D., Madsen, S., Pulendralingam, B., Bøgh, S., Chrysostomou, Di. (2017). Integration of a Skill-based Collaborative Mobile Robot in a Smart Cyber-physical Environment. Procedia Manufacturing. 11. 114-123. 10.1016/j.promfg.2017.07.209.

7. Erős, E., Dahl, M., Bengtsson, K., & Hanna, A., & Falkman, P. (2019). A ROS2 based communication architecture for control in collaborative and intelligent automation systems.

8. Stückler, J., Schwarz, M., Behnke, S. (2016). Mobile Manipulation, Tool Use, and Intuitive Interaction for Cognitive Service Robot Cosero. Frontiers in Robotics and AI. 3. 10.3389/frobt.2016.00058.

9. Wise M., Ferguson M., King D., Diehr E. and Dymesich D., 2016. Fetch and freight: Standard platforms for service robot applications. In Workshop on Autonomous Mobile Service Robots.

10. García J.M., Martínez J. L., Mandow A., García-Cerezo A. Caster-leg aided maneuver for negotiating surface discontinuities with a wheeled skid-steer mobile robot. // Robotics and Autonomous Systems. 2017. V. 91. P. 25 – 37.

11. Chen C. C., Huang T. C., Park J.J., Tseng H. H., Yen N. Y. A smart assistant toward product-awareness shopping. // Personal and ubiquitous computing. 2014. V. 18 (2). P. 339 – 349.

12. Graf F., Odabasi, C., Jacobs, T., Graf, B., Födisch, T.. (2019). MobiKa - Low-Cost Mobile Robot for Human-Robot Interaction.

13. Triebel, K. Arras, R. Alami, L. Beyer, S. Breuers, R. Chatila, M. Chetouani, H. Hung Spencer: A socially aware service robot for passenger guidance and help in busy airports. R // Field and service robotics. Springer, Cham. 2016. P. 607 – 622.

14. Bokovoy, A., Muravyev, K., Yakovlev, K.. (2019). Real-time Vision-based Depth Reconstruction with NVidia Jetson.

15. Fan, R., Jiao, J., Pan, J., Huang, H. & Shen, S., Liu, M. (2019). Real-Time Dense Stereo Embedded in a UAV for Road Inspection. 535-543. 10.1109/CVPRW.2019.00079.

16. Amert, T., Otterness, N., Yang, M., & Anderson, J., Smith, F.. (2017). GPU Scheduling on the NVIDIA TX2: Hidden Details Revealed. 104-115. 10.1109/RTSS.2017.00017.

17. Zhang, Z., (2012). Microsoft Kinect Sensor and Its Effect. IEEE Multimedia - IEEEMM. 19. 4-10. 10.1109/MMUL.2012.24.

18. Hartley R., Zisserman A. Multiple View Geometry in computer vision. Cambridge University Press, 2003

19. Christopher Longuet-Higgins, H. «A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections», 1981

20. Hartley R., Zisserman A. Multiple View Geometry in computer vision. Cambridge University Press, 2003

21. Hartley R., «In Defense of the Eight-Point Algorithm». IEEE Transactions on Pattern Recognition and Machine Intelligence, 1997

22. Nister, D. An Efficient Solution to the Five-Point Relative Pose Problem, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004

23. Scharstein, D., Szeliski R., Zabih R., «A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms,» Proceedings IEEE Workshop on Stereo and Multi-Baseline Vision (SMBV 2001), Kauai, HI, USA, 2001, pp. 131-140, doi: 10.1109/SMBV.2001.988771.

24. https://home.cvlab.cs.tsukuba.ac.jp/dataset

К.И. Кий, Д.А. Анохин, Р.В. Досаев

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ДОРОЖНЫХ СЦЕН

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной математики им. Келдыша РАН (ИПМ РАН), Москва,
konst.i.kiy@gmail.com, anodmitry@gmail.com, romandosaev@gmail.com

Аннотация

В работе предлагаются методы комплексного анализа состояния дорожных сцен на основе параллельной программной реализации метода геометризованных гистограмм. Также предлагаются алгоритмы поставленных задач и приводятся примеры работы программной системы, реализующей данные алгоритмы.

Ключевые слова: сегментация изображений, понимание изображений, анализ дорожных сцен.

K.I. Kiy, D.A. Anokhin, R.V. Dosaev

INTEGRATED ANALYSIS OF THE STATE OF ROAD SCENES

Keldysh Institute of applied mathematics of RAS, Moscow,
konst.i.kiy@gmail.com, anodmitry@gmail.com, romandosaev@gmail.com

Abstract

In this paper, methods for integrated analysis of the state of road scenes are proposed based on a parallel programming implementation of the geometrized histograms method are proposed. Algorithms for solving the posed problems are also proposed and examples of the operation of the software system, implementing these algorithms are presented.

Key words: image segmentation, image understanding, road scene analysis.

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 эти системы могут давать неадекватные результаты в незнакомых ситуациях. Типичные примеры этого поставляют аварии беспилотных автомобилей. Например, авария со смертельным исходом была по причине того, что нейросеть приняла часть грузовика за участок неба. Системы, построенные на классических подходах к распознаванию, могут принять во внимание дополнительные признаки, которые могут помочь избежать подобных ситуаций. В человеческом интеллекте присутствуют два типа систем распознавания. Первый тип основан на подсознательных процессах, которые поставляют гипотезы об отдельных объектах в пространстве. Второй тип основан на логической проверке гипотез на основе детального анализа частей. Наиболее заметно взаимодействие двух частей интеллекта при анализе сцен в условиях плохой видимости. Аналогичную роль в компьютерном зрении может играть симбиоз нейросетевых методов и методов основанных на классическом понимании сцен. Для возможности реализации такого симбиоза необходимо развить методы представления и анализа сцен реального времени в русле классических схем сегментации и понимания изображений для того, чтобы находить в выделенных областях характерные ключевые элементы и производить анализ их движения. В работе [1] предлагается программная реализация метода геометризованных гистограмм [2—5], которая позволяет решать задачи сегментации изображений и построения систем их понимания на многопроцессорных компьютерах на видео высокого разрешения с рекордными скоростями. При этом не обязательно, чтобы процессоры имели очень высокую производительность. Нужно только, чтобы их было достаточно много.

В разделе 1 будет дано краткое описание метода геометризованных гистограмм и его параллельной программной реализации. В разделе 2 будет кратко описана параллельная реализация метода геометризованных гистограмм и приведены оценки полученной производительности полученной программной системы с параллельными вычислениями. В разделе 3 описаны алгоритмы решения в реальном времени задач по описанию состояния дорожных сцен, основанных на методе

геометризованных гистограмм и приводятся примеры работы программного комплекса, основанного на предложенных алгоритмах.

Метод геометризованных гистограмм для содержательного описания цветных изображений и построение систем понимания изображений реального времени

Предлагаемые алгоритмы понимания дорожных сцен 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. Однако обычная гистограмма является слабым инвариантом изображения, так как она остается инвариантной при любом взаимно-однозначном преобразовании прямоугольника изображения. В ней совершенно не учитывается геометрия объектов изображения. В то время как геометризованная гистограмма остается инвариантной только относительно преобразований внутри полос, при которых точки передвигаются перпендикулярно оси *Os*. Так как мы имеем дело с узкими полосами, эти преобразования почти не меняют геометрии объектов, принадлежащих изображению.

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 $Card^{Sg}$ (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*.

Существенным свойством алгоритма получения геометризованной гистограммы в полосе является то, что она может быть получена за один проход массива точек полосы. Это обеспечивает ее получение в реальном времени. Объединение геометризованных гистограмм полос дает геометризованную гистограмму изображения. 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). Приведенные далее изображения цветовых сгустков и получаемые с помощью программы из [6] показывают, что граф цветовых сгустков хорошо описывает яркостно-цветовые свойства изображений и геометрию реальных объектов в полосах и в изображении в целом.

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 доми-

нирующими 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.

С помощью метода геометризованных гистограмм строится проекция всех реальных объектов на *STG*. Разработаны методы получения связных образов в *STG* реальных глобальных объектов из изображения. Под глобальными объектами мы понимаем объекты, расположенные более чем в одной полосе изображения. Реальные глобальные объекты могут быть двух типов. К первому типу относятся областные объекты. Они в полосах, как правило, при проектировании на *STG* индуцируют доминирующие цветовые сгустки. Глобальные объекты второго типа – это малые и тонкие объекты, такие как дорожная разметка, строительные конусы для обозначения запретных зон на дороге, знаки аварийной остановки, дорожные знаки, стоп-сигналы автомобилей, сигналы светофоров и т.д. Также на *STG* выделяются такие малые объекты как сигнальные огни летательных аппаратов. Сигнальные они вертолетов и светофоров определяются на *STG* как цветовые сгустки с достаточно высоким цветовым насыщением и достаточно высокой яркостью. Объекты такого типа могут при проектировании давать как доминирующие (на близком расстоянии), так и доминируемые цветовые сгустки. Целый объект или его часть, лежащие в нескольких полосах, дают в некотором смысле непрерывные системы цветовых сгустков, расположенных в соседних полосах, в *c*.

В [3] даны формальные определения и описаны алгоритмы построения непрерывных систем доминирующих цветовых сгустков. Эти методы применены в [5] для построения образов в *STG* таких реальных объектов как небо, дорога, обочина. В [1] понятие непрерывных систем цветовых сгустков обобщается на случай смешанных систем доминирующих и доминируемых сгустков. Типичными реальными объектами, которые дают на *STG* непрерывные системы такого типа являются протяженные и малые объекты такие как дорожная разметка (постоянная и временная), строительные конуса, для обозначения закрытых для движения зон на дороге, знаки аварийной остановки, столбы, стволы деревьев и т.д. В [1] также писана параллельная многопоточная реализация метода геометризованных гистограмм, которая позволяет строить системы понимания изображений реального времени для кадров видео высокого разрешения.

Параллельная реализация метод геометризованных гистограмм для построения систем понимания изображений реального времени

Метод геометризованных гистограмм изначально спроектирован так, что каждая полоса, на которую разделяется изображение, может быть обработана по отдельности. Поэтому было решено попробовать применить многопоточное программирование именно к обработке этих полос. Стоит отметить, что метод не сводится только к обработке каждой полосы. На данном этапе осуществлена параллельная реализация той части процедуры сегментации, которая занимает 95% времени выполнения в однопоточном режиме. Удалось добиться ускорения программы в количество раз, которое приблизительно линейно зависит от числа физических ядер процессора. Для четырехядерного процессора получено ускорение в 3,6 раза. Тестировалась программная система, которая содержала системы понимания изображений для нахождения неба, дороги, транспортных средств на ней, дорожной разметки и т.д. Было получено, что основное время занимает построение описаний изображения с помощью графа *STG*. Это время существенно зависит от размерности изображения, так ка только на этом этапе ведется работа с пиксельными массивами изображения. Построение непрерывных систем цветовых сгустков и реализация всех систем понимания изображений на ноутбуках с процессорами уровня Intel Core i5/i7 (седьмого и восьмого поколений), обладающими четырьмя физическими ядрами занимает менее 10 мс. Поэтому было принято решение запустить количество потоков равное количеству полос, на которые было разбито изображение. Это было сделано с тем, что программа бы не зависела от количества ядер (процессоров) данного компьютера. Специальным тестированием на видеопоследовательностях достаточно большой длины (порядка 2000 кадров) были получены оценки производительности для видео разного разрешения, которые приведены в табл. 1 ([1]).

Первый столбец таблицы показывает было ли применено распараллеливание (да – On, нет – Off), второй столбец показывает число полос, на которые было разбито изображение, а третий,

четвертый и пятый показывают разрешение кадров видеопоследовательностей. Данные усреднялись по трем типам ноутбуков, выпущенных в 2017-2018 гг., использованных в численных экспериментах. На ноутбуке с рекордной производительностью была получена скорость обработки кадров разрешения 1920x1080 более 30 fps.

Таблица 1 – Данные о времени обработки (в мс.) для параллельной и последовательных версий программной реализации

Multithreading state	Num of strips	640x480	1280x720	1920x1080
Off	48	25,381	59,1323	118,512
On	48	10,2064	18,8395	36,169
Off	72	29,9551	66,3633	124,652
On	72	16,3946	22,6448	38,6855
Off	108	35,3268	76,5239	136,415
On	108	24,1019	29,0153	41,0169

Алгоритмы нахождения конкретных объектов, определяющих состояние дорожной сцены

Среди объектов, определяющих состояние дорожной сцены, стоит перечислить дорожную разметку (постоянную и временную), состояние светофоров, различные признаки выполняемых дорожных работ. Для определения этих элементов, определяющих состояние дорожной ситуации, были разработаны алгоритмы определения их образов в графе цветовых сгустков *STG*. Опишем вначале подход к обнаружению объектов, представленных непрерывными цепочками цветовых сгустков (дорожная разметка, строительные конуса, знаки аварийной остановки и т.д.). Решение задачи разбивается на 2 этапа. На первом этапе в каждой полосе выделяются цветовые сгустки, которые могут быть частью проекции объекта на *STG*, которая принадлежит данной полосе.

Приведем вначале процедуру построения цветовых сгустков в полосе, которые могут быть кандидатами на часть дорожной разметки, проходящей через данную полосу. Цветовые сгустки, которые могут быть образами в *STG* частей разметки (белой – постоянной или цветной – постоянной или переменной) отличаются от цветовых сгустков, которые являются образами частей дороги яркостью или яркостью и цветом, а также плотностью и длиной соответствующих интервалов локализации [beg_b, end_b]. Так как на дороге могут находиться помехи в виде других участников движения, луж, пятен грязи, влажных частей, пересветок от фонарей и систем освещения автомобилей, отличия в параметрах между соседними сгустками могут быть как двусторонние, так и односторонние. Так как образы участков дороги порождают базисные цветовые сгустки из поисковой решетки SearchLat, то строится система рассуждений, которая сравнивает параметры определенного цветового сгустка с параметрами соседних цветовых сгустков из SearchLat и делает заключение о принадлежности данного сгустка к множеству кандидатов на образ дорожной разметки в части *STG*, относящейся к данной полосе.

Для поиска окрашенных объектов (цветная разметка, постоянная или временная, строительные конуса, знаки аварийной остановки, сигналы светофоров) строится система рассуждений, которая находит небольшие цветовые сгустки, с достаточно высоким цветовым насыщением, цветовые оттенки которых находятся в некотором цветовом диапазоне. Рисунок 1 показывает цветовые сгустки—кандидаты на части окрашенной разметки в полосах изображения. Заметим, что задача нахождения образов разметки в *STG* решается в отсутствии данных о калибровке и позиции камеры, снимающей изображение, т.е. реализуется подход на принципах искусственного интеллекта, который можно будет применять в камерах типа видеорегистратора, установленного произвольным неизвестным образом.

Построение непрерывных цепочек кандидатов на часть объекта, определяющего состояние дорожной сцены, производится на втором этапе. При построении этих непрерывных цепочек при переходе от полосы к полосе используются следующие параметры: длины интервалов локализации цветовых сгустков, яркостно-цветовые характеристики, плотность цветовых сгустков. Для обеспечения непрерывности полученной цепочки также оценивается доля пересечения в отрезках локализации и их расстояния друг от друга. Оцениваются также связь наклона предыдущей части цепочки и наклона вновь присоединяемого звена, чтобы обеспечивать отсутствие скачков на соседние объекты. Чтобы исключить выделение ложных объектов, для каждой выделенной цепочки оцениваются углы наклонов левых и правых границ цепочек и изменение длин интервалов локализации цветовых сгустков образующих цепочку. Строится система рассуждений, которая отметает ложные объекты.

Рисунок 1 – Кандидаты на цветную разметку

В частности, для определения дорожной разметки анализируется точки схода (пересечения) найденных кандидатов, выделяются согласованный набор кандидатов. Также строится система согласования кандидатов для соседних кадров, и выделяются кандидаты на сплошную и прерывистую разметку. Рис. 2 и 3 показывают примеры белой и цветной разметок, найденных в кадрах.

Рисунок 2 – Постоянная разметка, выделенная в кадре высокого разрешения

Рис. 3 показывает желтую временную разметку, найденную в кадре. Так как программная система отыскивает другие важные компоненты дорожной сцены, то красными отрезками показана граница зеленой обочины, а цветовые сгустки принадлежащие области неба окрашены в черный цвет. Эти задачи решаются независимо. Например, при поиске разметки не учитывается линия горизонта (линия границы неба), полученной задачей нахождения области неба. Нахождение координат точки схода разметки и уровень горизонта не должны противоречить друг другу. Эти данные позволяют получить степень уверенности полученных результатов. Также эти данные сравниваются со сходом, задаваемым границей обочины. Для изображения рис. 3 все эти данные удовлетворительно согласуются.

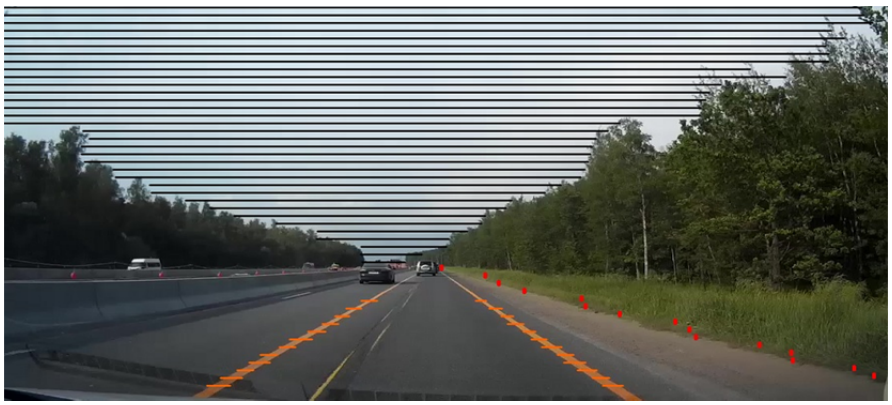


Рисунок 3 – Временная желтая разметка, выделенная в кадре высокого разрешения вместе с обочиной и небом

По подобной схеме решаются задачи выделения строительных конусов и нахождения сигналов светофоров. На первой стадии строится множество кандидатов на части строительных конусов и светофоров в полосе. На второй стадии строятся непрерывные цепочки кандидатов или отмечается их изолированный характер на изображении (для удаленных сигналов светофоров). Высокое разрешение видео позволяет заранее обнаружить интересующие нас объекты. Форма полученных не-

прерывных цепочек анализируется. Таким образом, выделяются строительные конуса. Рис. 4 показывает строительный конус, выделенный на изображении.

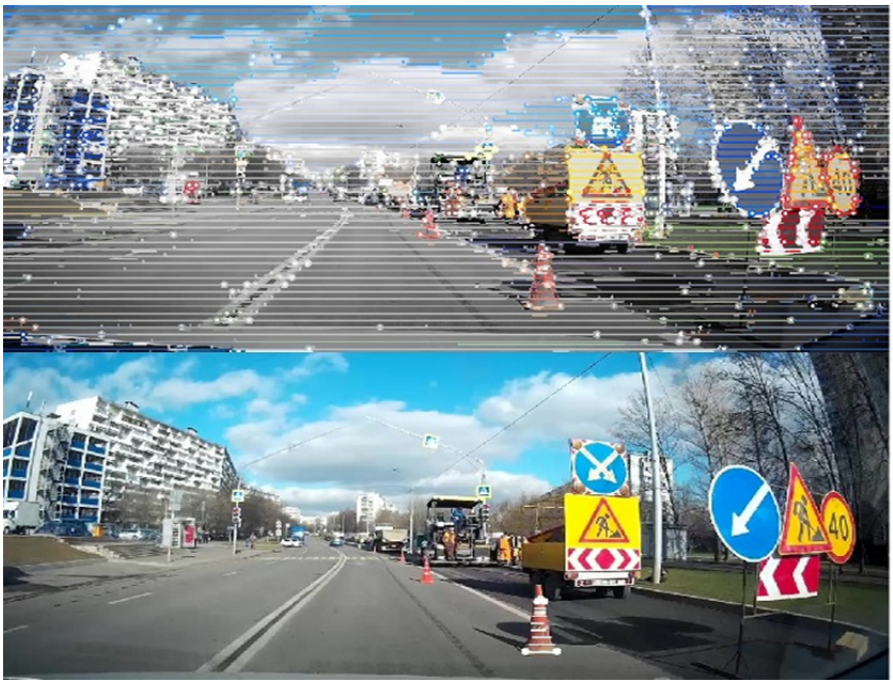


Рисунок 4 – Изображение с выделенным строительным конусом и соответствующее изображение графа цветовых сгустков *STG*

В настоящее время ведется отработка предложенных алгоритмов и реализованных программ на видеопоследовательностях дорожных сцен. Результаты будут выкладываться на [6].

В работе описаны принципы и алгоритмы построения программной системы комплексной оценки состояния дорожной сцены. Описываются алгоритмы нахождения конкретных объектов, определяющих это состояние. Демонстрируются примеры обработки и оценки конкретных сцен, даны оценки быстродействия работы программной системы с параллельной обработкой, построенной на основе предложенных алгоритмов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований проекты no. 18-07-00127 и 19-08-01159.

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/.

А.В. Плотников, В.Е. Пряничников

АЛГОРИТМ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ОПЕРАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА РОБОТА ПО УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ДАННЫМ

ФГУ «ФИЦ Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук», Москва, plotnikov.workmail@yandex.ru

Аннотация

В работе предложен алгоритм построения локальной карты операционного пространства мобильных сервисных роботов, базируясь на логическом анализе и сопоставлении показаний от небольшого числа ультразвуковых дальномеров.

Ключевые слова: сервисный робот, алгоритм картографирования, ультразвуковые датчики.

A.V. Plotnikov, V.E. Pryanichnikov

ALGORITHM FOR MAPPING THE ROBOT'S OPERATING SPACE USING ULTRASOUND DATA

Keldysh Institute of Applied Mathematics Russian Academy of Sciences, Moscow, plotnikov.workmail@yandex.ru

Abstract

The paper proposes an algorithm for constructing a local map of the operational space of mobile service robots, based on logical analysis and comparison of readings from a small number of ultrasonic rangefinders.

Key words: service robot, mapping algorithm, ultrasonic sensors.

В настоящее время в робототехнике уделяется все больше внимания приложениям мобильных сервисных роботов (МСР) в различных сферах деятельности. Применение МСР позволяет человеку выполнять различные задачи, например, супервизорное манипулирование объектами или наблюдение без необходимости фактического присутствия человека.

В рамках совместных исследований нескольких организаций (ИПМ им.Келдыша РАН, МИНОТ РГГУ и других) активно ведутся разработки и внедрения сервисных роботов серии «Амур» для использования в сети лабораторий и роботариумов по проекту «Интеллектуальная робототехника» в частности, робота АМУР-307 (см. рис. 1), продолжающих линейку ранее созданных учебных роботов этой серии [1-3].

Рисунок 1 – Дизайн-проект робота АМУР-307

При создании алгоритма навигации мобильного робота, для обеспечения требований по безопасности, следует уделять внимание алгоритму определения и обхода препятствий. Исследования и построение различных SLAM алгоритмов ведутся достаточно давно и успешно. Можно отметить разработки в рамках ROS, а также наши более ранние алгоритмы определения и обхода

препятствий по данным от сонаров [4, 5] или от лидара [6]. Лидар в силу особенностей работы позволяет относительно легко строить карту ближайшего окружения робота.

При использовании лидара для очувствления сервисного мобильного робота возникают следующие трудности:

- стоимость лидара, превышает стоимость других датчиков в десятки раз;
- лидары, использующиеся для мобильных роботов (см. рис .2) имеют множество подвижных частей, что ведет к ускоренному выходу из строя при постоянной работе, что в совокупности с предыдущим пунктом ведет к повышенным расходам на обслуживание мобильного сервисного робота;
- при использовании лидара на робота, обладающем устройствами манипулирования, как на роботе АМУР-307 необходимо уделять внимание слепым зонам. Слепые зоны, образующиеся вследствие конструктивных особенностей сервисного робота, могут закрывать более половины области действия лидара.

Рисунок 2 – Внешний вид лидара

Ультразвуковые датчики измеряют расстояния достаточно точно, но имеют очень низкое угловое разрешение. В тоже время их малая стоимость и простота дают существенные преимущества по сравнению с лидарами. Исходя из вышеизложенного был составлен алгоритм определения препятствий в ближайшем операционном пространстве робота по показанию набора ультразвуковых датчиков расстояния.

При создании алгоритма принимались следующие допущения:

- при работе алгоритма препятствий робот оперирует двумерным пространством, где положение робота и препятствий представлены в мировой системе координат (МСК) (см. рис.3);
- область работы ультразвукового датчика принимается за сектор, берущий начало в точке крепления датчика на роботе.

Алгоритм определения работы препятствий работает в пространстве двух измерений, что соответствует большинству задач навигации робота.

На подготовительном этапе необходимо задать следующие данные (см. рис 3,4):

1. координаты X_{sR}, Y_{sR} расположения датчика, направление датчика Dir_{sR} в системе координат робота (СКР);
2. характеристики датчика: максимальная R_{max} и минимальная R_{min} дальность работы датчика, максимальный угол сканирования конуса датчика по диапазону направленности A_{cone};
3. максимальное кол-во точек, формируемых внутри конуса по показанию датчика N;
4. величину радиуса вокруг точки, не допускающего создание точки внутри себя R_{exc};

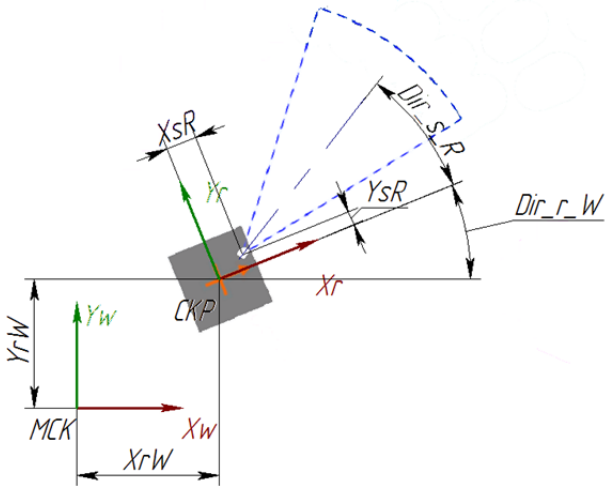


Рисунок 3 – Мировая система координат (МСК) и система координат робота (СКР)

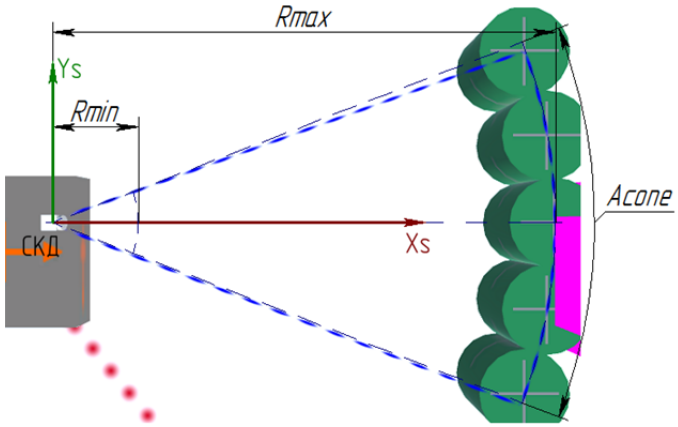


Рисунок 4 – Система координат датчика (СКД)

Используя в качестве основы расчетов данные, введенные на подготовительном этапе, алгоритм последовательно выполняет следующие стадии:

1. уточнение позиции робота X_{rW}, Y_{rW} и направления Dir_{sR} робота в мировой системе координат (МСК) (см. рис. 3);
2. уточнение позиции X_{sW}, Y_{sW} и направления Dir_{sW} каждого датчика X_{sW}, Y_{sW} и направления Dir_{sW} в МСК:

$$\begin{aligned} X_{sW} &= X_{rW} + X_{sR} \\ Y_{sW} &= Y_{rW} + Y_{sR} \\ Dir_{sW} &= Dir_{sW} + Dir_{sR} \end{aligned} \quad ; \qquad (1)$$

3. проводится вычисление направления границ конуса датчика D_{coneL}, D_{coneR} в МСК:

$$\begin{aligned} D_{coneL} &= Dir_{sW} + A_{cone}/2 \\ D_{coneR} &= Dir_{sW} - A_{cone}/2 \end{aligned}; \qquad (2)$$

4. уточнение показаний датчиков S_{ind} в текущий момент времени;
5. если показание датчика меньше чем максимальная дальность, установленная на подготовительном этапе $S_{ind} > R_{max}$, то вызывается функция создания точек-препятствий;
6. вызывается функция удаления точек, находящихся внутри конуса действия датчика.

Стоит заметить, что в силу особенностей алгоритма, работа функций создания и удаления точек могут быть выведены в параллельное выполнение относительно друг друга.

При вызове функции создания точек-препятствий вычисляется положение создаваемых точек X_{pW} Y_{pW} в МСК, основываясь на показании датчика и его положения в МСК (см. рис. 5).

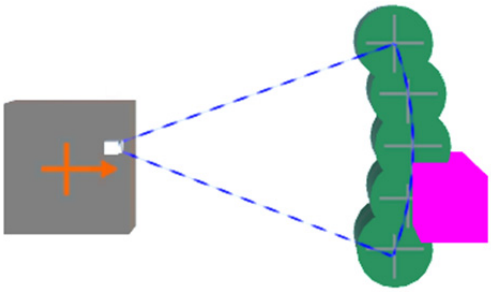


Рисунок 5 – Создание точек-препятствий

Создаваемые точки-препятствия равномерно располагаются на дуге, образованной сектором с радиусом, равным показанию датчика. Во избежание создания избыточного количества точек-препятствий в алгоритм создания введено условие, не допускающее создание новой точки в определенном радиусе от уже существующей.

Так как алгоритм в процессе работы создает точки, находящиеся на значительном удалении от фактического препятствия (см. рис. 5), то необходима работа функции удаления (см. рис. 6).

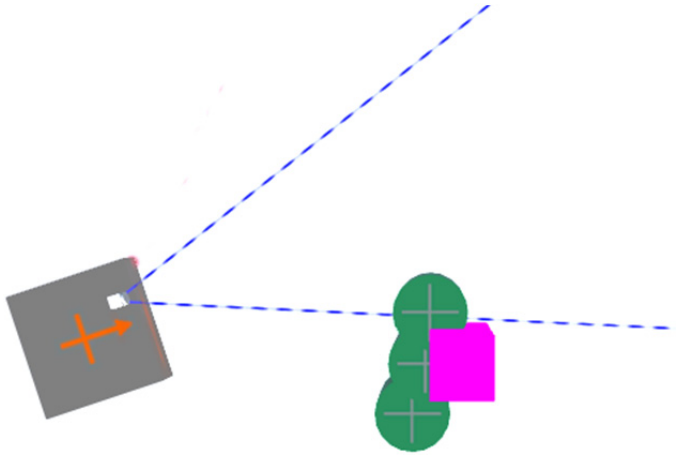


Рисунок 6 – Удаление точек-препятствий

Для оптимизации работы алгоритма, функция удаления точек работает в несколько этапов. На первом этапе вычисляется расстояние от проверяемой точки до датчика R_{ts}. Если это расстояние превышает значение текущего показания датчика с вычетом буфера $R_{ts} >= (S_{ind} - R_{exc})$, как на точках №1 и 2 с рисунка выше, то дальнейшие проверки для этой точки не производятся. Небольшой дополнительный буфер принимается для исключения конфликта функции удаления точек с функцией их создания. Для упрощения алгоритма данный буфер можно принимать равным $R_{exc.}$ На следующем этапе вычисляется угол поворота прямой, образованной между расположением датчика и проверяемой точки в МСК D_{pointW}. Проверяется условие, описываемое неравенством(3).

$$D_{coleLW} - D_{buf} > D_{pointW} > D_{coneRW} + D_{buf}, \quad (3)$$

где:D_{coneLW}, D_{coneLW} – границы диаграммы направленности датчика,

D_{buf} – величина буферной зоны диаграммы направленности, внутри которой не происходит удаления точек.

Алгоритм способен работать с набором различный датчиков, путем совмещения их показаний в едином алгоритме. Алгоритм позволяет совмещать работу, как различных ультразвуковых датчиков, так и датчика других типов, например, инфракрасные дальномеры (рис.7).

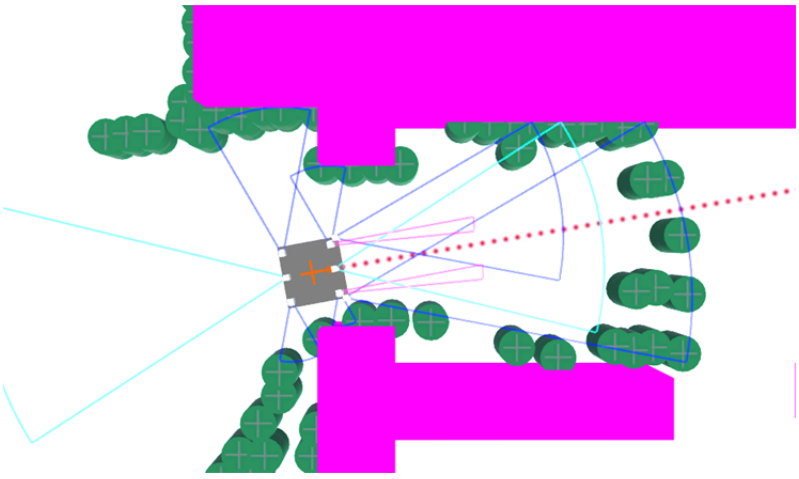


Рисунок 7 – Пример совмещения показаний различных датчиков

Описанный алгоритм был протестирован в виртуальной среде, моделирующей движение робота и работу ультразвуковых датчиков. Ширина диаграммы направленности моделируемых ультразвуковых датчиков принималась равной 40°. Маршрут робота, проходимый при моделировании представлен на рис. 8.

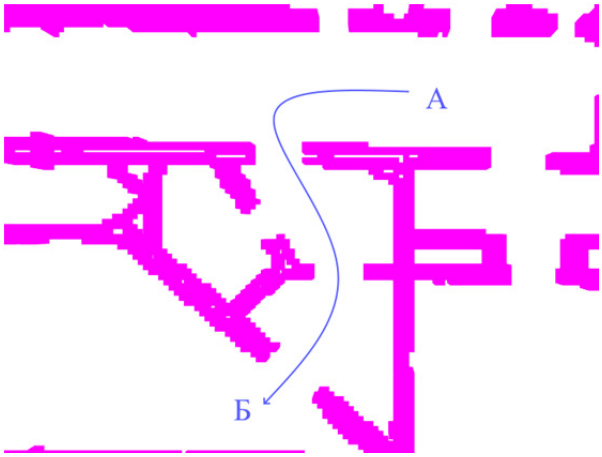


Рисунок 8 – Маршрут робота в виртуальной среде

При моделировании было рассмотрено несколько вариантов расположения ультразвуковых датчиков на роботе: перпендикулярно корпусу робота (см. рис. 9), с условием параллельности границы диаграммы направленности габаритам робота (см. рис. 10), со сведением направления датчиков (см. рис. 11). На рис. 9, 10, 11 выделены сектора диаграмм направленности датчиков робота с учетом их текущего показания, точки соответствуют установленным точкам-препятствиям, образованным в процессе выполнения алгоритма.

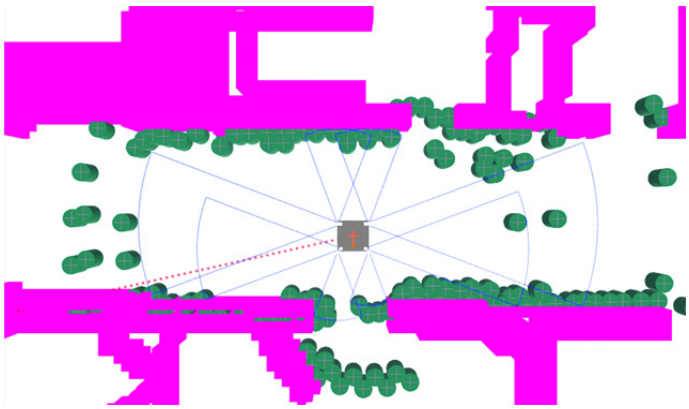


Рисунок 9 – Перпендикулярное расположение датчиков

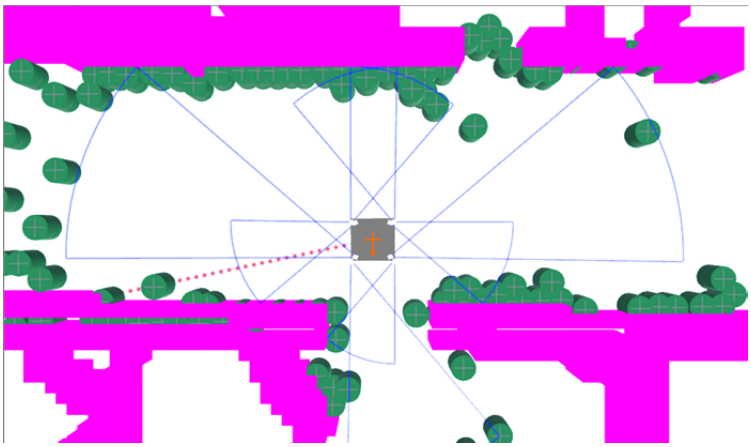


Рисунок 10 – Расположение датчиков с условием параллельности границы диаграммы направленности габаритам робота

Рисунок 11 – Результат работы алгоритма со сведением направления датчиков

Стоит отметить, что в процессе моделирования не применялось дополнительных экспертных правил, кроме запрета на создание точек на месте удаленных. Наилучшие возможности для работы алгоритма локального картографирования оказались при размещении локаторов 4х пар по сторонам робота так, чтобы для каждой пары оси диаграмм направленности были бы развернуты на определенный угол навстречу друг другу.

Для подтверждения работоспособности схемы расположения датчиков на роботе был проведен эксперимент по управлению виртуальным роботом в тестовой среде. Перед операторами была поставлена задача провести робот по тестовой среде к целевой позиции. Для этой задачи было подготовлено несколько виртуальных сред различной сложности, на основе реальных планов помещений. Оператор имел доступ к следующему набору данных (рис. 12):

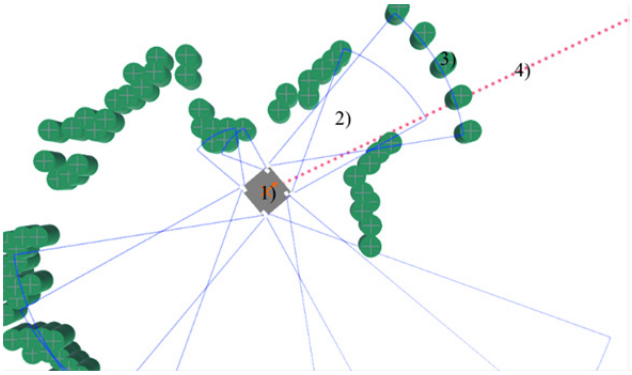


Рисунок 12 – Окно оператора робота

1. текущие координаты робота в виде изображения на условной карте (в окне оператора робота), построенной по данным одометрических датчиков (предполагается их безошибочная работа). Это предположение неплохо работает и на практике (на траекториях длиной до 10-25м). что подтверждается экспериментами с гусеничным роботом Амур-307, за счет специального устройства подвески и одометров;
2. конусы излучения ультразвуковых датчиков в текущий момент времени;
3. положение точек-препятствий, построенных в результате работы алгоритма генерации локальной карты операционного пространства на основе данных от ультразвуковых локаторов;
4. вектор направления на целевую позицию.

Операторам не был заранее известен план тестовой среды. В процессе эксперимента операторам не показывалось положение препятствий и стен тестовой среды. Касание робота стены или препятствия означало провал попытки управления роботом. Во избежание запоминания операторами маршрута движения на каждую среду давалась ровно одна попытка. Пример тестовой среды, включающей в себя несколько помещений, дверные проёмы и различные препятствия представлен на рис. 13.

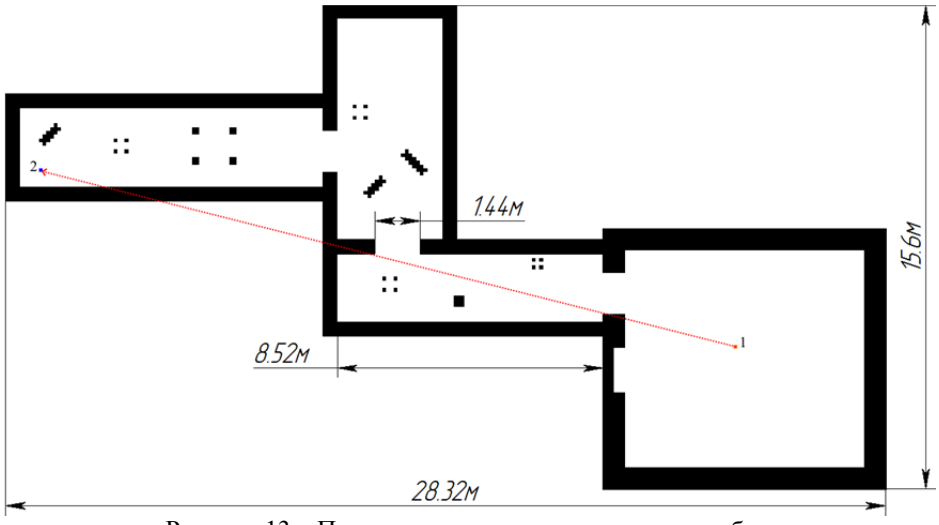


Рисунок 13 – План тестового помещения с масштабом

Тестирование показало, что в процессе управления виртуальным роботом операторы успешно опознают стены, дверные проемы и препятствия, основываясь только на показания ультразвуковых сенсоров. В совокупности с отсутствием провалов был сделан вывод о работоспособности выбранной концепции набора и расположения датчиков на роботе и алгоритма обработки показаний датчиков.

Предложенный в работе алгоритм создания точек-препятствий для построения карты ближайшего операционного пространства робота в заранее неизвестной среде имеет перспективы для применения на реальных роботах, что показано на примере моделирования в виртуальной среде. Но стоит заметить, что применение данного алгоритма в составе реального робота требует проведения дополнительных экспериментов, направленных на исключение ложных точек-препятствий и оптимизации алгоритма в целом. Дальнейшая интерпретация показаний сенсоров и результатов локального картографирования операционного пространства легли в основу построения экспертных схем для алгоритмов эффективного управления, навигации и обхода препятствий мобильных сервисных роботов, действующих в заранее неизвестной среде.

Литература

1. Разработка распределенных программно-аппаратных роботариумов. Каталинич Б., Ксензенко А. Я., Кувшинов С. В., Марзанов Ю.С., Прысев Е.А. Пряничников В. Е., Хелемендик Р.В., Эпиков С.Р. ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА. // Труды Международной научно-технической конференции. – Санкт-Петербург: ООО «АП4Принт», 2016. – 480с.

2. Пряничников В.Е., Кувшинов С.В., Хелемендик Р.В., Харин К.В. Интеллектуальная робототроника: научно-образовательная технология и построение сети роботариумов// Проектирование будущего. Проблемы цифровой реальности: труды1-й Международной конференции (8-9 февраля 2018 г., Москва). — М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2018. — С. 57-64.

3. Разработка сети роботариумов и мобильных роботов «Амур» для инновационного обучения интеллектуальной роботронике. Пряничников В. Е., Ксензенко А. Я., Кувшинов С. В., Марзанов Ю.С., Подураев Ю.В., Прысев Е.А., Хелемендик Р.В., Арыскин А.А., Беляев О.О., Брызгалов П.А., Давыдов Д.В., Кузовкин Д.А., Плетенев П.Ф., Эпиков С.Р. В сборнике: Сетевое партнерство в науке, промышленности и образовании Труды Международной мультиконференции.2016. С. 141-148.

4. И.А.Баранов, В.И. Денисов, К.И. Кий, К.Б.Кирсанов, А.А. Кирильченко, Б.М. Левинский, В.Е.Пряничников, В.Г. Шагалов. Адаптивное управление гусеничного робота в задаче мобильного патрулирования. − Информационно-измерительные и управляющие системы, 2006 т. 4, № 1-3, с.91-98

5. В.Е. Пряничников. Дистанционные сенсоры в составе систем управления движением мобильных роботов. − Информационно-измерительные и управляющие системы, М.: Радиотехника, №1, 2008, с.5-18

6. Давыдов О.И., Платонов А.К. СетьПассфреймов - комбинированная модель операционной среды мобильного робота // ПрепринтыИПМ им. М.В.Келдыша. 2015. No 15. 28 с. URL: http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2015-15

П.М. Близнец

ШАГАЮЩАЯ ПЛАТФОРМА МОБИЛЬНОГО РОБОТА

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, bliznets@bmstu.ru

Аннотация

В данной работе представлена новая кинематическая структура шагающей платформы мобильного робота. Представленная новая кинематическая конструкция является упрощением известной кинематики млекопитающих. Кинематическая конструкция платформы четырехопорная, каждая опора (нога), оснащена двумя приводами. Цель исследования - определить потери и выигрыш функциональности после упрощения и сравнить основные параметры известной кинематической структуры млекопитающих с инновационной. Представленная работа не претендует на полноту исследований и ограничивается анализом основных свойств и параметров кинематической структуры. Научно-практическая значимость работы заключается в получении знаний о функциональных возможностях и основных параметрах новой кинематической конструкции, которые могут быть использованы для дальнейших исследований и разработок шагающих платформ. Основная методология исследования заключается в реализации известных методов исследования для инновационного, ранее не неизвестного объекта. Обозначены основные проблемы шагающих платформ, ограничивающие их эффективное использование. Проведен анализ функциональных потерь и ограничений, связанных с упрощением кинематической структуры млекопитающих. Представлены результаты математического и физического моделирования шагающей платформы мобильного робота, показаны основные функции шагающей платформы (ходьба рысью и позиционирование). Приведен перечень вариантов использования шагающего мобильного робота на основе новой кинематической структуры.

Ключевые слова: Мобильный робот, шагающая платформа, кинематика.

P.M. Bliznets

MOBILE ROBOT WALKING PLATFORM

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, bliznets@bmstu.ru

Abstract

The paper presents a new kinematic structure of a walking platform. The presented novel kinematic design is a simplification of the known kinematics of mammals. The kinematic design of the platform is quadrupedal, with each leg equipped with two drives (with two active Degrees of freedom). Goal of the research is to determine loss and wins of functionality after simplification and to compare main parameters between mammal's kinematic structure and innovative one. The presented work does not claim to be completed and is limited to the analysis of the main properties and parameters of the kinematic structure. Scientific and practical significance of the work is a knowledge about functionality and main parameters of a new kinematic structure, that can be used for a future research and development of a walking platform. Main methodology of research is to implement known methods for an unknown object. The main problems of walking platforms that constrain their use are indicated. The analysis of functional losses and limitations associated with the reduction of the mammal's kinematic structure is performed. The results of mathematical and physical modeling of the mobile robot walking platform are presented, shown trot walking and positioning. A list of options for usage of the walking mobile robot based on the new kinematic structure is given.

Key words: Mobile robot, quadruped, walking platform, kinematic design.

Объектом исследования является новая кинематическая структура шагающей платформы (шасси) [1], [2] (см. рис. 1, рис. 2). Цель исследования - определить потери и выигрыши функциональности предлагаемого решения, сравнить основные параметры кинематической структуры млекопитающего с инновационной. Шагающие роботы имеют историю около 35 лет активных исследований и связанных с ними постоянных улучшений и совершенствований. Научные знания и технологии, используемые для создания шагающих роботов, также постоянно совершенствуются. Эволюционирует и назначение шагающих роботов от задач транспортировки грузов в условиях,

где необходима высокая проходимость, до задач использования роботов в домашних условиях, где необходимы не только проходимость, маневренность, но и коллаборативность, формировать поведенческую активность. Шагающая робототехника может стать основой для создания прорывных технологий во многих приоритетных и критических областях науки и техники. Факторами, способствующими этому, являются:

- быстрый рост бытовой робототехники;
- развитие концепции «умных» вещей, домов и городов, интернет-вещей;
- огромный потенциал рынка.

Преимущества шагающей платформы мобильного робота перед традиционными колесными и гусеничными заключаются в следующем:

- высокая проходимость, возможность обхода и переступания препятствий;
- маневренность, возможность перемещения в любом направлении в плоскости опоры:
- возможность изменения статических положений (смещений, наклонов, поворотов);
- возможность двигаться по лестнице;
- возможность обеспечения продольной и поперечной устойчивости при работе с манипулятором;
- возможность удовлетворения высоких требований безопасности за счет отсутствия вращающихся деталей, возможных травмирующих усилий;
- устройство не требует сложной системы амортизации, демпфирования;
- устройство не оставляет сплошного следа, что важно для обеспечения скрытности движения или для нежелательного воздействия на опорную поверхность;
- характер движения позволяет использовать защитные пленки, чехлы для упрощения обеззараживания или дегазации, создания внутреннего изолированного объема для работы в агрессивной среде, для работы при низких или высоких температурах и давлениях;
- меньше проблем с прилипанием грунта и намерзанием льда из-за меньшей площади контакта с опорной поверхностью.

Недостатки шагающей платформы мобильного робота перед традиционными колесными и гусеничными:

- низкая энергоэффективность и автономность;
- сложность системы управления;
- низкая скорость;
- низкая грузоподъемность;
- высокая стоимость.

Кинематическая конструкция шагающих роботов

На рис. 1 показаны известные и новая [1], [2] кинематические структуры шагающих роботов. Обратите внимание, что только новая конструкция не имеет возможности перемещать ногу в вертикальном направлении. Нога может быть поднята вверх, когда тело смещено и нога отклоняется от вертикали.

Зона досягаемости стопы - тор. Шагающая платформа в статическом состоянии имеет три степени свободы: вперед-назад, влево-вправо и вращение в оси рыскания (рис. 2).

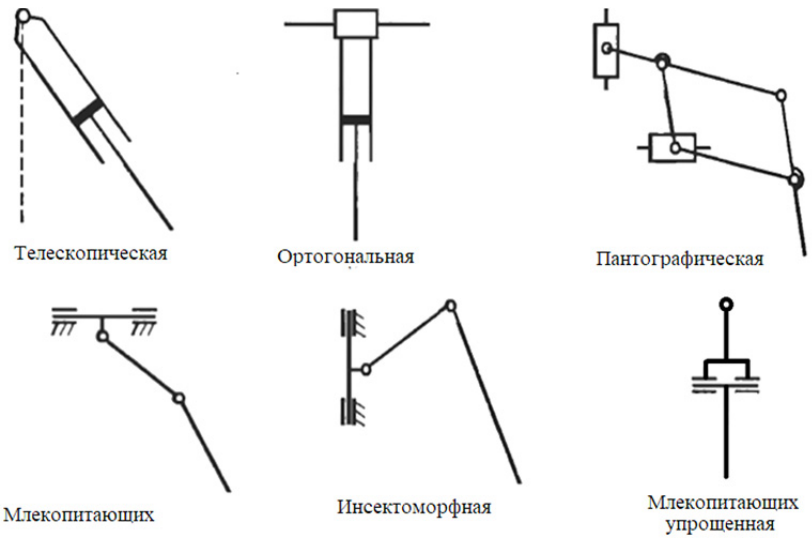


Рисунок 1 – Кинематические структуры шагающих роботов

Четырехногая шагающая платформа мобильного робота с двумя степенями свободы в каждой ноге (см. рис. 2) [1].

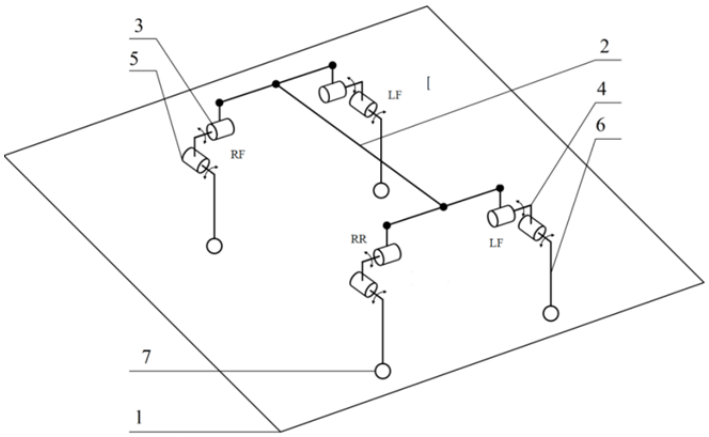


Рисунок 2 – Инновационная кинематическая структура шагающей платформы мобильного робота: 1 - опорная поверхность (пол); 2 - корпус; 3 - привод сгибания-разгибания бедра; 4 - бедро; 5 - привод отведения голени; 6 - голень; 7 - стопа

Аналоги в живой природе и технике

Медведь использует функцию отведения-приведения голени при ходьбе (см. рис. 3), как и новое устройство (см. рис. 2).

Колесо Илона имеет те же степени свободы (см. рис.3), что и нога нового устройства (см. рис. 3): вращение бедра по оси, параллельной оси тангажа, и вращение голени по оси, параллельной оси крена (см. рис. 2).

Рисунок 3 – Аналоги в живой природе и технике: медвежья походка (слева); колесо Илона (справа)

Функциональное назначение

Шагающая платформа предназначена для перемещения себя и полезной нагрузки по опорной поверхности и позиционирования.

Позиционирование

Кинематическая конструкция позволяет изменять положение без изменения точек опоры в направлениях: вперед-назад, влево-вправо и поворота по оси рыскания. Пределы изменения положения ограничены условиями устойчивости и параметрами досягаемости. Кинематическая конструкция позволяет менять положение при смене точек опор в любых направлениях (6 осей).

Движение

Кинематическая конструкция позволяет реализовать известные статические и динамические походки. Робот может преодолевать такие препятствия, как «ступенька», «яма». Он может двигаться по наклонной поверхности и двигаться в любом направлении. Эти факты проверены эмпирически с помощью кинематической модели. На рис.4 показаны фрагменты моделирования движения по лестнице. Основной походкой платформы является походка типа «рысь». С целью моделирования были разработаны циклограммы движения ног (см. рис.5). При движении рысью ноги, расположенные по диагонали, движутся циклично в одной и той же фазе, а ноги, расположенные по другой диагонали, движутся аналогично, но в другой фазе: пока одни ноги контактируют с опорной поверхностью, другие переносятся на новое место опоры. Например, в то время как правая передняя и левая задняя ноги проходят точки 1-2-3-4-5, левая передняя и правая задняя ноги проходят точки 5-6-7-8-9-10-11-12-1. Циклограмма справа на рис. 5 поясняет возможность движения в любом направлении.

Рисунок 4 – Моделирование движения по лестнице

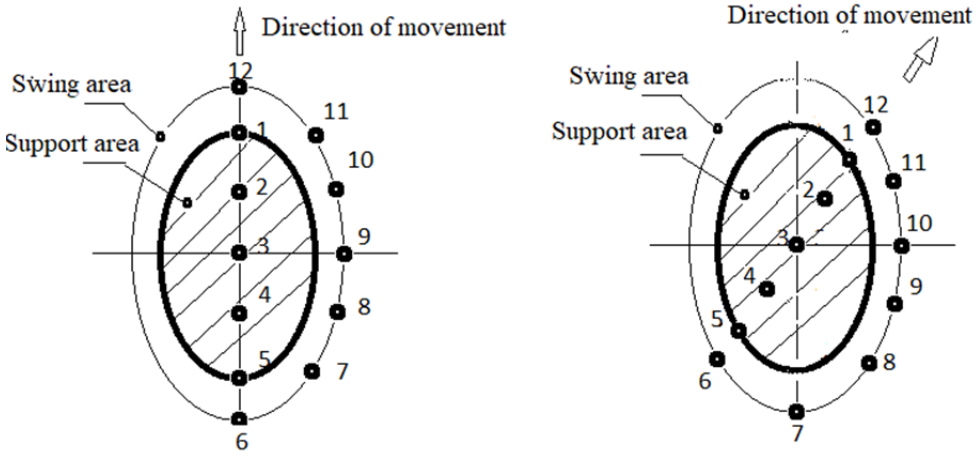


Рисунок 5 – Циклограммы движения ноги при походке типа «Рысь»

Сравнение основных параметров кинематической структуры млекопитающих и инновационной кинематической структуры

Предположение 1. Устройства снабжены электроприводами.

Предположение 2. Устройства отличаются только кинематической конструкцией. Упрощенное устройство не имеет привода отведения-приведения бедра, а колено выполняет функцию отведения–приведения голени (см. рис. 6).

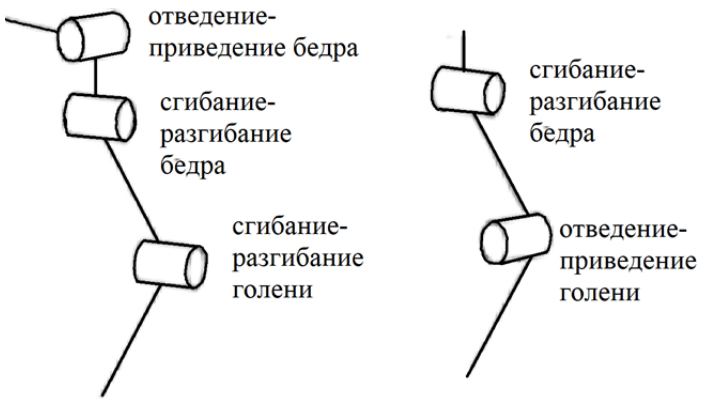


Рисунок 6 – Кинематические схемы ноги млекопитающих (слева) и млекопитающих упрощенная (справа)

Сравнение массы

Масса упрощенного устройства меньше на величину масс четырех приводов, силовых ключей, проводов и монтажных элементов.

Сравнение скорости

Теоретически скорость устройств с кинематической структурой млекопитающих не ограничена, а скорость устройств с упрощенными кинематической структурой млекопитающих ограничена величиной вертикального ускорения, возникающего при ходьбе рысью. На практике скорость ограничена энергетическими возможностями устройства и силой трения стопы и опорной поверхности.

Сравнение величины полезной нагрузки

Полезная нагрузка ограничена величиной вращающих моментов приводов и прочностью конструкции. Вращающие моменты в приводах пропорциональны синусу угла отклонения от вертикали. Упрощенное устройство может нести большую нагрузку за счет того, что при ходьбе элементы ноги отклоняются от вертикали на меньшую величину.

Сравнение энергоэффективности

Для сравнения мы будем использовать параметр стоимости транспортировки (COTmech), то есть количество механической энергии, затраченной на пройденное расстояние (Габриэлли и фон Карман, 1950.).

Для кинематических структур млекопитающих COTmech = 0,31 для двуногих [3] и 0,28 для четвероногих [4]. Для инновационной кинематической структуры млекопитающих подходит модель ходьбы «обратный маятник». (рис. 7) В этом случае COTmech рассчитывается как h/d (см. рис. 7) [4, стр. 11]

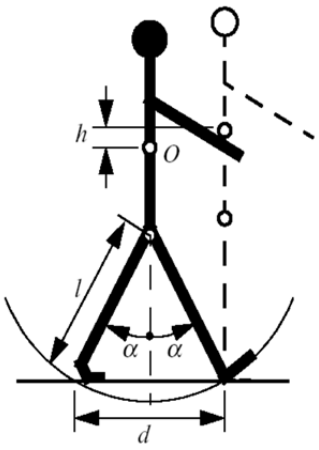


Рисунок 7 – Модель ходьбы «обратный маятник»

В случае, если α=30 градусов и l=1, то h=1-cos (α)=0,134, при этом COTmech = 0,134/1= 0,134, что примерно в два раза меньше, чем в устройстве с кинематической структурой млекопитающих.

Сравнение сложности систем управления

Устройство с упрощенной кинематической структурой имеет меньшее число степеней свободы, поэтому проще в управлении. Кроме того, уменьшение количества приводов сокращает кинематическую цепь, что делает конструкцию более жесткой, повышает управляемость устройства.

Сравнение стоимости

Упрощенное устройство дешевле, поскольку содержит меньше компонентов (приводы, силовые ключи, провода и крепежные элементы).

Результаты

Упрощение кинематической конструкции не привело к потере основных функциональных свойств, за исключением:

- невозможно поднять ногу вертикально без перемещения корпуса;
- невозможна полная стабилизация корпуса при движении;
- требуется перестановка ног для позиционирования корпуса в вертикальной оси и по осям вращения тангажа и крена;

Потери других важных функциональных качеств (маневренность, проходимость, скорость) не выявлены.

Упрощение кинематической конструкции снижает массу устройства, повышает энергоэффективность, снижает стоимость устройства и упрощает управление. Эти факты позволяют улучшить технико-экономические параметры шагающей платформы для многих практических применений в различных областях:

- домашняя робототехника;
- сельскохозяйственная промышленность;
- добыча полезных ископаемых;
- медицина;

- строительство;
- специальная робототехника;
- торговля и реклама;
- престижная робототехника;
- индустрия развлечений;
- учебная и исследовательская робототехника.

Математическое и физическое моделирование

Математическая модель в MATLAB+ Simulink реализована как многотельная система. Визуализация результатов моделирования демонстрирует походку «рысь» и позиционирование в трех осях [см. https://yadi.sk/d/5f0J8YXmikj1XA].

Физическая модель реализована из компонентов «сделай сам» и демонстрирует походку «рысь», а также позиционирование в трех осях [см. https://yadi.sk/d/5f0J8YXmikj1XA].

Ближайшая практическая перспектива

Мобильные роботы на шагающей платформе представлены на рынке в основном в виде игрушек и образовательных наборов. Был разработан прототип шагающей платформы в виде игрушки. Наш прототип и игрушка-робот Alienbot (Hiwonder, Китай) собраны почти из одних и тех же компонентов. Наш прототип может двигаться шагом в 3,5 раза быстрее, чем робот Alienbot. Он может нести нагрузку до 3,5 кг и потребляет меньше энергии (см. рис. 8).

Рисунок 8 – Робот-игрушка Alienbot фирмы Hiwonder и наш прототип

Упрощение конструкции не привело к потере основных функциональных свойств.

Положительный результат упрощения (снижение веса, снижение себестоимости, упрощение конструкции, упрощение управления, меньшее энергопотребление, более высокая грузоподъемность) облегчает практическое использование инновационной шагающей платформы, расширяет возможности оптимизации функциональных параметров для конкретных решений.

Литература

1. Близнец П.М. и др. Шагающее устройство Патент 2642020 РФ. заявл. 24.06.2016, опубл. 23.01.2018.

2. Близнец П.М. Патент 2033955 РФ. заявл. 04.01.1991, опубл. 30.04.1995.

3. URL: https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/mavt/robotics-n-intelligent-systems/asl-dam/documents/lectures/autonomous_mobile_robots/spring-2020/Locomotion2020.pdf, page 21.

4. Design and control of legged robots compliant with actuation. Марко Хаттер. Докторская диссертация, Цюрих, ETH, 2013., page 122.

А.В. Антонов, В.А. Глазунов

ВЛИЯНИЕ УПРУГИХ СИЛ НА ТОЧНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРА ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, ant.ant.rk@gmail.com

Аннотация

При работе механизмов в их звеньях могут возникать силы упругости, способные повлиять на точность перемещений и, как следствие, на качество выполнения поставленных задач. В данной работе на примере манипулятора параллельной структуры с шестью степенями свободы исследовано влияние таких сил на движение выходного звена. Рассматриваемый манипулятор имеет три кинематические цепи, каждая из которых содержит стержень-ввод, соединяющий выходное звено с основанием. Представлена математическая модель, описывающая деформации частей стержней-вводов, находящихся в рабочем пространстве манипулятора. Установлено, что в каждом стержне возникает две силы изгибной и одна сила продольной упругости. На основе уравнений Ньютона-Эйлера составлены уравнения движения выходного звена с учетом полученных выражений для расчета упругих сил. С использованием пакета MATLAB проведено моделирование движения для двух разных материалов стержней-вводов: алюминия и стали. Показано, что на заданное движение выходного звена накладываются колебания. Для каждого случая построены графики расчетного движения и определены наибольшие отклонения от заданной траектории.

Ключевые слова: манипулятор, параллельная структура, стержень-ввод, упругие силы, колебания, точность, моделирование, MATLAB.

A.V. Antonov, V.A. Glazunov

INFLUENCE OF ELASTIC FORCES ON MOVEMENT ACCURACY OF PARALLEL MANIPULATOR

Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, ant.ant.rk@gmail.com

Abstract

During the mechanisms' operation, elastic forces can arise in their links, which can affect the motion accuracy and, as a result, the overall performance. This paper studies the influence of such forces on the motion of a parallel manipulator with six degrees of freedom. The considered manipulator has three kinematic chains, each of which contains a piercing rod connecting an output link with a base. The article presents a mathematical model that describes the deformations of the rods' parts located in the manipulator workspace. It is found that there are two bending forces and one tension force in each rod. Based on Newton-Euler equations, the equations of output link motion were derived concerning the obtained expressions for the elastic forces. MATLAB package was used to simulate the motion for two different materials of the rods: aluminum and steel. It is shown that oscillations are superimposed on a desired motion of the output link. For each case, the graphs of the calculated movement were plotted and the largest deviations from the specified trajectory were determined.

Key words: manipulator, parallel structure, piercing rod, elastic forces, oscillations, accuracy, simulation, MATLAB.

Манипуляторы параллельной структуры представляют собой механизмы, выходное звено которых соединено с основанием при помощи нескольких кинематических цепей [1]. Особенности структуры и конструкции таких механизмов наделяют их повышенными показателями точности и грузоподъемности по сравнению с классическими манипуляторами последовательного типа. Другое преимущество подобных систем – возможность расположения приводов вне рабочей зоны с целью уменьшения инерционности механизма и повышения скорости работы.

Несмотря на такие недостатки, как небольшая рабочая зона и наличие особых положений, указанные преимущества позволяют манипуляторам параллельной структуры находить применение в самых разнообразных сферах: известны многочисленные примеры использования подобных систем в качестве медицинских роботов [2, 3], измерительных систем [4, 5], станков [6, 7] и др. [1, 8, 9].

При работе механизмов в их звеньях могут возникать силы упругости [10, 11], вследствие чего на движение выходного звена могут накладываться малые колебания, способные значительно снизить точность выполняемых операций. В связи с этим становится актуальной задача проведения анализа динамики механизмов с учетом данной упругости звеньев.

В данной работе на примере манипулятора параллельной структуры с шестью степенями свободы и тремя кинематическими цепями, приводы которого расположены вне рабочей зоны, рассмотрены вопросы анализа точности движения выходного звена под действием возникающих в звеньях механизма сил упругости. Сначала рассмотрены особенности структуры манипулятора и возможные области его применения. Далее проведен анализ возникающих в звеньях механизма сил упругости и соответствующих им упругих деформаций. После этого, на базе уравнений Ньютона-Эйлера составлены уравнения движения выходного звена манипулятора, учитывающие определенные на предыдущем этапе силы упругости. Полученные соотношения использованы для моделирования движения выходного звена по заданной траектории для известной геометрии манипулятора и различных материалов звеньев. Рассмотрены соответствующие примеры. Заключение обобщает результаты разделов и указывает на их возможное развитие.

Описание структуры манипулятора

Модель рассматриваемого манипулятора параллельной структуры приведена на рис. 1.

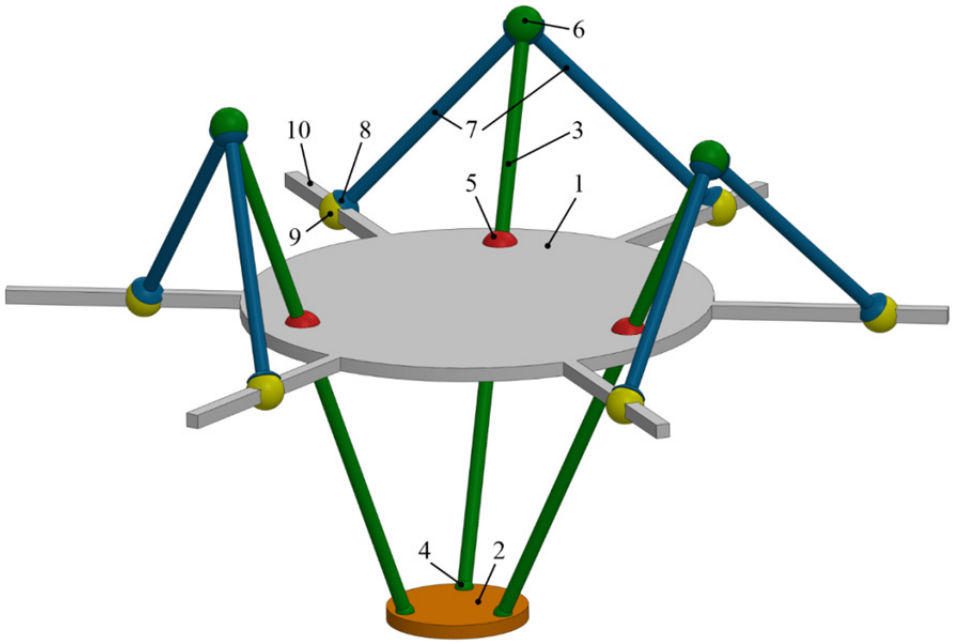
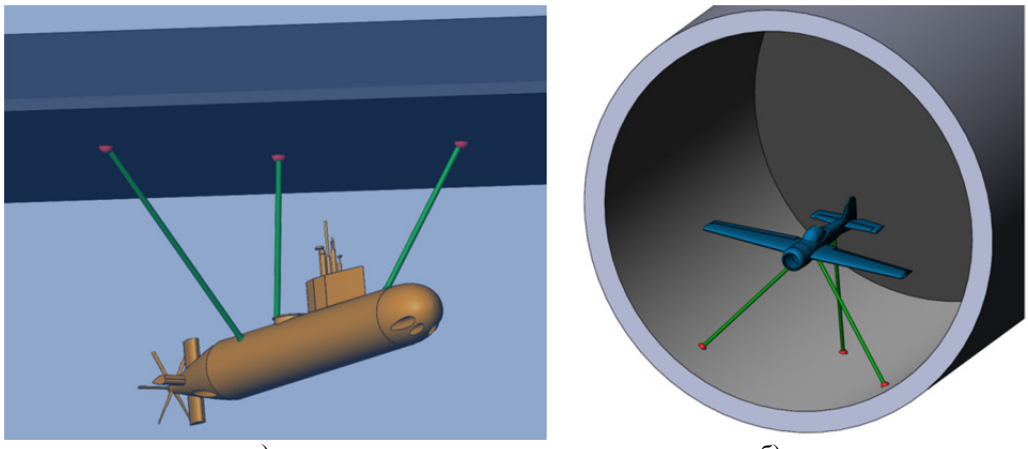


Рисунок 1 – Модель рассматриваемого манипулятора

Рассмотрим подробней структуру данного манипулятора. Выходное звено (платформа) 2 манипулятора соединено с основанием 1 при помощи трех кинематических цепей. Каждая цепь включает стержень-ввод 3, один из концов которого соединен с платформой 2 посредством сферического шарнира 4. Стержень 3 также соединен с основанием 1 сферическим шарниром с отверстием 5, обеспечивающим возможность поступательного движения стержня 3. Другой конец стержня соединен сферическим шарниром 6 с парой промежуточных звеньев 7. С противоположной стороны каждое из звеньев 7 соединено сферическим шарниром 8 с ползуном 9. Ползун 9 осуществляет поступательное перемещение вдоль направляющей 10, распложенной на основании 1. Линейное перемещение ползунов 9 реализуется при помощи приводов (на рис. 1 приводы не показаны). Выходное звено данного манипулятора обладает шестью степенями свободы.

При такой структуре все приводы манипулятора расположены вне его рабочей зоны, а в самом рабочем пространстве находится только выходное звено 2 и части стержней-вводов 3. Данные стержни имеют неподвижные точки ввода (сферические шарниры с отверстием 5). Обеспечив герметичность в этих точках, можно использовать манипулятор для работы в условиях, где эта герметичность требуется, например, при выполнении подводных операций (рис. 2а). Поскольку в рабочей зоне остается небольшое число подвижных элементов, можно указать на еще одно возможное применение – испытание аппаратов в аэродинамических трубах, где необходимо минимально искажать воздушный поток (рис. 2б).



а) б)

Рисунок 2 – Возможные области применения рассматриваемого манипулятора:
а) подводные испытания; б) испытания в аэродинамической трубе

Анализ динамики манипулятора

При работе манипулятора на движение его выходного звена могут накладываться малые колебания, обусловленные упругостью звеньев, что может приводить к снижению точности выполнения операций. В связи с этим становится важным проведение динамического анализа с учетом возникающих упругих сил.

В данной работе анализ динамики манипулятора с учетом сил упругости будем проводить в предположении, что жесткость промежуточных звеньев 7 на всей своей длине и стержней-вводов 3 на участке над основанием 1 намного больше жесткости частей стержней 3, распложенных в рабочем пространстве манипулятора. Таким образом, будем рассматривать только упругие деформации частей стержней-вводов 3, находящихся в рабочей зоне, и соответствующие им силы упругости, действующие на выходное звено 2. Рис. 3 иллюстрирует схему отклонения выходного звена в данном случае и ее эквивалентную модель.

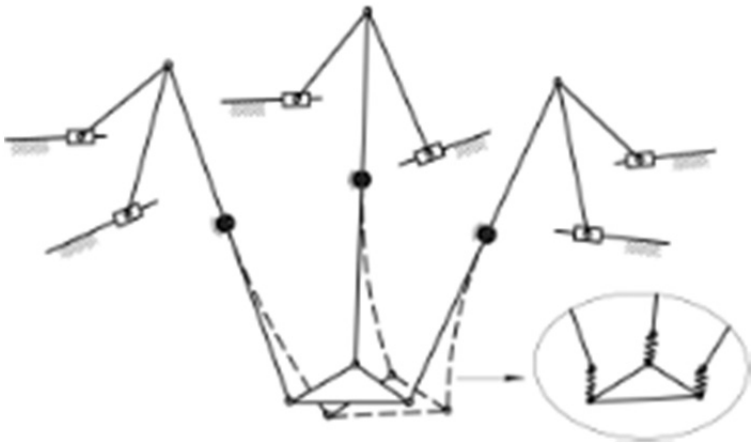


Рисунок 3 – Отклонение выходного звена под действием упругих сил и эквивалентная модель

Сперва рассмотрим, какие именно упругие силы и деформации могут возникать при работе манипулятора, а затем покажем, как они могут быть учтены при составлении уравнений движения выходного звена.

Упругие силы и деформации

Для начала пусть все приводы манипулятора будут заторможены. Мысленно разъединим стержень 3 с выходным звеном 2 в сферическом шарнире 4 и обозначим конец стержня 3 как E_i с координатами $\mathbf{p}_{Ei}$ относительно некоторой глобальной системы координат (рис. 4), где $i = 1…3$ – номер кинематической цепи механизма.

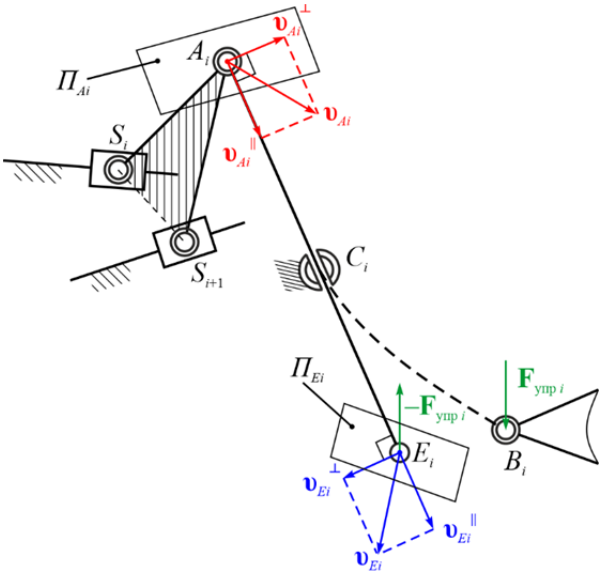


Рисунок 4 – Скорости элементов манипулятора на примере одной из кинематических цепей

Для определения направления силы упругости $\mathbf{F}_{\text{упр}\,i}$ сперва необходимо найти направление вектора $\boldsymbol{\upsilon}_{Ei}$ возможной скорости точки E_i (рис. 4). Сперва определим направление вектора $\boldsymbol{\upsilon}_{Ai}$ возможной скорости точки A_i. При заторможенных приводах траекторией движения точки A_i является окружность, и вектор $\boldsymbol{\upsilon}_{Ai}$ ее возможной скорости будет перпендикулярен плоскости $S_iS_{i+1}A_i$ (рис. 4). Данный вектор может быть найден из решения следующей системы уравнений, записанной в матричном виде:

$$\begin{bmatrix}\mathbf{p}_{Si} & \mathbf{p}_{Si+1} & \mathbf{p}_{Ai}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\upsilon}_{Ai}=\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}, \tag{1}$$

где $\mathbf{p}_{Si}$, $\mathbf{p}_{Si+1}$ и $\mathbf{p}_{Ai}$ – координаты точек S_i, S_{i+1} и A_i соответственно.

Вектор $\boldsymbol{\upsilon}_{Ai}$ можно спроецировать на стержень и на плоскость Π_{Ai}, перпендикулярную данному стержню. В результате получим проекции $\boldsymbol{\upsilon}^{\parallel}{}_{Ai}$ и $\boldsymbol{\upsilon}^{\perp}{}_{Ai}$ соответственно (рис. 4):

$$\boldsymbol{\upsilon}_{Ai}^{\parallel}=\boldsymbol{\upsilon}_{Ai}^{\mathrm{T}}\left(\mathbf{p}_{Ci}-\mathbf{p}_{Ai}\right)\frac{\mathbf{p}_{Ci}-\mathbf{p}_{Ai}}{L_{ACi}^{2}},\quad \boldsymbol{\upsilon}_{Ai}^{\perp}=\boldsymbol{\upsilon}_{Ai}-\boldsymbol{\upsilon}_{Ai}^{\parallel}, \tag{2}$$

где $\mathbf{p}_{Ci}$ – координаты точки C_i; L_{ACi} – длина части A_iC_i стержня-ввода (рис. 4).

Вектор $\boldsymbol{\upsilon}_{Ei}$ можно найти аналогичным образом через сумму проекций $\boldsymbol{\upsilon}^{\parallel}{}_{Ei}$ на направление стержня и $\boldsymbol{\upsilon}^{\perp}{}_{Ei}$ перпендикулярно стержню:

$$\boldsymbol{\upsilon}_{Ei}=\boldsymbol{\upsilon}_{Ei}^{\parallel}+\boldsymbol{\upsilon}_{Ei}^{\perp}, \tag{3}$$

причем должны выполнять следующие соотношения:

$$\boldsymbol{\upsilon}_{Ei}^{\parallel}=\boldsymbol{\upsilon}_{Ai}^{\parallel},\quad \boldsymbol{\upsilon}_{Ei}^{\perp}=-\frac{L_{CEi}}{L_{ACi}}\boldsymbol{\upsilon}_{Ai}^{\perp}, \tag{4}$$

где L_{CEi} – длина части C_iE_i стержня-ввода (рис. 4).

Зная направление вектора $\boldsymbol{\upsilon}_{Ei}$, в точке E_i можно построить плоскость Π_{Ei}, перпендикулярную данному вектору (рис. 4). Именно в этой плоскости будут действовать силы упругости.

Если стержень упруго деформирован, возникающие упругие силы, действующие на платформу манипулятора в сферическом шарнире (точке B_i), могут быть найдены следующим образом [12]:

$$\mathbf{F}_{\text{из}1i}=\frac{3EJ_i}{L_{CEi}^{3}}\mathbf{d}_{1i},\quad \mathbf{F}_{\text{из}2i}=\frac{3EJ_i}{L_{CEi}^{3}}\mathbf{d}_{21i},\quad \mathbf{F}_{\text{сж}\,i}=\frac{EF_i}{L_{CEi}}\mathbf{d}_{22i}, \tag{5}$$

где $\mathbf{F}_{\text{из}1i}$ и $\mathbf{F}_{\text{из}2i}$ – силы изгибной упругости; $\mathbf{F}_{\text{сж}i}$ – сила продольной упругости; $\mathbf{d}_{1i}$, $\mathbf{d}_{21i}$ и $\mathbf{d}_{22i}$ – деформации стержня (рис. 5); EJ_i и EF_i – изгибная и продольная жесткости стержня.

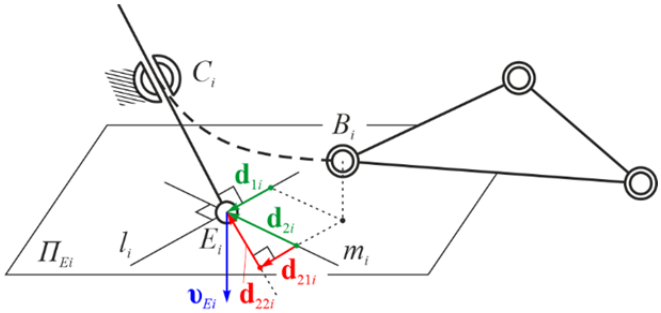


Рисунок 5 – Упругие деформации стержня-ввода манипулятора

Для определения значений деформаций в выражении (5) рассмотрим, как полная деформация стержня B_iE_i раскладывается на отдельные составляющие. Данную деформацию можно представить в виде суммы деформаций $\mathbf{d}_{1i}$ и $\mathbf{d}_{2i}$, где величина $\mathbf{d}_{2i}$ в свою очередь является суммой $\mathbf{d}_{21i}$ и $\mathbf{d}_{22i}$ (рис. 5). Далее рассмотрим порядок расчета данных величин.

1. Деформация $\mathbf{d}_{1i}$ соответствует изгибу стержня в направлении прямой l_i, лежащей в плоскости Π_{Ei} и перпендикулярной стержню (рис. 5). Для ее определения сначала найдем вектор $\mathbf{l}_i$, направленный вдоль прямой l_i:

$$\mathbf{l}_\mathrm{i} = \left(\mathbf{p}_{Ei} - \mathbf{p}_{Ci}\right) \times \mathbf{v}_{Ei}, \tag{6}$$

где $\mathbf{p}_{Ei}$ – координаты точки E_i.

После этого значение деформации $\mathbf{d}_{1i}$ может быть определено следующим образом:

$$\mathbf{d}_{1i} = \left(\mathbf{p}_{Ei} - \mathbf{p}_{Bi}\right)^\mathrm{T}_{\Pi Ei} \mathbf{l}_i \frac{\mathbf{l}_i}{\left|\mathbf{l}_i\right|^2}, \tag{7}$$

где $\mathbf{p}_{Bi}$ – координаты точки B_i, а индекс ΠEi означает проекцию разности векторов на плоскость Π_{Ei}.

2. Деформация $\mathbf{d}_{2i}$, направленная вдоль прямой m_i, лежащей в плоскости Π_{Ei} и перпендикулярной прямой l_i (рис. 5), соответствует суммарному сжатию $\mathbf{d}_{22i}$ и изгибу $\mathbf{d}_{21i}$ стержня-ввода и может быть легко рассчитана:

$$\mathbf{d}_{2i} = \left(\mathbf{p}_{Ei} - \mathbf{p}_{Bi}\right)_{\Pi Ei} - \mathbf{d}_{1i}. \tag{8}$$

Сжатие $\mathbf{d}_{22i}$ стержня представляет собой проекцию $\mathbf{d}_{2i}$ на направление стержня:

$$\mathbf{d}_{22i} = \mathbf{d}_{2i}^\mathrm{T} \left(\mathbf{p}_{Ei} - \mathbf{p}_{Ci}\right) \frac{\mathbf{p}_{Ei} - \mathbf{p}_{Ci}}{L_{CEi}^2}. \tag{9}$$

Определение изгиба $\mathbf{d}_{21i}$ не вызывает затруднений:

$$\mathbf{d}_{21i} = \mathbf{d}_{2i} - \mathbf{d}_{22i}. \tag{10}$$

Уравнения движения

Теперь, зная величины деформаций и используя соотношение (5), можно найти действующие на выходное звено силы упругости и составить его уравнения движения, которые в данном случае удобно записывать в виде уравнений Ньютона-Эйлера [13]:

$$m_\Sigma \mathbf{a}_G = \sum_k \mathbf{F}_k, \tag{11}$$

$$\mathbf{I}_{G\Sigma} \boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{I}_{G\Sigma} \boldsymbol{\omega} = \sum_l \mathbf{M}_l, \tag{12}$$

где m_Σ – масса платформы с учетом приведенных к ее сферическим шарнирам масс стержней-вводов; $\mathbf{I}_{G\Sigma}$ – тензор инерции выходного звена с учетом приведенных масс, вычисленный в центре масс платформы; $\mathbf{a}_G$ – ускорение центра масс выходного звена; $\boldsymbol{\omega}$ – угловая скорость платформы; $\boldsymbol{\varepsilon}$ – угловое ускорение платформы; $\mathbf{F}_k$ – внешняя сила, приложенная в некоторой точке P_k выходного звена; $\mathbf{M}_l$ – внешний момент, действующий на выходное звено относительно его центра масс.

Выражения выше учитывают масс-инерционные характеристики стержней-вводов манипулятора, приведенные к сферическим шарнирам выходного звена. В данной работе был использован

метод приведения, основанный на равенстве первой собственной частоты колебаний стержня и эквивалентной ему массы. Такой подход является широко известным и может быть найден в работе [14].

На выходное звено манипулятора действуют силы упругости (5), приложенные в сферических шарнирах, вес **G**, приложенный в центре масс, и сила воздействия среды $\mathbf{F}_{внеш}$, если таковая имеется, поэтому можно записать:

$$\sum_k \mathbf{F}_k = \sum_{i=1}^{3} \left(\mathbf{F}_{из\,1i} + \mathbf{F}_{из\,2i} + \mathbf{F}_{сж\,i} \right) + \mathbf{G} + \mathbf{F}_{внеш}, \tag{13}$$

$$\sum_l \mathbf{M}_l = \sum_{i=1}^{3} \left(\mathbf{p}_{Bi} - \mathbf{p}_G \right) \times \left(\mathbf{F}_{из\,1i} + \mathbf{F}_{из\,2i} + \mathbf{F}_{сж\,i} \right) + \left(\mathbf{p}_{внеш} - \mathbf{p}_G \right) \times \mathbf{F}_{внеш}, \tag{14}$$

где $\mathbf{p}_G$ – координаты центра масс выходного звена; $\mathbf{p}_{внеш}$ – координаты точки приложения силы воздействия среды $\mathbf{F}_{внеш}$.

Угловая скорость **ω**, угловое ускорение **ε** и ускорение центра масс платформы $\mathbf{a}_G$ в выражениях (11) и (12) могут быть рассчитаны по следующим формулам [15]:

$$\begin{gathered} \boldsymbol{\omega} = \mathbf{i}\left(\frac{d\,\mathbf{j}^{\mathrm{T}}}{dt}\mathbf{k} \right) + \mathbf{j}\left(\frac{d\,\mathbf{k}^{\mathrm{T}}}{dt}\mathbf{i} \right) + \mathbf{k}\left(\frac{d\,\mathbf{i}^{\mathrm{T}}}{dt}\mathbf{j} \right), \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt}, \\ \mathbf{a}_G = \frac{d^2\mathbf{p}}{dt^2} + \boldsymbol{\omega} \times \left(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{R}\boldsymbol{\rho}_G \right) + \boldsymbol{\varepsilon} \times \mathbf{R}\boldsymbol{\rho}_G, \end{gathered} \tag{15}$$

где **p** – вектор положения выходного звена манипулятора; **R** = [**i j k**] – матрица поворота выходного звена; $\boldsymbol{\rho}_G$ – координаты центра масс платформы в связанной с ней системе координат, положение и ориентация которой определяются параметрами **p** и **R**; t – время.

Уравнения (11) и (12) совместно с соотношениями (13)–(15) формируют систему уравнений движения выходного звена. Они могут быть приведены к каноническому виду [13] относительно координат выходного звена, что удобно для последующего интегрирования и анализа движения.

Рассмотрим примеры исследования движения выходного звена манипулятора, находящегося под действием сил упругости и веса, при отработке заданной траектории движения. Пусть масса выходного звена составляет 230 г, каждый стержень-ввод имеет длину 600 мм, промежуточные звенья – 300 мм, диаметр выходного звена – 120 мм, а точки ввода стержней расположены на окружности диаметром 400 мм. Пусть также стержни-вводы представляют собой тонкостенные трубки круглого сечения с внешним диаметром $D_{внеш}$, равным 10 мм, и внутренним диаметром $D_{внут}$, равным 8 мм. Параметры жесткости стержней могут быть найдены следующим образом [12]:

$$EJ_i = E\frac{\pi D^3 \delta}{8}, \quad EF_i = E\frac{\pi\left(D_{внеш}^2 - D_{внут}^2 \right)}{4}, \tag{16}$$

где E – модуль упругости; D – средний диаметр трубы; δ – толщина стенки трубы:

$$D = \frac{D_{внеш} + D_{внут}}{2}, \quad \delta = \frac{D_{внеш} - D_{внут}}{2}. \tag{17}$$

В качестве заданной траектории рассмотрим движение выходного звена с постоянной ориентацией по окружности, плоскость которой параллельна плоскости основания:

$$\begin{gathered} x(t) = 20\cos(8\pi t) \text{ мм}, \quad y(t) = 20\sin(8\pi t) \text{ мм}, \quad z(t) = -310 \text{ мм}, \\ \varphi(t) = \theta(t) = \psi(t) = 0 \text{ рад}, \end{gathered} \tag{18}$$

где x, y и z – компоненты вектора **p** положения выходного звена; φ, θ и ψ – углы Эйлера выходного звена: φ – первое вращение вокруг оси z, θ – второе вращение вокруг повернутой оси y и ψ – третье вращение вокруг дважды повернутой оси x. Оси x и y неподвижной системы координат, относительно которой задается движение (18), лежат в плоскости основания платформы, а ось z направлена вверх. Центр неподвижной системы координат расположен в центре основания.

Для моделирования составленных соотношений и исследования движения выходного звена была составлена программа в пакете MATLAB. Интегрирование проводилось на интервале времени [0, 1] с методом Рунге-Кутты с автоматическим выбором шага. При расчетах были использованы

кинематические соотношения, основанные на решении обратной задачи о положениях для данного манипулятора, которое может быть найдено в работах [16–18].

Сперва был рассмотрен случай алюминиевых стержней-вводов, имеющих модуль упругости 70 ГПа и плотность материала 2700 кг/м^3. Результаты расчета в виде графиков $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$, $\varphi(t)$, $\theta(t)$ и $\psi(t)$ приведены на рис. 6.

Согласно графикам на рис. 6, наличие упругих сил приводит к возникновению колебаний, накладываемых на заданное движение выходного звена. Траектория движения выходного звена в пространстве приведена на рис. 7. Наибольшие отклонения от заданной траектории по каждой из координат приведены в табл. 1. Суммарное наибольшее отклонение составило 4,14 мм.

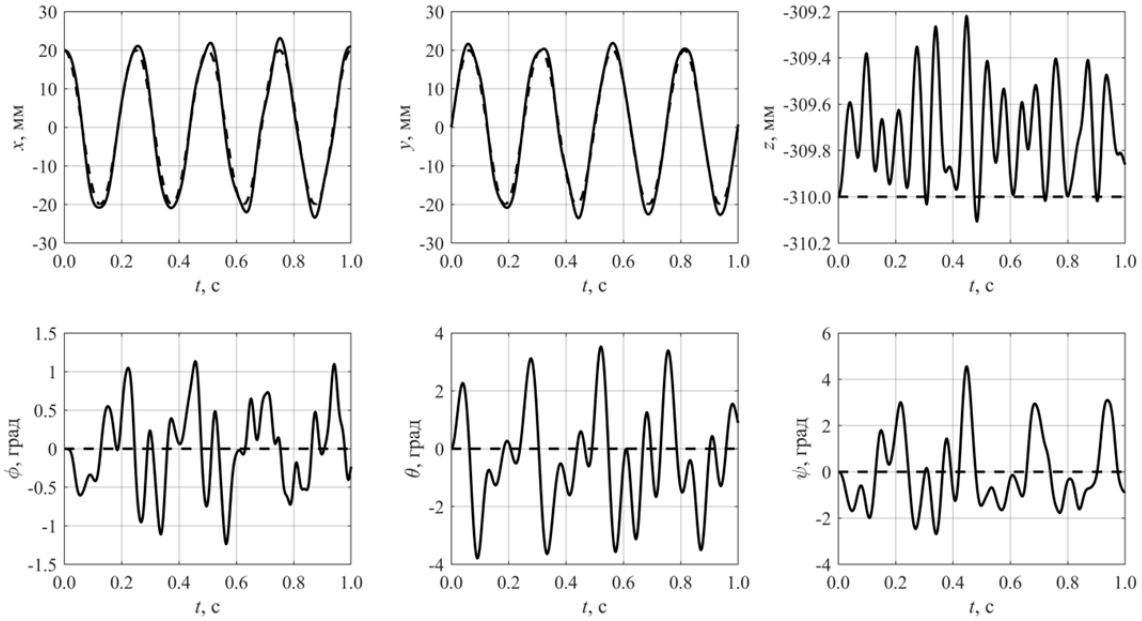


Рисунок 6 – Изменение координат выходного звена манипулятора с алюминиевыми стержнями: штриховая линия – заданное движение; сплошная линия – расчетное движение

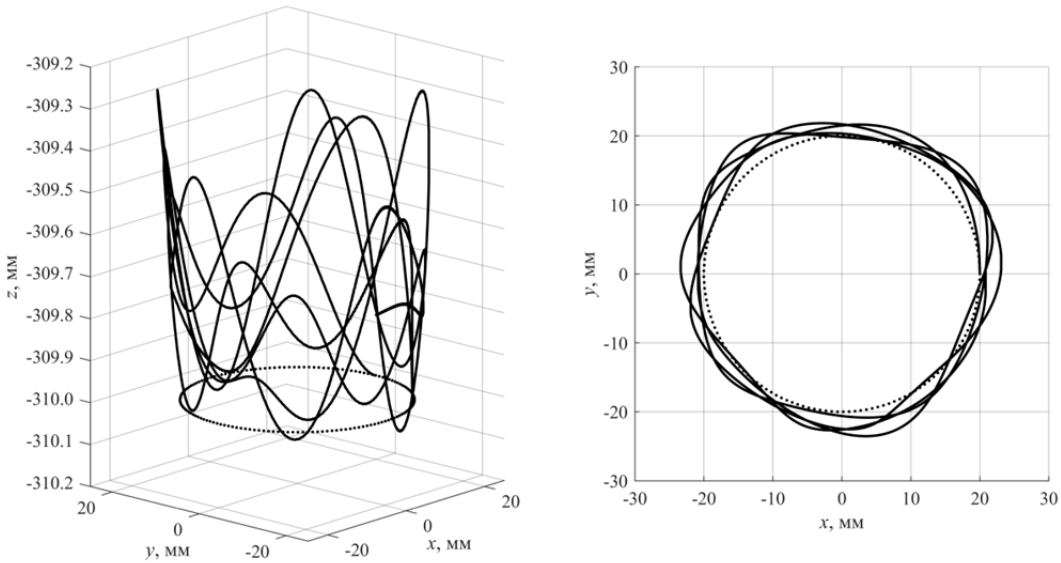


Рисунок 7 – Траектория движения выходного звена манипулятора с алюминиевыми стержнями и ее проекция на горизонтальную плоскость: пунктирная линия – заданное движение; сплошная линия – расчетное движение. Масштаб оси z увеличен для большей наглядности

Таблица 1 – Максимальные отклонения от заданной траектории по каждой из координат для манипулятора с алюминиевыми стержнями

Δx, мм	**Δy, мм**	**Δz, мм**	**Δφ, град**	**Δθ, град**	**Δψ, град**
3,48	3,98	0,78	1,24	3,79	4,56

Второй случай был рассмотрен для стержней-вводов из стали, имеющей модуль упругости 200 ГПа и плотность 7800 кг/м^3. Результаты расчета в виде графиков $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$, $\varphi(t)$, $\theta(t)$ и $\psi(t)$ приведены на рис. 8, а траектория движения платформы – на рис. 9. Наибольшие отклонения от заданной траектории по каждой из координат приведены в табл. 2. Суммарное наибольшее отклонение составило 1,39 мм. И хотя наибольшие отклонения от заданной траектории уменьшились, частоты возникающих колебаний возросли.

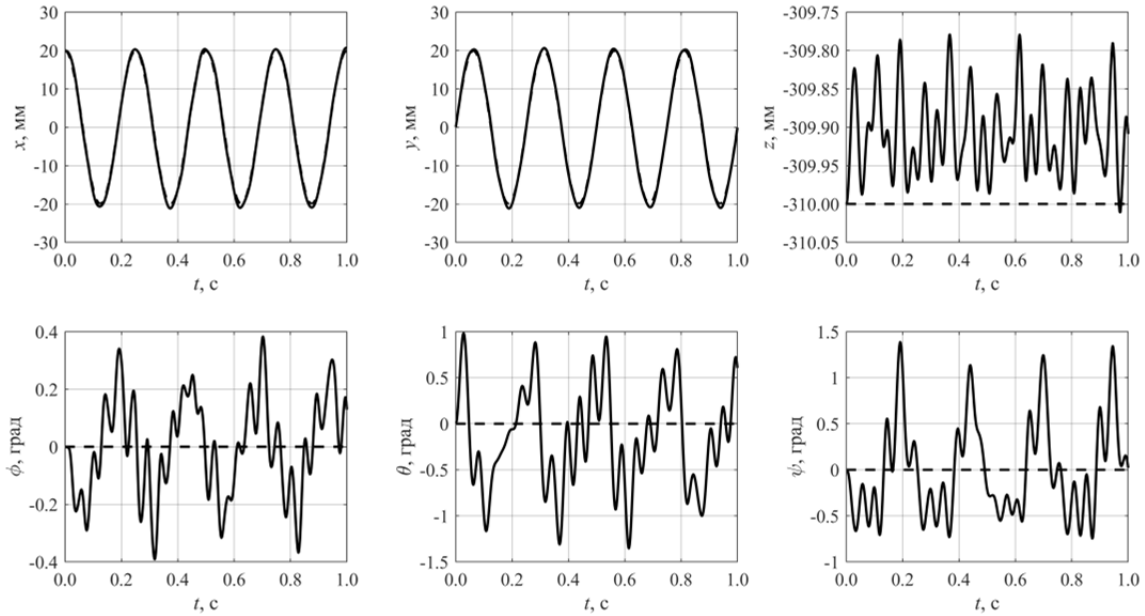


Рисунок 8 – Изменение координат выходного звена манипулятора со стальными стержнями: штриховая линия – заданное движение; сплошная линия – расчетное движение

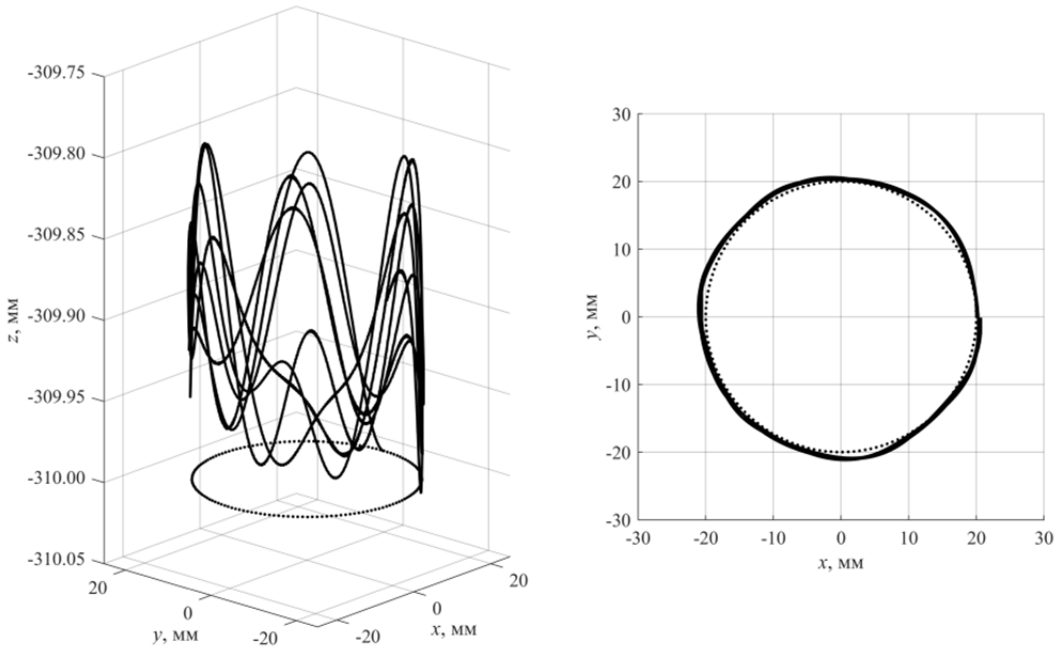


Рисунок 9 – Траектория движения выходного звена манипулятора со стальными стержнями и ее проекция на горизонтальную плоскость: пунктирная линия – заданное движение; сплошная линия – расчетное движение. Масштаб оси z увеличен для большей наглядности

Таблица 2 – Максимальные отклонения от заданной траектории по каждой из координат для манипулятора со стальными стержнями

Δx, мм	**Δy, мм**	**Δz, мм**	**Δφ, град**	**Δθ, град**	**Δψ, град**
1,34	1,28	0,22	0,39	1,35	1,39

Данная работа была посвящена исследованию точности движения выходного звена манипулятора параллельной структуры с шестью степенями свободы при действии в его звеньях упругих сил. В ходе составления математической модели такого движения установлено, что в процессе работы манипулятора в его стержнях-вводах могут возникать силы как изгибной, так и продольной упругости, которые буду воздействовать на выходное звено через его сферические шарниры. Действие этих упругих сил приводит к появлению колебаний, накладываемых на заданное движение выходного звена. Были рассмотрены примеры моделирования полученных соотношений для манипулятора с алюминиевыми и стальными стержнями и определены наибольшие отклонения от заданной траектории, обусловленные воздействием сил упругости. В случае использования стержней-вводов из стали амплитуда колебаний уменьшается, однако возрастает их частота.

Таким образом, упругие силы могут оказывать существенное влияние на точность движения и качество работы манипулятора в целом. Данное обстоятельство должно быть учтено при проектировании и исследовании робототехнических систем. Полученные в работе алгоритмы могут быть развиты и использованы при анализе других манипуляторов параллельной структуры.

Литература

1. Merlet J.-P. Parallel robots. 2nd edition. Dordrecht: Springer, 2006. XX, 402 p.
2. Schadlbauer J., Vaida C., Tucan P. et al. A complete analysis of singularities of a parallel medical robot // Advances in Robot Kinematics / Ed. Lenarčič J., Merlet J.-P. Cham: Springer, 2018. P. 81–89.
3. Fernandes J.J., Arockia S.A. Kinematic and dynamic analysis of 3PUU parallel manipulator for medical applications // Procedia Computer Science, 2018. Vol. 133. P. 604–611.
4. Monckton S., Chrystall K. Design and development of an automated footwear testing system // Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2002. P. 3684–3689.
5. Gough V.E. Contribution to discussion of papers on research in automobile stability, control and tyre performance // Proceedings of the Automobile Division of the Institution of Mechanical Engineers, 1957. Vol. 171. P. 392–394.
6. Weck M., Staimer D. Parallel kinematic machine tools – current state and future potentials // CIRP Annals, 2002. Vol. 51, iss. 2. P. 671–683.
7. Lin W., Li B., Yang X., Zhang D. Modelling and control of inverse dynamics for a 5-DOF parallel kinematic polishing machine // International Journal of Advanced Robotic Systems, 2013. Vol. 10, iss. 8. P. 314.
8. Глазунов В.А. Механизмы параллельной структуры и их применение: робототехнические, технологические, медицинские, обучающие системы. М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2018. 1036 с.
9. Patel Y., George P. Parallel manipulators applications – a survey // Modern Mechanical Engineering, 2012. Vol. 2, iss. 3. P. 57–64.
10. Klimchik A., Chablat D., Pashkevich A. Stiffness modeling for perfect and non-perfect parallel manipulators under internal and external loadings // Mechanism and Machine Theory, 2014. Vol. 79. P. 1–28.
11. Song J., Lu Y, Wang Y., Lu Y. Stiffness and elastic deformation of 4-DoF parallel manipulator with three asymmetrical legs for supporting helicopter rotor // Journal of Robotics, 2020. Vol. 2020, iss. 1. P. 1–11.
12. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 592 с.
13. Siciliano B., Khatib O. Springer handbook of robotics. 2nd ed. Cham: Springer, 2016. LXXVI, 2227 p.
14. Вейц В.Л. Вынужденные колебания в металлорежущих станках. Расчет двигателей и узлов. М.; Ленинград: Машгиз, 1959. 288 с.
15. Kane T.R., Levinson D.A. Dynamics: theory and applications. New York: McGraw-Hill, 1985. XVI, 379 p.
16. Глазунов В.А., Алешин А.К., Шалюхин К.А. и др. Синтез и анализ роботов параллельной структуры для работы в экстремальных средах // Экстремальная робототехника, 2017. Т. 1, № 1. С. 52–59.
17. Антонов А.В., Демидов С.М., Лактионова М.М. и др. Механизм параллельной структуры для работы в агрессивных средах // Справочник. Инженерный журнал с приложением, 2018. № 1. С. 8–13.
18. Antonov A.V., Glazunov V.A., Aleshin A.K. et al. Kinematic analysis of a parallel structure mechanism for work in extreme environments // Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2018. Vol. 47, iss. 2. P. 121–127.

Д.С. Яковлев, А.А. Тачков

ПОДСИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗАВАРИЙНОГО ДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА

НУЦ «Робототехника» МГТУ имени. Н.Э. Баумана, Москва,
yakovlevds@bmstu.ru, tachkov@bmstu.ru

Аннотация

В работе рассматривается подсистема обеспечения безаварийного движения мобильного робота, позволяющая последнему при движении по спланированной траектории избегать столкновений с препятствиями. Показана ее функциональная роль в системе управления движением мобильного робота. Описан метод оценки вероятности столкновения мобильного робота с препятствием. Предложен подход к предотвращению аварий при движении мобильного робота по спланированной траектории с использованием полученной оценки. Приведено описание программной реализации подсистемы обеспечения безаварийного движения мобильного робота. Представлены результаты модельного эксперимента по предотвращению столкновения мобильного робота с препятствием.

Ключевые слова: мобильный робот, система управления движением, столкновение мобильного робота, аварийная ситуация, вероятность столкновения с препятствием, автономность.

D.S. Iakovlev, A.A. Tachkov

THE SUBSYSTEM OF PROVIDING ACCIDENT-FREE MOTION OF A MOBILE ROBOT

Science and Educational Center «Robotics» Bauman Moscow State Technical University, Moscow,
yakovlevds@bmstu.ru, tachkov@bmstu.ru

Abstract

The report is devoted to the subsystem that allows an autonomous mobile robot to avoid collisions with obstacles while moving along a planned trajectory. The functional diagram of the subsystem as part of the motion control system of a mobile robot is presented. The method is described which makes it possible to assess the probability of collision of a mobile robot with an obstacle. Based on the assessment of the collision probability, an approach to preventing accidents when a mobile robot moves along a trajectory is proposed. The description of the software implementation of the subsystem for ensuring the accident-free movement of a mobile robot using the obtained estimate of the probability of collision of a mobile robot with an obstacle is given. The model experiment to prevent a collision of a mobile robot with an obstacle was carried out.

Key words: mobile robot, motion control system, mobile robot collision, emergency, obstacle collision probability, autonomy.

В связи со стремительным развитием рынка беспилотных автомобилей и мобильных роботов (МР) задача их безаварийного движения является одной из приоритетных для разработчиков систем управления движением. В основе безаварийного движения лежит исследование рисков возникновения аварийных ситуации на дорогах общего пользования с участием беспилотных средств [1-6]. Под аварией в настоящей статье, как и в работах [3-6], понимается столкновение МР с окружающими его объектами. Неопределенность в поведении окружающих объектов [5-6], появление случайных ошибок при обработке данных о внешней среде информационно-измерительными системами (ИИС) приводит к необходимости применения вероятностного подхода для решения задачи обеспечения безаварийного движения МР, а оценка вероятности столкновения МР с препятствиями позволяет предсказать возможную аварию и принять меры, позволяющие избежать столкновения.

Описание работы подсистемы обеспечения безаварийного движения мобильного робота

Подсистема предотвращения столкновений мобильного робота реализована в среде ROS (Robot Operating System) и является распределенной между программными модулями «Модуль безопас-

ности», «Управление автодвижением», «Планирование траектории» и «Траекторный регулятор» (рис. 1).

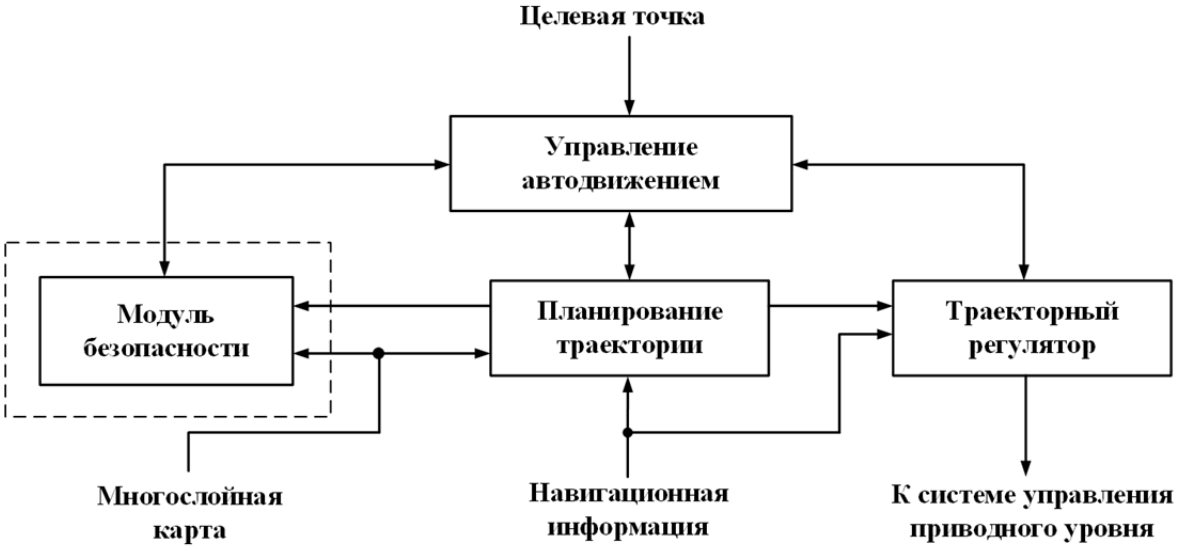


Рисунок 1 – Функциональная схема системы управления мобильного робота

Работу этой подсистемы, входящей в систему управления движением, можно описать следующим алгоритмом:

1. Задается целевая точка, в которую необходимо выполнить перемещение мобильному роботу.
2. Блок «Управление автодвижением» передает целевую точку в блок «Планирование траектории» и запускает процесс построения траектории движения мобильного робота.
3. Блок «Планирование траектории» строит траекторию движения мобильного робота в целевую точку, затем передает её для проверки в блок «Модуль безопасности».
4. Блок «Модуль безопасности» выполняет проверку на возможное столкновение мобильного робота с препятствием при движении по построенной траектории.
5. Если столкновение маловероятно (вероятность столкновения не превышает порогового значения), «Модуль безопасности» передает траекторию в блок «Траекторный регулятор» для ее отработки регулятором.
6. Если вероятность столкновения превышает заданный порог, «Модуль безопасности» сообщает об этом блоку «Управление автодвижением» и тот, в свою очередь, запускает планирование новой траектории, оповещая об этом блок «Планирование траектории».
7. Во время движения МР блок «Модуль безопасности» с заданным периодом выполняет проверку траектории движения.

Основную роль в предотвращении аварийной ситуации играет блок «Модуль безопасности» (выделен пунктиром на рис. 1), который проводит анализ данных от информационно-измерительной системы (ИИС), выполняет оценку вероятности столкновения МР с препятствием и сообщает о необходимости выполнения маневра для объезда препятствия или экстренной остановки. Рассмотрим более подробно его работу.

Построение карты вероятности нахождения препятствий

Мобильный робот представляет окружающее его пространство с помощью ИИС в виде периодически обновляемой многослойной карты, состоящей из множества классов клеток, по аналогии с ландшафтом в работе [7] $\mathcal{M}(\Omega_h, lr, cl) = \left\{ \left(c_{ij}, s \right) \middle| c_{ij} = \mathrm{c}\left(t, \omega_{ij}, s \right), \omega_{ij} \in \Omega_h, s = \overline{0, lr}, lr \in \mathbb{N} \right\}$, где функция $\mathrm{c}(\cdot)$ принимает не более cl значений, $\Omega_h \subset \mathbb{R}^2$. Карта $\mathcal{M}(\Omega_h, lr, cl)$ состоит из lr клеточных плоскостей (слоев) $\mathcal{L}_s(\Omega_h, cl)$, в каждой из которых формируется информация на основе независимых классификаций данных ИИС и одной клеточной плоскости, содержащей комплексированную информацию по всем lr плоскостям – результирующий слой карты $\mathcal{L}_0(\Omega_h, cl) = \left\{ \left(c_{ij}, 0 \right) \middle| c_{ij} = \mathrm{c}\left(t, \omega_{ij}, 0 \right), \omega_{ij} \in \Omega_h \right\}$, где $\mathcal{M}(\Omega_h, lr, cl) = \mathcal{L}_0(\Omega_h, cl) \cup \bigcup_{s=1}^{lr} \mathcal{L}_s(\Omega_h, cl)$. Значение c_{ij} в каждой клетке результирующего слоя рассчитывается по формуле Байеса:

$$c_{ij} = \underset{b=1,2,..,cl}{\arg\max}\left(\frac{P\left(c_{ij}^{(b)}\right)P\left(D\middle|c_{ij}^{(b)}\right)}{\sum_{k=1}^{cl} P\left(c_{ij}^{(k)}\right)P\left(D\middle|c_{ij}^{(k)}\right)} \right), \quad (1)$$

где $c_{ij}^{(b)}$ означает, что значение c_{ij} соответствует классу b, $D = \left\{ \left(c_{ij}, s\right) = \mathcal{M}(\Omega_h, lr, cl; i, j) \middle| s = \overline{1, lr} \right\}$, $P\left(c_{ij}^{(b)}\right)$ – априорная вероятность появления класса b в клетке (i, j), $P\left(D\middle|c_{ij}^{(b)}\right)$ – условная вероятность появления значений D в слоях $s = \overline{1, lr}$, если во внешней среде клетке карты соответствует объект класса b.

В общем случае аварийную ситуацию вызывает столкновение МР с подмножеством классов $CL_{ac} \subseteq CL$ ($CL = \{1, 2, \ldots, cl\}$), которые характеризуют препятствия. Кроме этого, существует подмножество классов $CL_{Б} \subseteq CL$, которые не могут являться причиной аварийной ситуации, причем $CL_{ac} \bigcap CL_{Б} = \varnothing$.

С учетом погрешности измерений в ИИС, значение c_{ij} в клетке результирующего слоя карты $\mathcal{L}_0\left(\Omega_h, cl\right)$ соответствует классифицируемому объекту внешней среды b с вероятностью p_{ij}. Из анализа результирующего слоя карты $\mathcal{L}_0\left(\Omega_h, cl\right)$ строится однослойная, динамически обновляемая карта вероятностей $\mathcal{P}\left(\Omega_h, cl\right) = \left\{ p_{ij} \middle| p_{ij} = p\left(t, \omega_{ij}\right), \omega_{ij} \in \Omega_h \right\}$, где функция $p(\cdot)$ принимает значения в диапазоне $[0;1)$. На k–ом шаге классификации объектов внешней среды значение вероятности p_{ij} вычисляется как:

$$p_{ij}^{(k)} = p_{ij}(q \mid \hat{q}_k) = \frac{p(\hat{q} \mid q) \cdot p_{ij}(q \mid \hat{q}_{k-1})}{p(\hat{q} \mid q) \cdot p_{ij}(q \mid \hat{q}_{k-1}) + p(\hat{q} \mid \overline{q}) \cdot p_{ij}(\overline{q} \mid \hat{q}_{k-1})}, \quad (2)$$

где $q \in CL_{ac}$, $\overline{q} \in CL_{Б}$ – класс объекта во внешней среде, $\hat{q}_k$ – класс, присвоенный объекту во внешней среде ИИС после k–го шага классификации, $p(\hat{q} \mid q)$ – вероятность присвоения ИИС объекту во внешней среде класса $\hat{q}$ при наличии у объекта класса q, $p_{ij}(q \mid \hat{q}_{k-1})$ – априорная вероятность наличия у объекта во внешней среде класса q на k–ом шаге классификации.

Вероятность столкновения МР с препятствием

Мобильный робот выполняет перемещение по спланированной траектории $\mathbf{r} = \mathbf{r}(t)$, занимая в каждый момент времени $t \in [0, T]$ множество $A_f(\mathbf{q}) \subset \Omega_h$, где $\mathbf{q} \in \mathcal{C}$ – специальная евклидова группа SE[8]. С учетом всех возможных боковых и угловых отклонений от траектории $\mathbf{r}$ мобильный робот будет принадлежать случайному подмножеству $A_r = \bigcup_{e \in E_r} \hat{A}_e$ множества Ω_h, где $E_r \subseteq E$ – подмножество всех возможных траекторий МР (рис. 2).

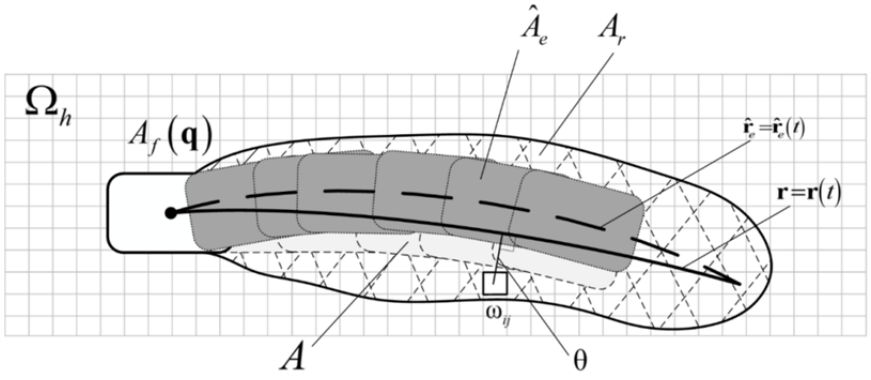


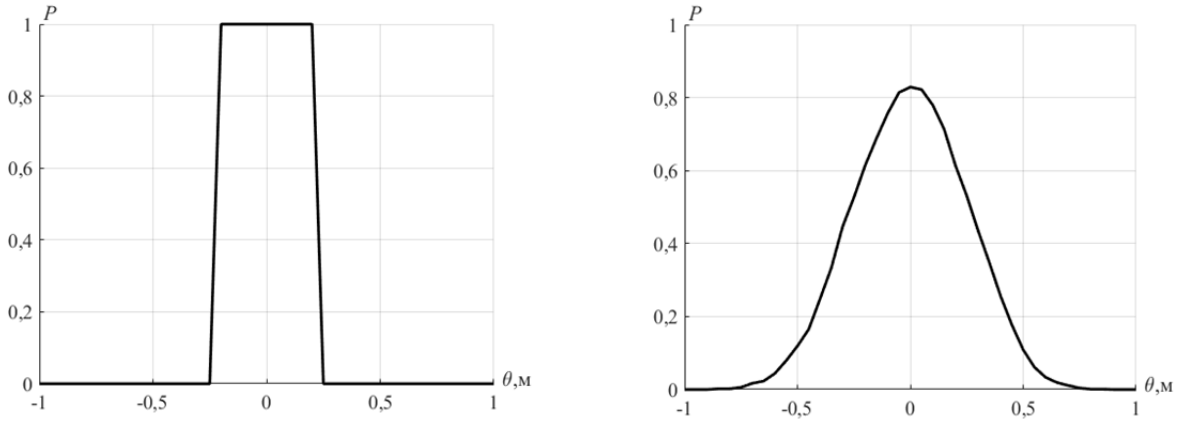
Рисунок 2 – Отклонение фактической траектории $\hat{\mathbf{r}}_e = \hat{\mathbf{r}}_e(t)$ МР от спланированной $\mathbf{r} = \mathbf{r}(t)$

Вероятность накрытия МР клетки ω_{ij} за время движения δ можно выразить как:

$$P_{\omega_{ij}}^{\mathrm{cov}}\left(\omega_{ij} \in A_r\right) = \mathbb{P}\left(\left\{e : \omega_{ij} \in A_r\left(e\right)\right\}\right), \tag{3}$$

где $\mathbb{P}$ – вероятностная мера.

Для упрощения вычислений вероятность $P_{\omega_{ij}}^{\mathrm{cov}}$ рассматривается, как условная вероятность $p\left(\omega_{ij} \mid \theta\right)$ накрытия роботом клетки, которая находится на расстоянии θ от траектории $\mathbf{r}$. По аналогии с вероятностью поражения элементарной цели [9], вероятность $P_{\omega_{ij}}^{\mathrm{cov}} = p\left(\omega_{ij} \mid \theta\right)$ можно охарактеризовать координатным законом (рис. 3), получаемым с помощью имитационного моделирования методом Монте-Карло с учетом динамических характеристик траекторного регулятора и габаритов МР.



а) б)

Рисунок 3 – Координатный закон накрытия МР ячеек, расположенных на удалении θ от траектории: (а) – ошибка по углу и боковому отклонению в системе управления движением отсутствует; (б) – ошибки системы управления движением по углу и боковому отклонению распределены по нормальному закону

Аварийной ситуацией считается столкновения в момент времени t столкновение с препятствием k, которое занимает подмножество $\mathrm{O}_k \subset \Omega_h$ [10]:

$$\mathrm{O}_k \cap A_r \neq \varnothing, \forall t \in [0, T] \tag{4}$$

Следовательно, вероятность столкновения МР с препятствием в момент времени *t* при горизонте прогноза δ с учетом (5) и (6) можно вычислить как:

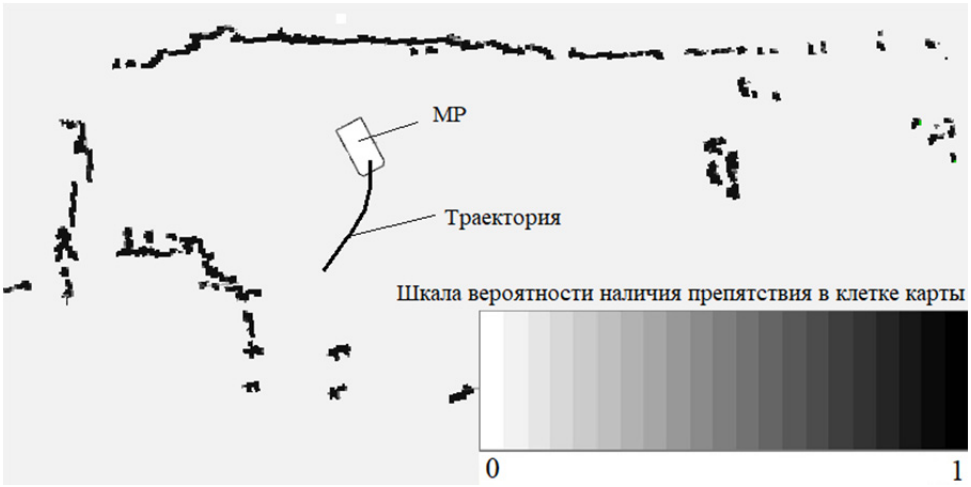
$$P(\tau \le t \le \tau + \delta) = \max_{A_r}\left(p\left(\omega_{ij} \mid \theta\right) \cdot p\left(t, \omega_{ij}\right)\right) \tag{5}$$

Предотвращение аварийной ситуации

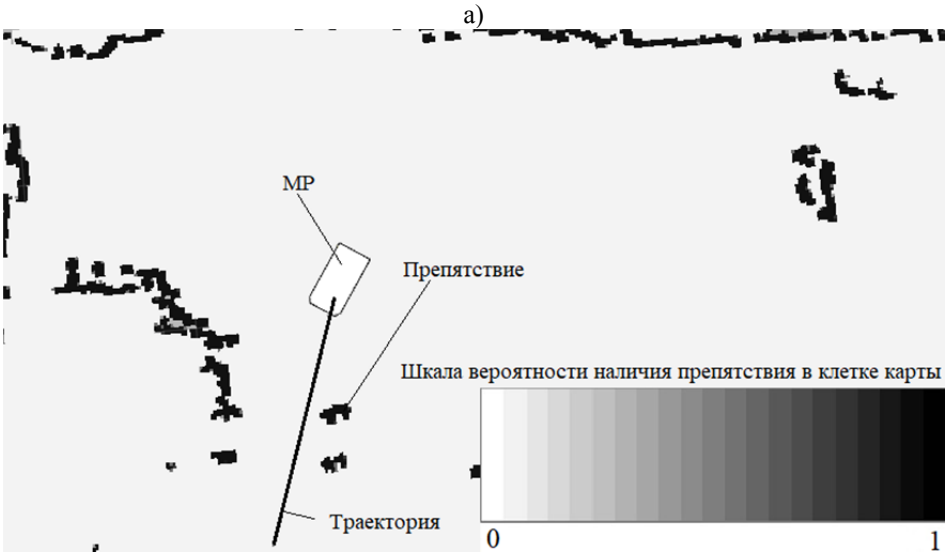
Для демонстрации работы разработанной подсистемы обеспечения безаварийного движения МР был проведен эксперимент на имитационной модели, в котором выполнялось движение мобильного робота в заданную оператором целевую точку в среде с препятствиями. При выполнении движения МР по траектории блок «Модуль безопасности» выполняет анализ результирующего слоя карты $\mathcal{L}_0\left(\Omega_h, cl\right)$, заполненного значениями из (1), и построение карты вероятностей нахождения препятствий $\mathcal{P}\left(\Omega_h, cl\right)$ по формуле (2). При поступлении спланированной траектории в модуль безопасности блок вычисляет вероятность накрытия мобильным роботом клеток расширенной области A_r по формуле (3) и, в итоге, оценивает вероятность столкновения по формуле (4).

Результаты эксперимента представлены на рис. 4. Начало движения МР (рис. 4а) соответствует точке 1 на графике изменения вероятности столкновения (рис. 4е) и происходит в свободной от препятствий зоне, поэтому вероятность столкновения не превышает 0,05. После прохождения траектории МР останавливается, вероятность столкновения при этом снижается до нуля (точка 2 на графике изменения вероятности столкновения, показанном на рис. 4е). Затем МР получает новую целевую точку, до которой выполняется построение новой траектории движения. Построенная траектория оказывается вблизи препятствия (рис. 4б) и вероятность столкновения при этом превышает допустимый предел $P_{\max} = 0,6$, что соответствует точке 3 на графике (рис. 4е). Блок «Мо-

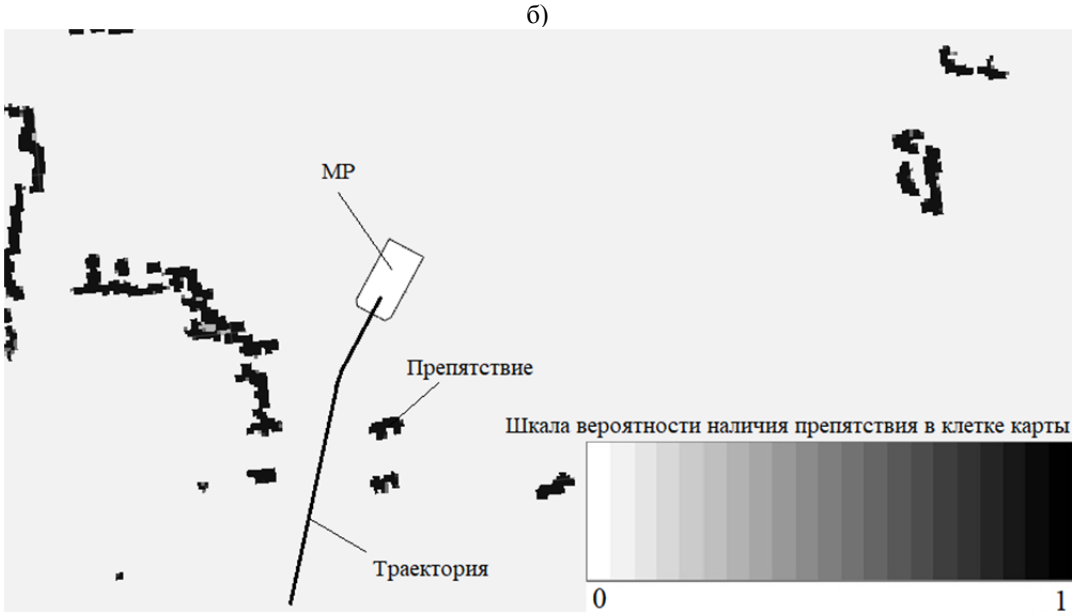
дуль безопасности» соответствующим сигналом сообщает об опасности траектории и «Управление автодвижением» отменяет построенную траекторию и запускает построение новой, которая является более безопасной (рис. 4в).



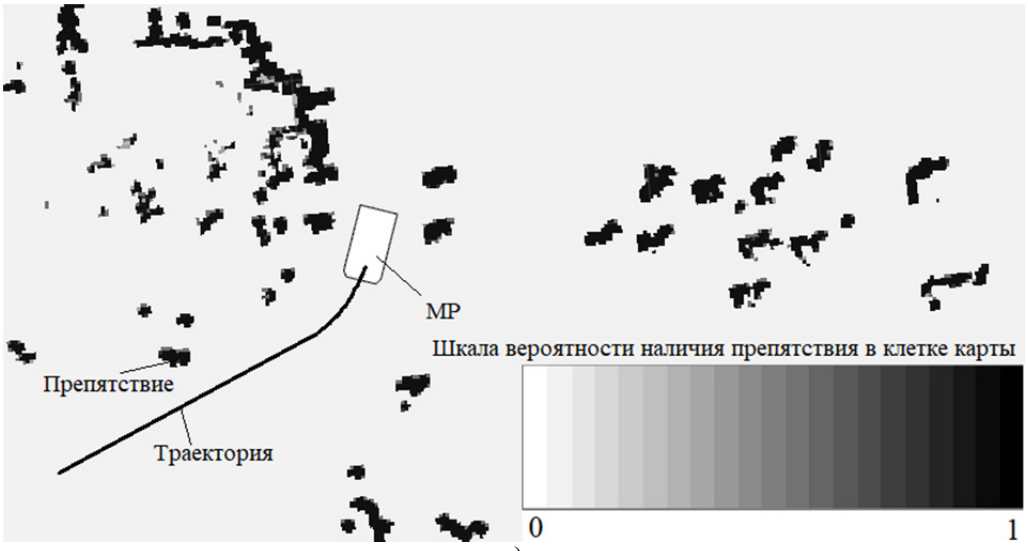
а)



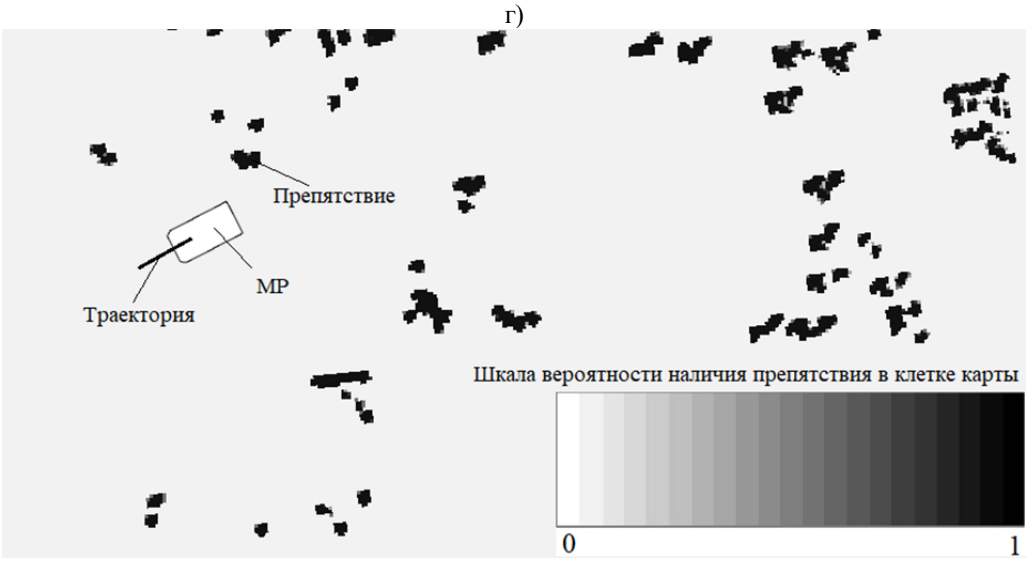
б)



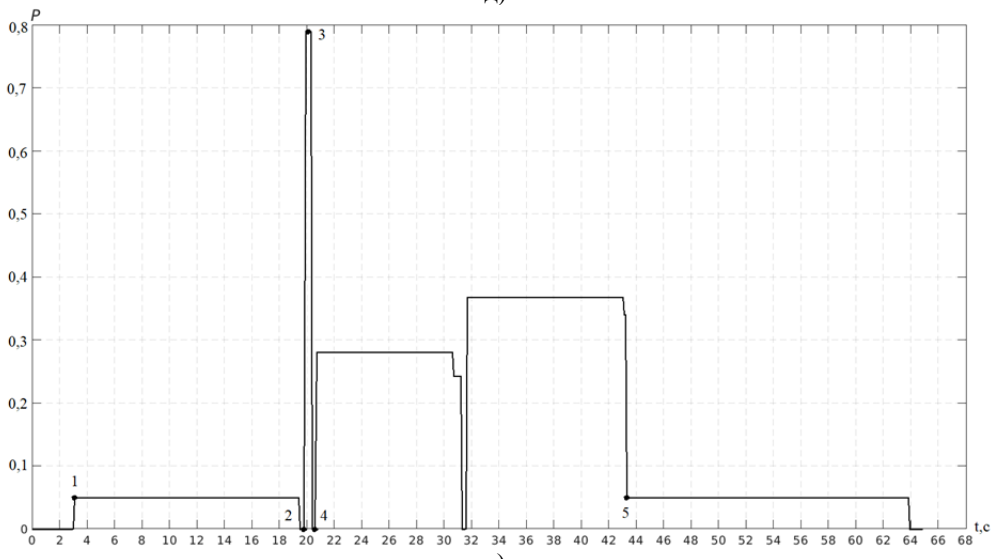
в)



г)



д)



е)

Рисунок 4 – Результаты модельного эксперимента

Стоит отметить, что в случае, когда траектория лежит на небольшом расстоянии от препятствия (рис. 4г), но при этом вероятность столкновения не превышает предельного значения, и МР имеет возможность выполнить движение без столкновения, то после прохождения зоны рядом с препятствием (рис. 4д) вероятность столкновения уменьшается, что соответствует точке 5 на графике изменения вероятности (рис. 4е).

Представленная подсистема, являющаяся составной частью системы управления движением, позволяет избегать мобильному роботу столкновений с находящимися в зоне его перемещения препятствиями. Многослойная карта за счет периодического обновления и учета изменений во внешней среде позволяет выполнять роботу движение как по заранее известным, так и неизвестным участкам местности. При оценивании вероятности накрытия определенной области мобильным роботом учитывается не только поведение внешних объектов, но и динамические характеристики самого робота. Выделение области возможных перемещений и её дискретизация позволяет для вычисления вероятности столкновения по формуле (5) ограничиться известными значениями вероятности наличия препятствия в определенной клетке из карты $\mathcal{P}(\Omega_h, cl)$ и вероятности накрытия МР этой клетки. Предложенный подход позволяет осуществлять оперативное реагирование на динамические препятствия и предотвращать возможные столкновения с ними при движении МР по спланированной траектории.

Литература

1. Liu S.B. and etc. Provably Safe Motion of mobile robots in human environments // International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS-2017), 2017.

2. Adam S., Larsen M., Jensen K., Schultz U.P. Rule-based dynamic safety monitoring for mobile robots // Journal of software Engineering, 2016, Vol. 7, P. 120 –141.

3. Hafez O.A., Arana G.D., Spenko M. Integrity risk-based model predictive control for mobile robots // 2019 International conference on Robotics and Automation (ICRA), Montreal, Canada, 2019, P. 5793-5799.

4. Gill J.S, Pisu P., Krovi V.N., Schmid M.J. Behavior identification and prediction for a probabilistic risk framework // arXiv:1905.08332v1, 20 May 2019.

5. Blake A. et al. FPR – Fast path risk algorithm to evaluate collision probability, 2019.

6. Gindele, T., Brechtel, S., and Dillmann, R. A probabilistic model for estimating driver behaviors and vehicle trajectories in traffic environments. In Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2010 13th International IEEE Conference on, IEEE, pp. 1625–1631.

7. Кузнецов А.В. Модели движения, взаимодействия и сети связи мобильных агентов в иерархических системах на основе клеточных автоматов // дисс. Доктора физ.-мат. Наук … 05.13.01 / место защиты г. Воронеж, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», 2019, 268 с.

8. Freda L. and etc. 3D Multi-robot patrolling with two-level coordination strategy // Autonomous Robots, 2019, vol. 43, pp. 1747 – 1779.

9. Буравлев А.И. К вопросу определения приведенной зоны поражения объектов // Вооружение и экономика, 2018, № 2(44), С. 11 – 16.

10.Rios-Martinez J., Spalanzani A. and Laugier C. Understanding human interaction for probabilistic autonomous navigation using Risk-RRT approach. IEEE Int. Conf. IROS, 2014–2019, 2011.

А.Г. Почежерцев, А.В. Васильев, В.М. Копылов, И.В. Шардыко

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНЫХ ПРИЧИН НЕУСТОйЧИВОГО ПОВЕДЕНИЯ КОЛЕСНОГО РТК НА НАКЛОННОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ

ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург,
a.pochezhertsev@rtc.ru, andrey@rtc.ru, v.kopylov@rtc.ru, i.shardyko@rtc.ru

Аннотация

Статья посвящена исследованию проходимости мобильных роботов в критических условиях. В статье рассматривается поведение колесного робототехнического комплекса при движении по наклонной поверхности под углом 35° к горизонтальной плоскости с возникновением ситуаций буксования и опрокидывания. Экспериментально подтверждены сценарии, при которых наблюдаются упомянутые явления нарушения проходимости. С использованием компьютерного моделирования, проводимого на основе экспериментальных данных, изучены закономерности передвижения комплекса в заданных условиях. На основании полученных данных сделаны предположения о причинах подобного поведения комплекса, заключающихся в упругом характере взаимодействия колес с опорной поверхностью. Предложены возможные способы повышения проходимости на основе управления манипулятором РТК и применения демпфирующих движителей. Предполагается дальнейшее развитие методики учета предполагаемых причин нарушения проходимости при проектировании робототехнических комплексов.

Ключевые слова: мобильный робот, опорная проходимость, опрокидывание робота, буксование колёс, компьютерное моделирование.

A.G. Pochezhertsev, A.V. Vasiliev, V.M. Kopylov, I.V. Shardyko

RESEARCH OF POSSIBLE CAUSES OF WHEELED RTC UNSTABLE BEHAVIOR ON AN INCLINED SURFACE BY COMPUTER SIMULATION

Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics Russian Federation,
Saint Petersburg, a.pochezhertsev@rtc.ru, andrey@rtc.ru, v.kopylov@rtc.ru, i.shardyko@rtc.ru

Abstract

The article is devoted to the study of mobile robot patency in critical conditions. The article discusses the behavior of a wheeled robotic complex during moving along an inclined surface at an angle of 35 ° to the horizontal plane with the occurrence of slipping and tipping situations. The scenarios in which the mentioned phenomena of impaired patency are observed are experimentally confirmed. Using computer simulation based on experimental data, the patterns of complex movement under given conditions are studied. Based on the data obtained, assumptions are made about the causes of such complex behavior, consisting in the nature of the elastic interaction of the wheels with the supporting surface. Possible ways to improve cross-country ability based on controlling the RTC manipulator and using damping propulsion devices are proposed. The further development of the methodology for accounting for the alleged causes of traffic violations in the design of robotic systems is expected.

Key words: mobile robot, passability, traversability, tip-over, wheel slippage, computer simulation.

Мобильные роботы получили обширное применение в современном мире: в области инспекции, разведки и ликвидации угроз в опасных для человека условиях, в области напланетных исследований и др. Их применение в значительной мере связано с недетерминированными условиями внешней среды, что естественным образом повышает вероятность провала миссии вследствие потери подвижности робота. Так как цена провала миссии может быть высока, необходимо максимально снизить вероятность неблагоприятного исхода. Одним из путей в данном направлении является исследование ситуаций, в которых возникают затруднения перемещения мобильного РТК [1]. В частности, данные исследования могут быть проведены с использованием экспериментального образца и компьютерной модели.

В данной статье рассматривается поведение колёсного РТК во время испытаний на наклонной сетчатой поверхности, при которых возникли затруднения с преодолением данного препятствия, и

исследование компьютерной модели, построенной на основе видеоряда испытаний РТК и данных телеметрии. Колёсный тип движителя является одним из наиболее распространенных среди существующих РТК [2-4], что позволяет распространить результат данной работы на различные комплексы с аналогичным типом движителей.

В рамках проведения испытаний РТК при движении по аппарели с углом наклона 35° были получены два сценария, далее использованные для построения компьютерной модели РТК и исследования его поведения: сценарий буксования и сценарий опрокидывания назад. Под буксованием понимается отставание линейной скорости перемещения движителя от теоретической скорости, рассчитанной исходя из угловой скорости его вращения [5, 6].

Исследование опрокидывания тесно связно с оценкой такой характеристики, как устойчивость к опрокидыванию. Всё многообразие методов оценки устойчивости к опрокидыванию можно разделить на методы статические и динамические. Первые отличаются от вторых тем, что не учитывают динамические эффекты, такие как движение манипулятора и изменение скорости движения платформы. С точки зрения направления разделяют опрокидывание вперёд, опрокидывание назад и бортовое опрокидывание [7].

Для определения причин опрокидывания необходимо обратиться к существующим методам решения задачи динамической стабилизации. В методах ZMP (Zero Moment Point) [8-11], FA (Force-Angle) [12,13] и MHS [14] используется понятие области устойчивости, или опорного многоугольника. Это многоугольник в горизонтальной плоскости, нахождение характерной точки в котором обеспечивает устойчивость робота. В методах FA и MHS характерной точкой является динамический центр масс, в методе ZMP – точка нулевого момента. Таким образом, опрокидывание робота можно рассматривать как смещение характерной точки за пределы опорного многоугольника.

Построение и описание компьютерной модели

Испытания проводились на шестиколесной мобильной робототехнической платформе, оборудованной шестистепенным манипулятором и полезной нагрузкой, преимущественно размещенной в задней части комплекса. Передняя пара колес жестко закреплена на корпусе. Средние и задние колеса попарно соединены рычажным механизмом, шарнирно прикрепленным к корпусу. Положение центра масс, а также масса и главные моменты инерции комплекса представлены на рис. 1.

Адаптация сценариев испытаний для компьютерной модели осуществлялась при помощи видеоряда, полученного во время испытаний на экспериментальном образце. В частности, из данного видеоряда определялись начальное положение РТК, его скорость и траектория движения. Раскадровка записи для сценария буксования с периодом, равным 1 с, показана на рис. 2, для сценария опрокидывания с периодом 0,5 с – на рис. 3.

Сценарий буксования и сценарий опрокидывания отличаются друг от друга двумя основными параметрами: начальным положением и законом управления, в котором определяется желаемая скорость вращения колёс. По данным телеметрии, снятым во время испытаний, были определены зависимости управляющего сигнала, поступающего с пульта управления, от времени. Данные управляющие сигналы для сценариев буксования и опрокидывания представлены на рис. 4. Значения управляющего сигнала применяются в моделировании при задании крутящего момента на моделях моторов. Для имитации работы электромотора под воздействием управляющего сигнала моделируется механическая характеристика двигателя, график которой представлен на рис. 5. Линейная характеристика ДПТ имеет изменяющийся во времени пологий участок, заданный программно.

Компьютерная модель РТК представлена упрощенной геометрией, включающей лишь ключевые элементы. Модель предполагает следующие особенности:

- сетчатая наклонная поверхность и рисунок протектора колес не упрощаются,
- трение в осях колес не учитывается,
- контакт колес и наклонной поверхности учитывает упругое воздействие с целью имитации пневматических колес,
- учитывается трение в шарнирном соединении рычагов, удерживающих средние и задние колесные пары,
- допустимое отклонение от горизонтали рычагов, удерживающих средние и задние колёса, ограничено величиной в 15°,
- положение шарниров манипулятора считается жестко зафиксированным.

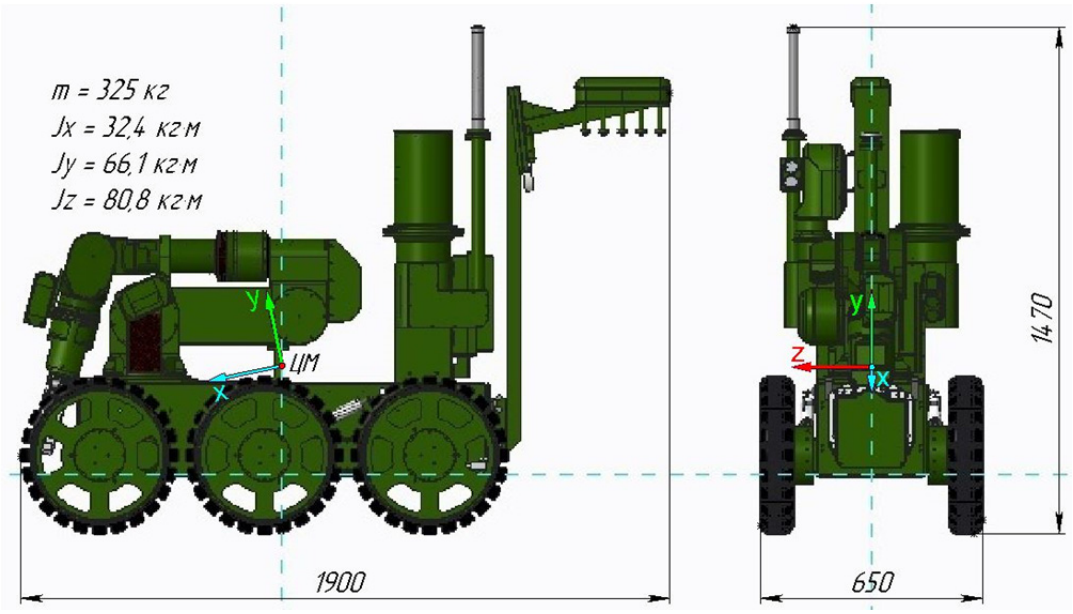


Рисунок 1 – Габаритные размеры и инерционные характеристики модели РТК

Рисунок 2 – Раскадровка записи испытания РТК при буксовании

Рисунок 3 – Раскадровка записи испытания РТК при опрокидывании

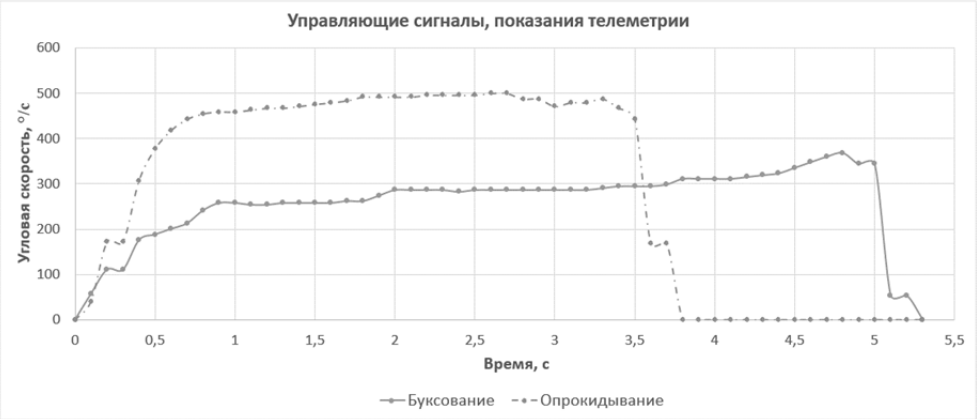


Рисунок 4 – Графики управляющих сигналов

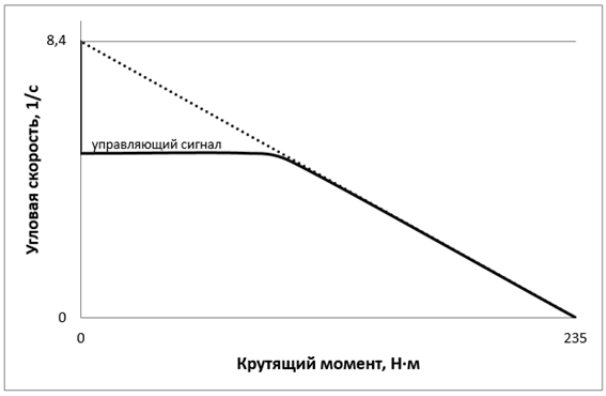


Рисунок 5 – График характеристики моделируемого мотора

Поскольку в данном исследовании значительное внимание уделяется переменному упругому взаимодействию колес и поверхности, было необходимо детально воспроизвести условия эксперимента в плане соответствия формы протектора и рельефа наклонной поверхности. Гладкая поверхность и гладкая форма протектора исключают ряд возможных колебаний, возникающих в процессе моделирования, что приводит к недостоверным показателям сцепления с поверхностью и росту неточности эксперимента.

По аналогичным соображениям устанавливалось допустимое отклонение рычагов – ввиду наличия в экспериментальном образце стопоров, препятствующих отклонению рычага средних и задних колёс, требовалось воспроизвести данное ограничение на модели, которое препятствует недостоверному отклонению. Это наиболее важно в момент начала симуляции, в который среднее колесо находится в подвешенном состоянии согласно сценарию. Это существенно влияет на процесс разгона РТК, распределение нагрузок в колесах и на итог моделирования.

Отсутствие упругого взаимодействия пневматических колес и наклонной поверхности в моделировании приводит к существенному отклонению сценария моделирования от наблюдаемой картины в процессе эксперимента. Ввиду отсутствия подвески как таковой, повышенное демпфирование и жесткость контакта твердых тел приводит к исключению отталкивания колес от поверхности в процессе заезда как фактора, влияющего на итог. Сценарий буксования в таком случае сводится к «скольжению» колес по ребристой поверхности сетки, что не соответствует наблюдениям в ходе эксперимента. Аналогичным образом сценарий опрокидывания сводится в таком случае к «скользящему заезду», в котором ключевую роль играет трение скольжения, а не трение покоя точки соприкосновения колеса и поверхности.

Допущение о жесткой фиксации шарниров обусловлено трудностью получения жесткостных характеристик элементов манипулятора в процессе эксперимента, что не оказывает существенного влияния на ход эксперимента ввиду визуальной неподвижности элементов манипулятора в процессе эксперимента.

Коэффициенты трения контактов между колесами и наклонной поверхностью определялись исходя из наблюдений траектории движения РТК на видеозаписи для двух описанных выше сценариев и проверкой соответствия результатов моделирования наблюдаемой траектории. Несмотря на то, что данный подход не позволяет построить модель, точно повторяющую ситуацию с экспериментальным РТК, он позволяет в первом приближении оценить численные характеристики про-

цессов (такие как скорости колес, крутящие моменты на колесах и положение центра масс), наблюдаемые в ходе эксперимента. Это в свою очередь позволяет строить гипотезы о причинах наблюдаемого поведения РТК в данных сценариях и прогнозировать поведение РТК в других условиях в соответствии с полученными характеристиками.

Следует отметить, что данные телеметрии при испытаниях РТК также включали в себя показатели инклинометра, с периодом опроса 3 с и задержкой до 10 с, что не позволяет достоверно воспроизвести траекторию движения РТК.

Результаты компьютерного моделирования

В рамках данной работы помимо полученных в ходе эксперимента сценариев рассматриваются также два сценария успешного подъема РТК: с помощью смещения центра масс посредством изменения положения манипулятора и благодаря изменению демпфирующих свойств колес. Для данных сценариев использовались значения управляющего сигнала и начальное положение, соответствующие сценарию опрокидывания. Начальные и конечные положения для данных четырех сценариев приведены на рис. 6.

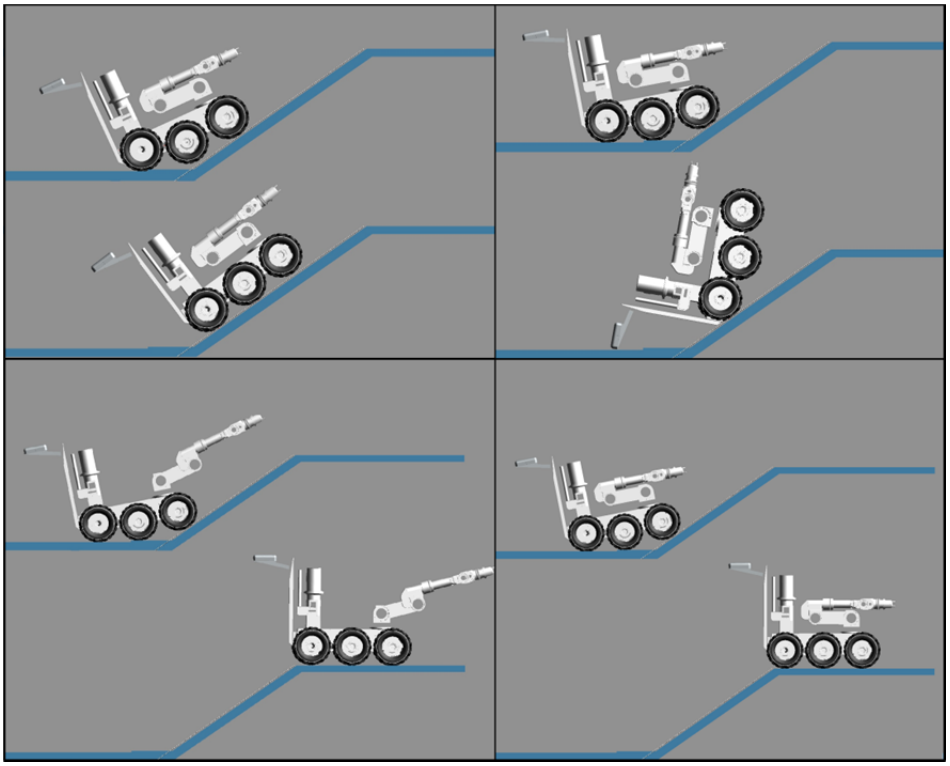


Рисунок 6 – Начальное и конечное положение РТК в сценарии буксования (сверху слева), опрокидывания (сверху справа), успешного подъема с применением манипулятора (снизу слева) и успешного подъема при повышенном демпфировании колес (снизу справа)

Ниже приведены результаты компьютерного моделирования сценария буксования РТК. На рис. 7 приведены графики положения центра масс РТК и угла наклона корпуса, на рис. 8 и 9 - угловых скоростей и крутящих моментов колёсных пар в процессе моделирования.

В ходе данного сценария передняя пара колес испытывает упругий удар о наклонную поверхность и в процессе движения многократно отрывается от поверхности. Подобный процесс также наблюдается на средних и задних колесах, большую часть времени сохраняющих достаточное сцепление с поверхностью, чтобы оставаться на наклонной поверхности, однако не достаточное для успешного заезда. Графики положения центра масс и угла наклона РТК демонстрируют, что в компьютерной модели РТК стремится сохранить свое геометрическое положение на поверхности, и после падения уровня управляющего сигнала (рис. 4, 5 с, график «Буксование») по сценарию начинает скатываться с поверхности. При этом РТК не испытывает существенного отклонения от углового положения в 35°. Графики момента и угловой скорости демонстрируют нестабильное сцепление средних и задних колес с поверхностью и практически постоянный отрыв передних колёс.

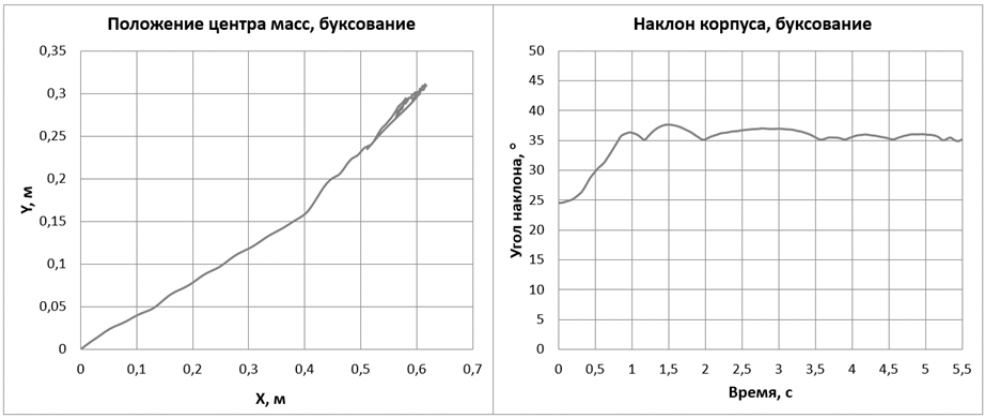


Рисунок 7 – Графики положения центра масс (слева) и угла наклона РТК (справа) в сценарии буксования

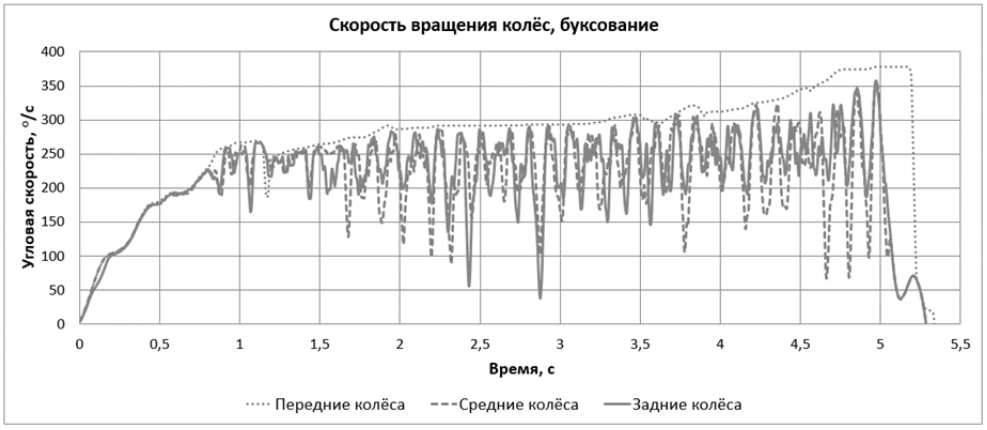


Рисунок 8 – Графики угловых скоростей пар колёс РТК в сценарии буксования

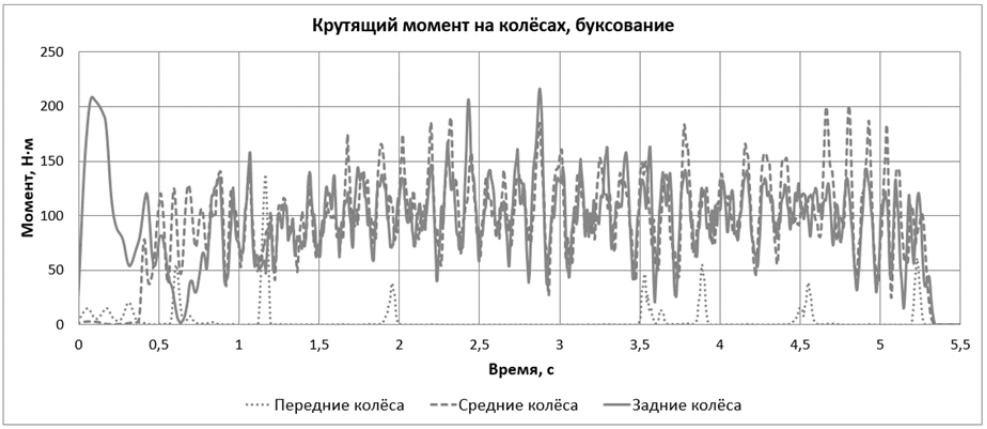


Рисунок 9 – Графики крутящих моментов пар колёс РТК в сценарии буксования

Ниже приведены результаты компьютерного моделирования сценария опрокидывания РТК. На рис. 10 приведены графики положения центра масс и угла наклона корпуса РТК от времени. На рис. 11 и 12 приведены графики угловых скоростей и крутящих моментов колёсных пар.

Аналогично предыдущему сценарию, в ходе данного сценария передняя пара колес испытывает упругий удар о наклонную поверхность, однако после контакта задних колес с наклонной поверхностью контакта передних колес впоследствии не происходит. Удар передних колес о поверхность происходит на большей скорости по сравнению со сценарием буксования, что приводит к большему импульсу силы, отталкивающему передние колеса. Монотонное возрастание графика угла наклона РТК свидетельствует о том, что РТК не испытывал качания перед опрокидыванием. В периоде между 1 и 1.4 с на графиках моментов и скоростей на колесах видны удары, не влияющие на положение РТК на поверхности, что обусловлено шарнирным закреплением колесных пар через рычаг. Таким образом, основной вклад в опрокидывающий момент вносится упругим ударом передних колес. Удары средних и задних колес прекращаются в момент отрыва средних колес от поверхности, что соответствует моменту поворота рычагов закрепления колес на 15°. В этот момент вся нагрузка РТК переходит на задние колеса. После переноса нагрузки на задние колеса (1.4

с) наблюдаются вертикальные колебания РТК на задних колёсах, обусловленные упругим контактом колес и поверхности, что, тем не менее, не влияет на дальнейшее развитие событий в плане опрокидывания РТК.

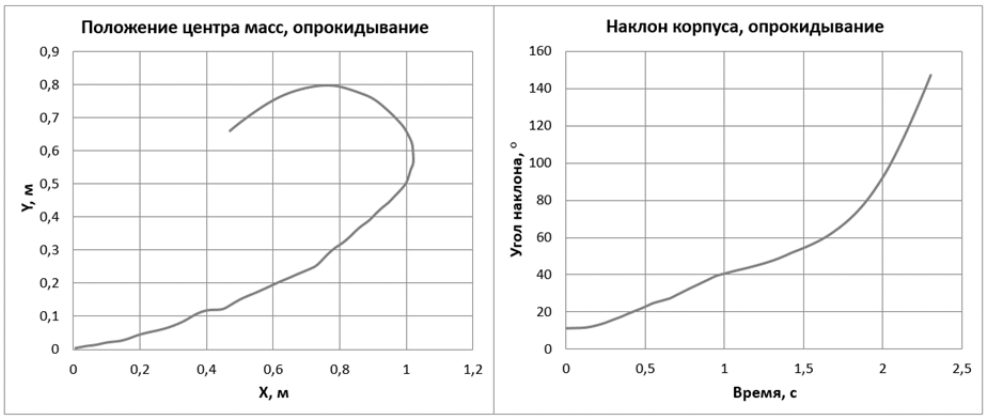


Рисунок 10 – Графики положения центра масс (слева) и угла наклона РТК (справа) в сценарии опрокидывания

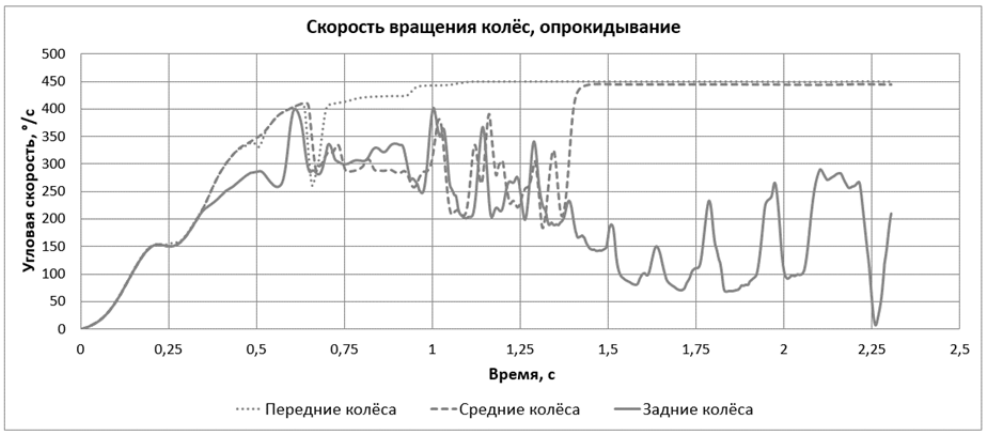


Рисунок 11 – Графики угловых скоростей пар колёс РТК в сценарии опрокидывания

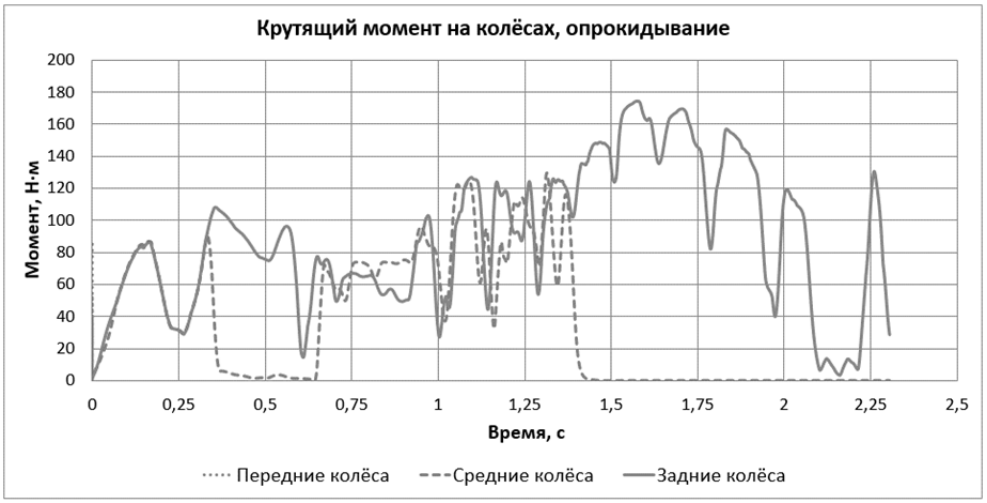


Рисунок 12 – Графики крутящих моментов пар колёс РТК в сценарии опрокидывания

Поскольку РТК оборудован манипулятором, предлагается вариант конфигурации РТК для построения сценария, в котором осуществлен успешный заезд РТК. Повышение устойчивости РТК за счет манипулятора является распространенным подходом и рассматривается в [10,15,16]. Реконфигурация манипулятора приводит к смещению центра масс из исходного положения, изменению моментов инерции РТК и, как следствие, перераспределению нагрузки между колёсами. Смещение центра масс вперед соответствует, с одной стороны, увеличению сцепления колес с поверхностью за счет загрузки передних колёс, которые в обычном сценарии оставались ненагруженными, а с другой стороны, смещению проекции точки нулевого момента от ближайшего к ней

края опорного многоугольника и как следствие повышению устойчивости. В сценарии успешного заезда шарнир между корнем и плечом повернут на 165°, шарнир между плечом и локтем - на 180°. На рис. 13 приведены графики положения центра масс и угла наклона корпуса РТК в данном сценарии. На рис. 14 - графики крутящих моментов колесных пар.

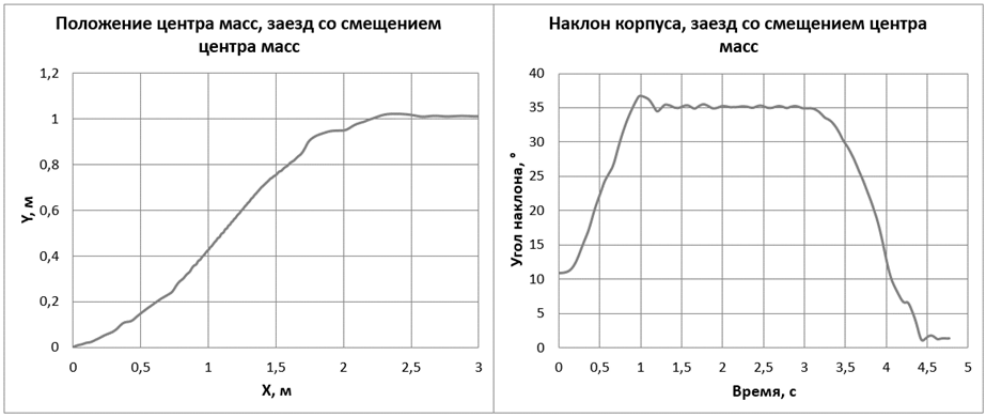


Рисунок 13 – Графики положения центра масс (слева) и угла наклона РТК (справа) в сценарии в сценарии заезда с выдвинутым манипулятором

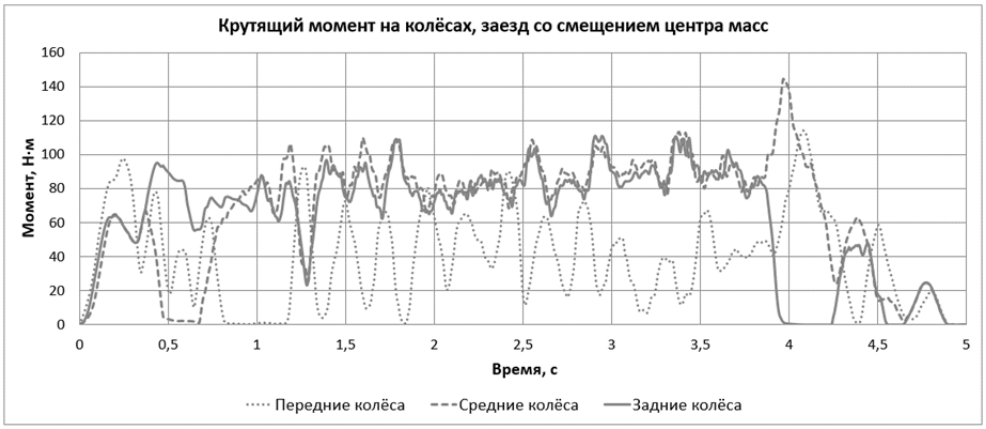


Рисунок 14 – Графики крутящих моментов пар колёс РТК в сценарии заезда с выдвинутым манипулятором

Несмотря на то, что в данной конфигурации сохраняются повторяющиеся упругие удары передних колес о поверхность, удары средних и задних колес существенно меньше по сравнению с предыдущими сценариями. Вклад передних колес, ощутимо больший по сравнению со сценарием буксования, позволяет РТК продвигаться по поверхности, и в верхнем участке поверхности играет ключевую роль в успешном заезде РТК. Поскольку в данной конфигурации центр масс смещен вперед, большая по сравнению с предыдущими сценариями нагрузка приходится на средние колеса, что уменьшает угол, на который РТК отклоняется назад при ударе передними колесами, так что проекция точки нулевого момента не выходит за пределы опорного многоугольника. Таким образом, РТК сохраняет устойчивое положение, сопровождающееся затухающими колебаниями передних колес.

Также сценарий заезда может быть построен на основе модели колес, обеспечивающих большее демпфирование контакта с поверхностью, что может быть обеспечено пористой структурой протектора. По результатам расчета с учетом повышенных показателей демпфирования получены графики положения центра масс и угла наклона корпуса, представленные на рис. 15, и графики крутящих моментов пар колёс, представленные на рис. 16.

В данной конфигурации большая часть нагрузки, как и в случае изначальных сценариев, приходится на средние и задние колеса, передние колеса большую часть времени находятся в отрыве от поверхности. Однако начального удара передними колесами недостаточно для создания импульса, способного вывести РТК из равновесия.

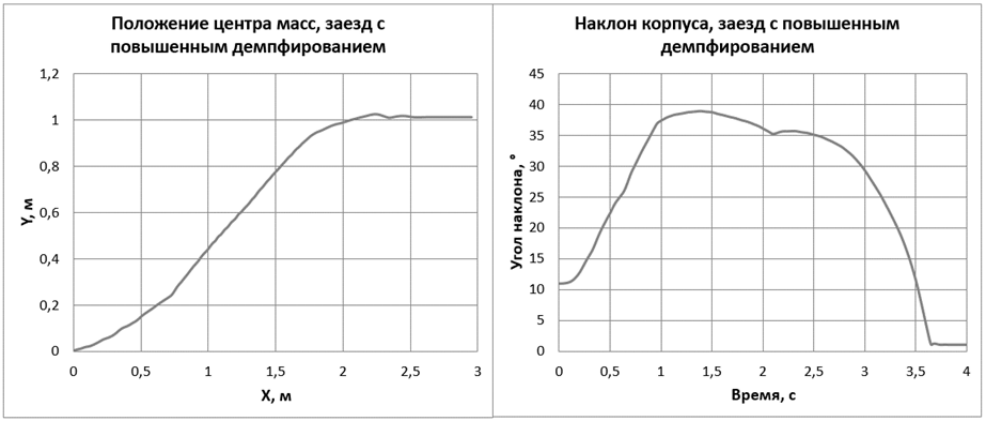


Рисунок 15 – Графики положения центра масс (слева) и угла наклона РТК (справа) в сценарии заезда с повышенным демпфированием контакта колес с поверхностью

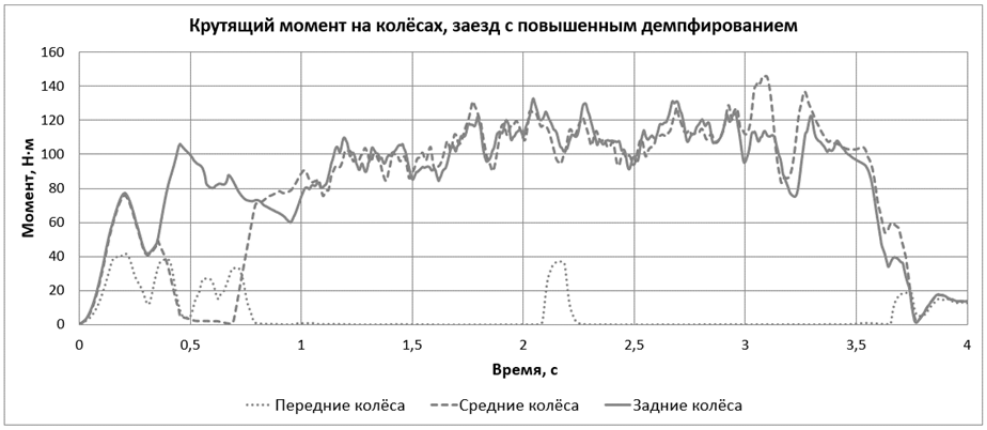


Рисунок 16 – Графики крутящих моментов пар колёс РТК в сценарии заезда с повышенным демпфированием контакта колес с поверхностью

В ходе экспериментального исследования поведения РТК на наклонной плоскости в 35° были получены отрицательные результаты, а именно наблюдались буксование и опрокидывание РТК. Полученные в ходе моделирования результаты позволили сформулировать предположения о природе подобного поведения, заключающейся в упругих ударах колес о наклонную поверхность, что приводит к нарушению сцепления колес с поверхностью и появлению импульса, выводящего точку нулевого момента РТК за пределы опорного многоугольника.

На основе данной теории выдвигаются предложения о снижении негативного воздействия упругих ударов путём перераспределения нагрузки между колесами за счет реконфигурации элементов РТК, в частности манипулятора, и за счет увеличения демпфирующих свойств колес, например, посредством изменения структуры протектора на пористую. Результаты компьютерного моделирования демонстрируют теоретическую эффективность данных решений. Верификация гипотезы и предлагаемых решений требует дополнительных исследований.

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 075-01195-20-00.

Литература

1. Vasiliev A.V., Shardyko I.V. Analysis, detection, reaction and prevention of potential critical situations for light-weight mobile robots // Proceedings of the International Scientific and Technological Conference EXTREME ROBOTICS. – Saint-Petersburg: OOO «Izdatel'sko-poligraficheskii kompleks «Gangut», 2019. – pp. 559-567.

2. Guzman R. et al. Rescuer: Development of a modular chemical, biological, radiological, and nuclear robot for intervention, sampling, and situation awareness //Journal of Field Robotics. – 2016. – Т. 33. – №. 7. – С. 931-945.

3. Varela-Aldás J., Andaluz V. H., Chicaiza F. A. Modelling and control of a mobile manipulator for trajectory tracking //2018 International Conference on Information Systems and Computer Science (INCISCOS). – IEEE, 2018. – С. 69-74.

4. Carius J. et al. Deployment of an autonomous mobile manipulator at MBZIRC //Journal of Field Robotics. – 2018. – Т. 35. – №. 8. – С. 1342-1357

5. Вонг Дж. Теория наземных транспортных средств: пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1982. – 284 с.

6. Планетоходы / А.Л. Кемурджиан, В.В. Громов, И.Ф. Кажукало, М.И. Маленков, В.К. Мишкинюк, В.Н. Петрига, И.И. Розенцеейг; под ред. А.Л. Кемурджиана. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1993. – 400 с.

7. H. Zhang, A. Song. System Centroid Position-based Tipover Stability Enhancement Method for a Tracked Search and Rescue Robot // Advanced Robotics. – 2014. – Volume 28, Issue 23. – pp.1571-1585. – DOI: 10.1080/01691864.2014.976654

8. A Highly Mobile and Dynamic Quadrupedal Robot / M. Hutter, C. Gehring, D. Jud [et al.] // Proceedings of 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). – IEEE, 2016. – DOI: 10.1109/IROS.2016.7758092

9. Mobile Manipulation and Mobility as Manipulation - Design and Algorithms of Robosimian / P. Hebert, M. Bajracharya, J. Ma [et al.] // Journal of Field Robotics. – 2015. – Volume 32, Issue 2. – pp.255-274. – DOI: 10.1002/rob.21566

10.Q. Huang, S. Sugano, I. Kato. Stability Control for a Mobile Manipulator using a Potential Method // Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'94), Munich, Germany, 12-16 Sept. 1994. – IEEE, 1994. – pp.839-846. – DOI: 10.1109/IROS.1994.407542

11.S. Sugano, Q. Huang, I. Kato. Stability Criteria in Controlling Mobile Robotic Systems // Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'93), Yokohama, Japan, 26-30 July 1993. – IEEE, 1993. – pp.832-838. – DOI: 10.1109/IROS.1993.583186

12.E.G. Papadopoulos, D.A. Rey. A New Measure of Tipover Stability Margin for Mobile Manipulators // Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'96), Minneapolis, USA, 22-28 April 1996. – IEEE, 1996. – pp.3111-3116. – DOI: 10.1109/ROBOT.1996.509185

13.E. Papadopoulos, D.A. Rey. The Force-Angle Measure of Tipover Stability Margin for Mobile Manipulators // Vehicle System Dynamics. – 2000. – Volume 33, Issue 1. – pp.29-48. – DOI: 10.1076/0042-3114(200001)33:1;1-5;FT029

14.S. Ali, A. Moosavian, K. Alipour. Stability Evaluation of Mobile Robotic Systems using Moment-Height Measure // Proceedings of 2006 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, Bangkok, Thailand, 1-3 June 2006. – IEEE, 2006. – DOI: 10.1109/RAMECH.2006.252730;

15.K. Skonieczny, S.J. Moreland, D.S. Wettergreen. A Grouser Spacing Equation for determining appropriate geometry of planetary rover wheels // Proceedings of 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Vilamoura, Portugal, 7-12 Oct. 2012. – IEEE, 2012. – pp.5065-5070. – DOI: 10.1109/IROS.2012.6386203

16.Real-time ZMP Compensation Method using Null Motion for Mobile Manipulators / J. Kim, W.K. Chung, Y. Youm, B.H. Lee // Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Washington, USA, 11-15 May 2002). – IEEE, 2002. – DOI: 10.1109/ROBOT.2002.1014829

Д.С. Лавыгин, В.В. Левщанов, В.В. Приходько

ПРОГРАММНЫЙ ИНТЕРФЕЙС ДЛЯ УДАЛЁННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМИ РОБОТАМИ KUKA

Научно-исследовательский технологический институт им. С.П. Капицы Ульяновского государственного университета, Ульяновск, vdm.inbox@gmail.com, vp@ulsu.tech

Аннотация

В статье представлены результаты разработки программного комплекса C3 Bridge Interface для удалённого управления промышленными роботами KUKA. Разработанный программный комплекс состоит из двух приложений, основанных на архитектуре клиент-сервер: C3 Bridge Interface Server и C3 Control Panel. Приложение C3 Bridge Interface Server выполняется совместно с системой управления роботом и интерпретирует удалённые сетевые команды в запросы к сервисной программной подсистеме KUKA Cross 3. Приложение C3 Control Panel используется в качестве клиента для подключения к системе управления по сети. C3 Control Panel содержит инструменты для отображения положения робота, наблюдения за состоянием переменных языка KRL, ручного перемещения робота посредством графического интерфейса или с помощью внешнего устройства ввода (джойстика или игрового контроллера). Элементы авторского программного комплекса совместимы с существующими программными решениями для управления роботами, такими как JOpenShowVar, RoboDK, ROS.

Ключевые слова: KUKA, удалённое управление, программный комплекс, C3 Bridge Interface, C3 Control Panel, KUKAVARPROXY, JOpenShowVar, RoboDK, ROS, внешняя система управления.

D.S. Lavygin, V.V. Levshchanov, V.V. Prikhodko

SOFTWARE INTERFACE FOR REMOTE CONTROL OF KUKA INDUSTRIAL ROBOTS

S.P. Kapitsa Research Institute of Technology of Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, Russia, vdm.inbox@gmail.com, vp@ulsu.tech

Abstract

The paper presents the results of the development of a C3 Bridge Interface software package for remote control of KUKA industrial robots. The software package consists of two applications based on the client-server architecture: C3 Bridge Interface Server and C3 Control Panel. The C3 Bridge Interface Server application runs together with the robot control system and interprets remote network commands into requests to the KUKA Cross 3 service software subsystem. The C3 Control Panel is used as a client to connect to the control system over a network. It provides tools to display the robot's position, monitor the status of KRL language variables, manually move the robot via a GUI or by means of an external input device (a joystick or a game controller). The software modules presented are compatible with the existing state-of-the-art software solutions such as JOpenShowVar, RoboDK, ROS.

Key words: KUKA, remote control, software package, C3 Bridge Interface, C3 Control Panel, KUKAVARPROXY, JOpenShowVar, RoboDK, ROS, external control system.

Промышленные роботы-манипуляторы фирмы KUKA предназначены для выполнения технологических операций по предварительно написанной программе на специальном языке KRL [1]. Программа робота может проверять наличие внешних управляющих сигналов и, в зависимости от их состояния, переходить на заданные ветви алгоритма. Однако контроль выполнения программы и состояния системы управления роботом осуществляет оператор с помощью штатного пульта управления KUKA smartPAD, что вынуждает оператора находиться в непосредственной близости от технологической линии.

При решении исследовательских задач, где направление и характер движения робота не могут быть определены заранее, применение промышленных роботов-манипуляторов KUKA затруднено. Основной технической проблемой в этом случае является задача внешнего (удалённого) контроля положения робота и состояния системы управления.

Исследовательские задачи предполагают возможность большего контроля при управлении роботом: с выбором режимов перемещения отдельных узлов, параметров ускорения, замедления и

скорости перемещения. В то же время, в промышленных применениях наиболее важными являются требования безопасности и простоты управления для оператора робота, которые обеспечиваются штатной системой управления. В случае с промышленными роботами фирмы KUKA, штатная система управления является закрытой и не предоставляет открытых и документированных программных интерфейсов для удалённого управления.

Для решения задачи удалённого управления такой системой в настоящей работе проведено углубленное исследование её внутренней структуры.

Структура системы управления KUKA KR C4

В основе аппаратно-программной структуры системы управления KR C4 лежит IBM PC-совместимый двухъядерный компьютер, который работает под управлением двух операционных систем одновременно: Wind River Systems VxWorks и Microsoft Windows Embedded Standard 7 (WES7). Каждая операционная система выполняется независимо на своём ядре процессора, разделяя общую оперативную память [2].

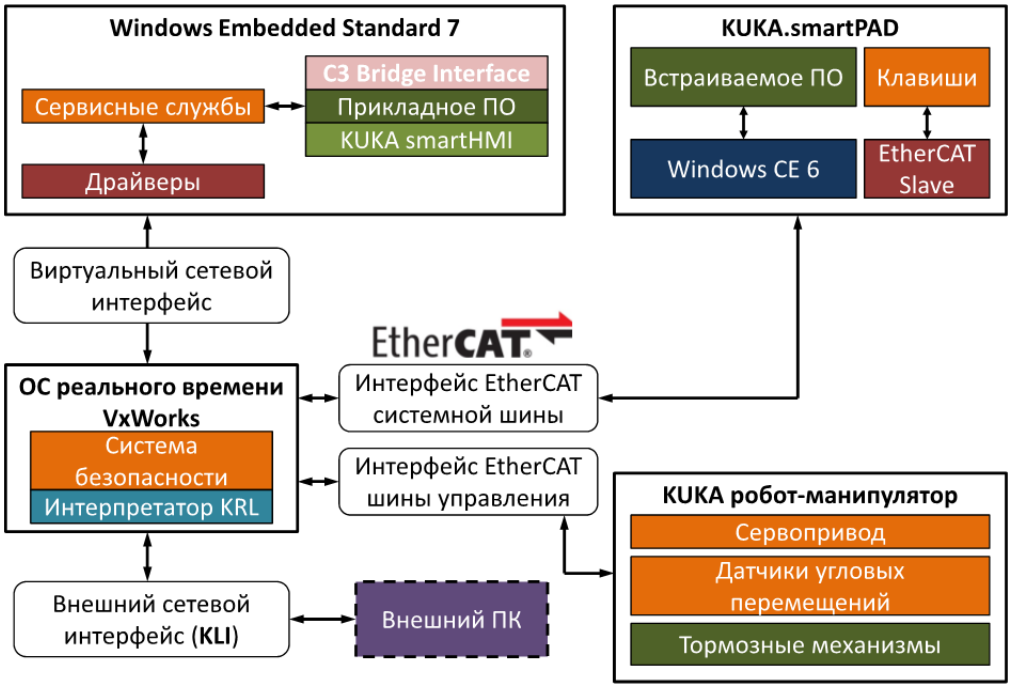


Рисунок 1 – Аппаратно-программная структура системы управления KUKA KR C4

Управление аппаратной частью робота осуществляется операционной системой реального времени VxWorks, которая обеспечивает функционирование промышленной сети EtherCAT, реализует программные механизмы безопасности и обрабатывает синтаксис языка KRL. Таким образом, интерпретатор языка KRL является системной составляющей робота, работающей в режиме реального времени (рис. 1).

Операционная система Windows Embedded Standard 7 выполняет ряд служебных и прикладных программных задач. К служебным задачам относятся начальная загрузка компьютера системы управления, выделение адресного пространства и аппаратных ресурсов для последующей загрузки второй операционной системы VxWorks, а также обеспечение программного взаимодействия между VxWorks и приложениями внутри Windows. Прикладные программные задачи WES7 включают в себя отображение графического интерфейса пользователя smartHMI и предоставление сервиса удалённого рабочего стола (RDP) для устройства KUKA.smartPAD.

Пульт управления KUKA.smartPAD выполняет функции устройства ввода/вывода информации для локального управления роботом в непосредственной близости от него. Его функционирование обеспечивается двумя аппаратно-программными техническими решениями:

1. основная аппаратная платформа на основе процессора Freescale ARM1136-MX31 под управлением встраиваемой операционной системы Microsoft Windows CE 6.0 для отображения графического интерфейса пользователя и связи с системой управления по протоколу RDP;
2. служебная аппаратная платформа, реализующая промышленный сетевой интерфейс EtherCAT в режиме подчиненного устройства («slave») для обеспечения безопасности при управлении роботом в ручном режиме.

При наличии правильно настроенной системы безопасности управление роботом допускает автономную работу без подключения пульта управления KUKA.smartPAD, поэтому в задачах удалённого управления это устройство играет вспомогательную роль и необходимо только для перевода робота в автономный режим после включения питания.

Взаимодействие системы управления с внешними устройствами

Система управления KUKA KR C4 обладает высокой степенью автономности и в базовой комплектации не предоставляет способов для внешнего или удалённого управления роботом. Выполнение любых перемещений и операций в такой системе напрямую связано с исполнением программного кода на языке KRL. Алгоритм KRL-программы может ожидать и учитывать наличие внешних сигналов, в том числе переданных по цифровым шинам от вышестоящих контроллеров промышленной логики. Однако эти возможности ориентированы в большей мере на переключение ветвей алгоритма, описывающих различные виды перемещений к заранее известным точкам.

Для взаимодействия с внешними компьютерными системами существует ряд программных решений:

1. Технологический пакет KUKA.Ethernet KRL;
2. Технологический пакет KUKA.RobotSensorInterface;
3. Программа KUKAVARPROXY.

Технологический пакет KUKA.Ethernet KRL предназначен для обмена данными между KRL-программой и внешними компьютерными системами [3]. Возможности этого программного пакета полностью опираются на алгоритм KRL-программы, в коде которой должны быть отдельно прописаны строки запросов данных из сети или отправки данных в сеть. Технология обмена данными с помощью Ethernet KRL в общем случае не предоставляет способа контроля робота и выхода из аварийных ситуаций. При возникновении нештатных ситуаций (столкновений, перегрузок и т.д.), оператор робота будет вынужден перейти в режим ручного управления и использовать пульт управления KUKA.smartPAD для их решения.

Схожими возможностями обладает фирменный пакет KUKA.RobotSensorInterface [4]. Его основное назначение – точная корректировка траектории в процессе движения робота. Как и Ethernet KRL, работа данного программного пакета опирается на выполняющуюся KRL-программу.

Программа KUKAVARPROXY является сторонним приложением с открытым исходным кодом, разработанным итальянской фирмой IMTS. В отличие от фирменных технологических пакетов KUKA, приложение KUKAVARPROXY встраивается в межпрограммный обмен системы управления и позволяет проводить чтение и запись глобальных переменных языка KRL вне зависимости от того, выполняется ли в данный момент KRL-программа или нет. Обмен с внешней системой управления осуществляется с использованием сетевых технологий общего назначения и собственного бинарного протокола прикладного уровня.

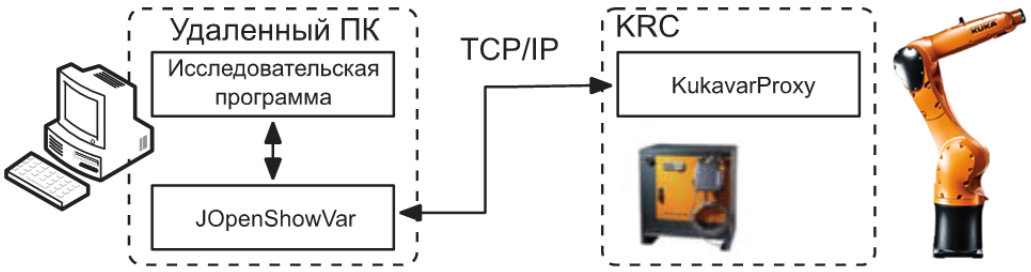


Рисунок 2 – Архитектура сетевого взаимодействия JOpenShowVar и KUKAVARPROXY [5]

На рис. 2 показана архитектура сетевого взаимодействия, в котором KUKAVARPROXY играет роль сетевого сервера, ожидающего подключения внешних сетевых клиентов. В качестве одного из возможных сетевых клиентов авторы [5, 6] предложили программную библиотеку JOpenShowVar, которая не является законченным программным решением и предназначена для работы в составе программного продукта, который каждый исследователь должен разработать самостоятельно.

Механизм работы и особенности KUKAVARPROXY

Исследование принципов работы KUKAVARPROXY показало, что в основе функционирования данной программы лежит использование объектной модели компонентов (COM) – программной технологии операционной системы Microsoft Windows для осуществления взаимодействия

между процессами системы [7]. Аналогичный подход был ранее использован в работе французского исследователя Paul Chavent [8, 9] для реализации удалённого управления роботами KUKA, основанными на системах управления KR C1.

С помощью объектной модели компонентов могут быть вызваны сервисные функции внутренней подсистемы KUKA Cross 3, которые позволяют не только считывать и записывать переменные языка KRL, но и следить за наличием ошибок выполнения, выполнять или останавливать KRL-программу, выполнять ручные перемещения робота без запуска KRL-программы и т.д. К сожалению, большая часть этих сервисных функций не была реализована авторами KUKAVARPROXY, а само приложение опирается на устаревшие технические средства. В частности, программа KUKAVARPROXY разработана с использованием устаревшей версии Microsoft Visual Basic 1998 года. Эта среда разработки не поддерживается в современных операционных системах и не имеет современных аналогов, позволяющих перенести программный код на новую платформу. Запуск старых программ, разработанных в этой среде, требует от оператора системы управления навыков по установке и регистрации специальных программных компонентов (COM и OLE объектов).

Преимущества программного комплекса C3 Bridge Interface

Для преодоления недостатков KUKAVARPROXY и реализации всех функциональных возможностей подсистемы KUKA Cross 3 был создан новый программный комплекс – C3 Bridge Interface, состоящий из серверной части (C3 Bridge Interface Server) и клиентской части (C3 Control Panel).

Программа C3 Bridge Interface Server выполняется на стороне системы управления и осуществляет взаимодействие с программными подсистемами KUKA (рис. 3).

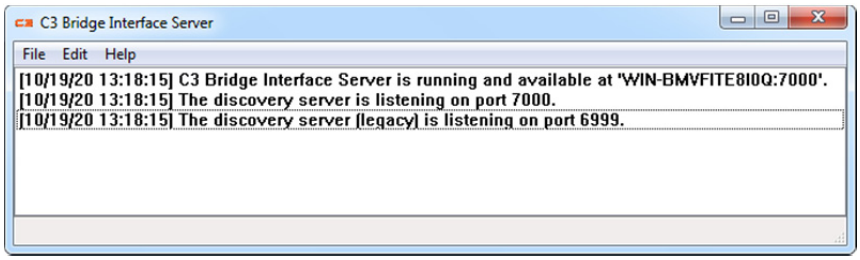


Рисунок 3 – Внешний вид главного окна программы C3 Bridge Interface Server

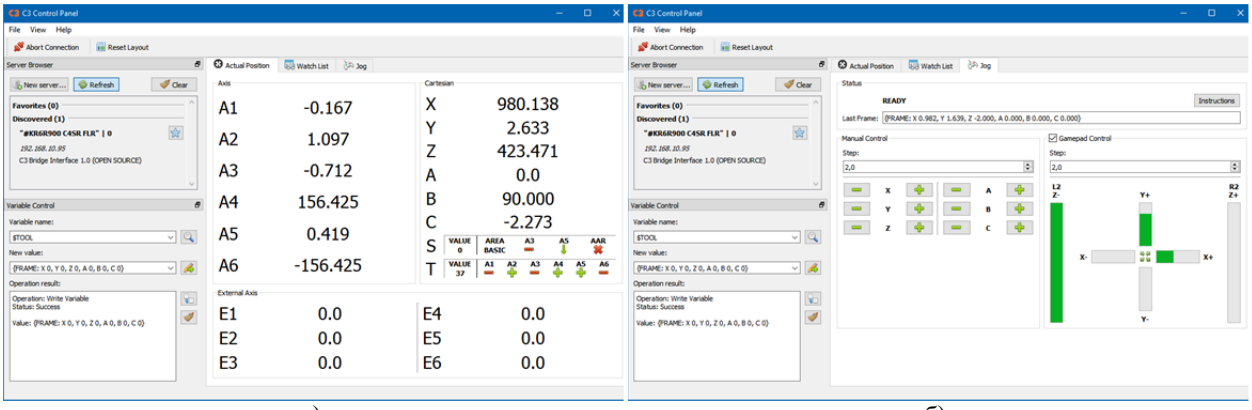
Отличительными особенностями данной программы являются:

1. полная совместимость с KUKAVARPROXY на уровне прикладного протокола, что позволяет использовать новый программный продукт с уже имеющимися сторонними клиентскими программными решениями, такими как JOpenShowVar, RoboDK [10] или ROS [11];
2. открытый исходный код [12] и полная документация на прикладной протокол [13];
3. большое количество реализованных функций подсистемы KUKA Cross 3 с возможностью последующего расширения списка поддерживаемых возможностей;
4. возможность управлять ходом выполнения KRL-программы и контролировать состояние робота в любой момент времени;
5. высокое быстродействие за счёт программной реализации в среде разработки Microsoft Visual C++ с возможностью сборки компиляторами фирмы Microsoft начиная с версии Visual C++ 6.0 и выше;
6. отсутствие необходимости в установке дополнительных программных модулей и возможность запуска на старых системах KR C1 под управлением Windows 95;
7. отсутствие ограничений на количество одновременных сетевых подключений и время подключения в режиме простоя;
8. наличие поискового протокола (Discovery Protocol) для обнаружения систем управления роботами в сети.

Для подтверждения корректности функционирования создаваемого программного продукта, была разработана программа «Панель управления KUKA» (C3 Control Panel) [14], позволяющая выводить координаты текущего положения робота (рис. 4а) и управлять перемещением отдельных осей (рис. 4б).

Программа C3 Control Panel написана с использованием программных библиотек Qt [15] и может быть запущена в системах Microsoft Windows XP SP3 и выше, Linux и Mac OS X.

C3 Control Panel распространяется бесплатно (freeware).



а) б)

Рисунок 4 – Внешний вид главного окна программы C3 Control Panel: а) в режиме отображения текущей позиции; б) в режиме ручного управления с помощью джойстика

В результате проведенного исследования программно-аппаратной архитектуры промышленных роботов Kuka разработан программный комплекс C3 Bridge Interface для удалённого управления роботами. Исследования позволили сделать вывод о необходимости дальнейшего совершенствования специализированных программных интерфейсов: существующие программные решения обладают рядом ограничений, которые могут быть преодолены путём создания новых программных продуктов с применением современных методов и инструментов прикладного и системного программирования.

Литература

1. KUKA System Software 8.3. Operating and Programming Instructions for System Integrators. Version KSS 8.3 SI V3 en. KUKA Roboter GmbH. – 2014.

2. VxWin. Add Windows XP functionality to VxWorks on single or multicore CPUs. VxWin White Paper JN 23058. KUKA Roboter GmbH. – 2008.

3. KUKA.Ethernet KRL 3.0. For KUKA System Software 8.5. Version KST Ethernet KRL 3.0 V3. KUKA Roboter GmbH. – 2017.

4. KUKA.RobotSensorInterface 3.1. For KUKA System Software 8.2. Version KST RSI 3.1 V1 en. KUKA Roboter GmbH. – 2010.

5. Sanfilippo F., JOpenShowVar: an Open-Source Cross-Platform Communication Interface to Kuka Robots / L.I. Hatledal, H. Zhang, M. Fago, K.Y. Pettersen // Proceeding of the IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA). Hailar, China. – 2014. ISBN 978-1-4799-4100-1.

2. Sanfilippo F., Controlling Kuka Industrial Robots: Flexible Communication Interface JOpenShowVar / L.I. Hatledal, H. Zhang, M. Fago, K.Y. Pettersen // IEEE Robotics & Automation Magazine, Vol. 22, Issue 4. – 2015. ISSN 1558-223X.

3. Оберг Р.Д. Технология COM+. Основы и программирование / Роберт Дж. Оберг – Москва: «Вильямс», 2000. – С. 480. – ISBN 0-13-023114-2.

4. Chavent P. Rapport de stage de deuxième annèe [Электронный ресурс] / Paul Chavent. 16 septembre 2003. – Режим доступа: http://paul.chavent.free.fr/kuka/doc/rapport.pdf

5. Une API pour robot Kuka [Электронный ресурс] / Paul Chavent. – Режим доступа: http://paul.chavent.free.fr/kuka.html

6. RoboDK driver for KUKA [Электронный ресурс] / RoboDK. – Режим доступа: https://robodk.com/doc/en/Robots-KUKA-RoboDK-driver-KUKA.html

7. Eriksen I. Setup and Interfacing of a KUKA Robotics Lab / Eriksen Ivar // MSc thesis assignment. – Department of Engineering Cybernetics, Norwegian University of Science and Technology, 2017.

8. C3 Bridge Interface Server [Электронный ресурс] / GitHub. – Режим доступа: https://github.com/ulsu-tech/c3bridge-server

9. Lavygin D., C3 Bridge Interface. Application Protocol Specification. Version 1, Revision 1 / Dmitry Lavygin // S.P. Kapitsa Research Institute of Technology, Ulyanovsk State University. – 2020.

10.C3 Control Panel [Электронный ресурс] / GitHub. – Режим доступа: https://github.com/ulsu-tech/c3bridge-client

11.Бланшет, Ж. Qt 4: Программирование GUI на C++. 2-е дополненное издание / Ж. Бланшет, М. Саммерфилд. — М. : КУДИЦ-ПРЕСС, 2008. — 736 с. — ISBN 978-5-91136-059-7.

А.В. Козов

ДИНАМИЧЕСКАЯ РЕКОНФИГУРАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМИ РОБОТАМИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ГРУППОВОГО ДЕЙСТВИЯ

НУЦ «Робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, alexey.kozov@gmail.com

Аннотация

Статья посвящена вопросу динамической реконфигурации системы управления группой мобильных роботов. Объект управления – группа роботов – рассматривается как иерархическая дискретно-событийная система с переменной структурой. Изменение структуры при работе группы в недетерминированной среде, как правило, требует выполнения динамической реконфигурации системы группового управления. Особенности процесса динамической реконфигурации рассмотрены на примере задачи ликвидации группой роботов пожара в резервуарном парке и выполнения одного из её возможных элементов – выхода группы на заданный рубеж. Представлены модель мобильного робота, спецификация поведения, супервизор и вычислительный граф алгоритма работы системы группового управления. Описана процедура динамической реконфигурации системы при добавлении нового робота в группу. Указаны возможные преимущества и ограничения процедуры динамической реконфигурации.

Ключевые слова: система управления, мобильный робот, супервизорное управление, динамическая реконфигурация, дискретно-событийная система, вычислительный граф.

A.V. Kozov

THE DYNAMIC RECONFIGURATION OF THE CONTROL SYSTEM FOR MOBILE ROBOTS DURING THE EXECUTION OF A GROUP ACTION

Science and Educational Center «Robotics» Bauman Moscow State Technical University, Moscow, alexey.kozov@gmail.com

Abstract

This paper discusses the dynamic reconfiguration of a control system for a group of mobile robots. The group of robots is hierarchical discrete-event system with a variable structure. Change of the system structure during operation in a non-deterministic environment usually requires dynamic reconfiguration of the group control system. Features of the dynamic reconfiguration are considered on the examples of the task of firefighting operation in oil and gas complex by a group of robots and execution of the line reaching group action. The model of mobile robot, behavior specification, supervisor and computational graph for realization of the group control system are presented. The paper describes the procedure for dynamic reconfiguration of the system when adding a new robot to the group and considers advantages and limitations of the dynamic reconfiguration.

Key words: control system, mobile robot, supervisory control, dynamic reconfiguration, discrete-event system, computational graph.

Расширение возможностей и области применения мобильных робототехнических комплексов (МРТК) возможно благодаря объединению автономных роботов-агентов под управлением единой системы группового управления (СГУ). Группа способна более эффективно выполнять задачи по сравнению с несколькими роботами, каждый из которых управляется дистанционно человеком-оператором [1, 2]. Применение МРТК в таких областях, как ликвидация последствий чрезвычайных ситуаций или военное дело, означает, что группа должна действовать в недетерминированной изменяющейся среде в условиях отсутствия или недостоверности априорной информации о ней, что задаёт крайне высокие требования по быстродействию, надёжности, отказоустойчивости, живучести и адаптивности СГУ как ключевого компонента мультиагентной системы. СГУ осуществляет взаимодействие с человеком-оператором, обеспечивает согласование действий агентов и оперативное реагирование на изменение внешней среды. Объективная сложность процессов разработки и реализации такой СГУ является существенным препятствием для практического применения имеющихся теоретических наработок по групповому управлению автономными агентами [3]. Одной из актуальных задач снижения сложности этих процессов является реализация возможно-

сти динамической реконфигурации СГУ при помощи средств автоматизации проектирования. Рассмотрим некоторые особенности динамической реконфигурации СГУ на примере задачи ликвидации пожара в резервуарном парке и выполнения одного из её возможных элементов – выхода группы МРТК на заданный рубеж.

Действия группы роботов как групповая операция

Предполагается, что постановку задачи группе МРТК выполняет человек-оператор при помощи специального программного обеспечения, использующего возможности геоинформационной системы [4, 5]. Задача представляет собой упорядоченную последовательность взаимосвязанных *групповых действий* (элементарных операций), направленных на достижение заданной цели, т.е. человек-оператор организует групповую операцию [6]. Групповое действие состоит из согласованных *индивидуальных действий* МРТК, входящих в подгруппу, а индивидуальные действия представляют собой согласованную работу различных подсистем робота. При выполнении составляющих операцию действий происходит решение информационно-расчётных задач (ИРЗ) на бортовых вычислителях МРТК и компьютерах пункта управления. Примерами ИРЗ являются обработка данных от сенсорных систем, передача и преобразование управляющих команд, сигналов, запуск и прерывание других ИРЗ. На рис. 1 изображена групповая операция по тушению пожара: группа МРТК следует со стартовой позиции 1 по траектории 2 до рубежа 3, где она разделяется на две подгруппы, которые двигаются по траекториям 4, 5 и на рубежах 6, 7 приступают к тушению пожара. Введём следующие ограничения: все допустимые групповые действия определены на этапе проектирования СГУ, а каждая подгруппа в любой момент времени может выполнять только одно групповое действие.

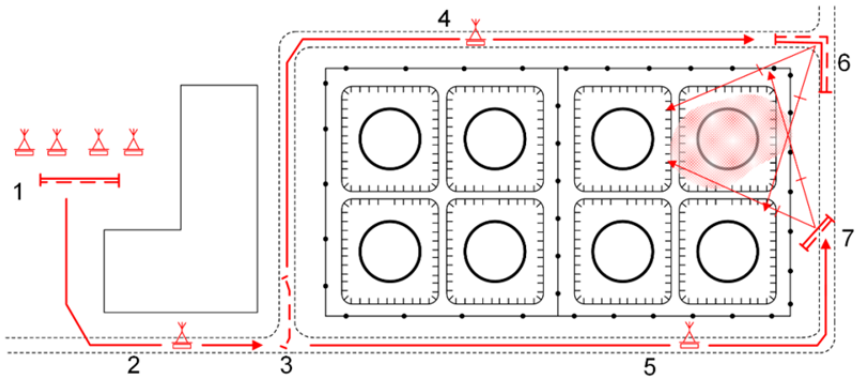


Рисунок 1 – Групповая операция по ликвидации пожара в резервуарном парке: 1 – стартовая позиция роботов; 2, 4, 5 – траектории движения подгрупп; 3 – промежуточный рубеж для разделения на две подгруппы; 6, 7 – рубежи тушения

По функциональному назначению можно выделить следующие уровни СГУ: уровень формирования операции (**А**), уровень управления подгруппой (**Б**), уровень управления единичным роботом (**В**), уровень управления подсистемой МРТК (**Г**), уровень управления исполнительным устройством (**Д**) [3, 7]. Верхние уровни СГУ (**А**, **Б**, **В**) можно рассматривать как дискретно-событийные системы (ДСС), для управления которыми обычно применяют теорию супервизорного управления [8]. Объект управления рассматривают как генератор G некоторого формального языка $L(G)$, а требуемое поведение системы задают при помощи спецификации $K \subseteq L(G)$. Алфавит $L(G)$ составляет множество E событий системы, разделённое на непересекающиеся подмножества E_c, E_u и E_w

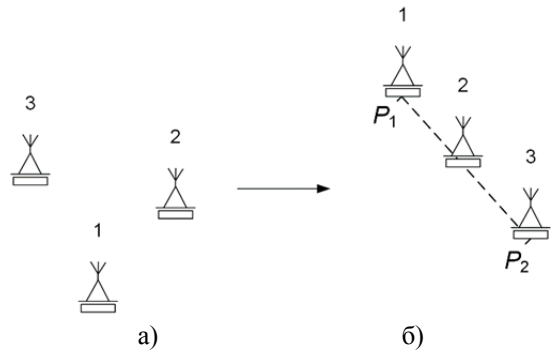
$$E = E_c \cup E_u \cup E_w,$$

где E_c – подмножество управляемых событий (команд), E_u – подмножество неуправляемых событий, момент наступления которых неизвестен, E_w – подмножество ожидаемых событий, являющихся ожидаемой реакцией на команды, но момент наступления которых также неизвестен [9]. По модели объекта управления $L(G)$ и спецификации K можно выполнить синтез супервизора S, задача которого состоит в управлении объектом таким образом, чтобы поведение системы S/G, состоящей из объекта управления и супервизора, соответствовало бы спецификации: $L(S/G) = K$. Если во время функционирования системы происходит изменение спецификации K или структуры объекта управления (языка $L(G)$), то для соблюдения спецификации необходим синтез нового супервизора.

Объект управления на верхних уровнях СГУ в рассматриваемом примере групповой операции обладает переменной структурой, динамически меняющейся во время выполнения операции. Так, на уровне **А** имеющаяся на начало операции группа разделяется на две подгруппы. На уровне **Б** происходит изменение состава подгрупп, а на уровне **В** – смена режимов функционирования («ожидание» – «движение в колонне» – «тушение») и задействованных подсистем каждого МРТК. Изменение недетерминированной среды (например, появление непреодолимого препятствия на заданной человеком-оператором траектории движения подгруппы) может потребовать коррекции спецификации непосредственно во время выполнения групповой операции. Необходимость синтеза нового супервизора в указанных ситуациях означает, что СГУ должна произвести динамическую реконфигурацию собственных подсистем различных уровней во время своего функционирования.

Пример группового действия

Рассмотрим процедуру синтеза супервизора и динамической реконфигурации СГУ уровня **Б** на примере управления выполнением группового действия выхода подгруппы из N МРТК на рубеж (рис. 2). Примем следующие допущения: каждый МРТК подгруппы обладает собственным бортовым вычислителем и модулем связи, которые обеспечивают функционирование компонентов СГУ в общей коммуникационной сети как распределённой системы. Гарантируется согласованность (консистентность) данных и разрешение коллизий при передаче сообщений (команд и сигналов). Для упрощения также предположим, что рассматриваемое групповое действие является единственной функциональной возможностью подгруппы на уровне **Б** СГУ, автономное движение к заданной позиции (индивидуальное действие уровня **В** СГУ) – единственной функциональной возможностью отдельного МРТК, а их выполнение всегда завершается успешно. Указанные допущения позволяют продемонстрировать на методическом примере возможности применения динамической реконфигурации СГУ при изменении структуры объекта управления.



а) б)

Рисунок 2 – Групповое действие «выход на рубеж» подгруппы из $N = 3$ роботов: а) – исходное положение роботов подгруппы; б) – целевое положение

Групповое действие имеет следующее содержательное описание. По команде (сигналу) e_s с уровня **А** 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 на уровень **А** должен быть отправлен сигнал e_f. 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 (рис. 2б). Планирование траектории и движение по ней от стартовой до целевой позиции с учётом ориентации в рамках индивидуального действия выполняет подсистема автономного движения робота. При получении с уровня **Б** сигнала e_s^i робот с номером $i = 1, 2, \dots, N$ начинает автономное движение к позиции P^i и отправляет сигнал e_f^i при достижении целевой позиции. Граф переходов детерминированного конечного автомата работы подсистемы автономного движения -го МРТК представлен на рис. 3, дуги графа переходов взвешены сигналами.

Координаты точек рубежа P_1, P_2 и число МРТК N задают требуемое поведение подгруппы. Определим его через параметризованную спецификацию $K_N = \boldsymbol{K}(X)$, где $\boldsymbol{K}(X)$ – некоторая функция преобразования упорядоченного множества аргументов $X = < N, P_1, P_2 >$ в спецификацию K_N и целевые позиции МРТК P^i, $i = 1, 2, \dots, N$.

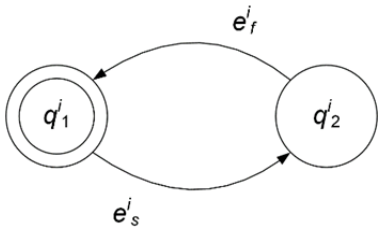


Рисунок 3 – Детерминированный конечный автомат, описывающий поведение подсистемы автономного движения i -го робота: q_1^i – состояние ожидания; q_2^i – состояние выполнения автономного движения; e_s^i – сигнал старта; e_f^i – сигнал завершения

Синтез супервизора для группового действия

Для синтеза супервизора S_N (компонента СГУ уровня **Б**) подгруппы $G_N = < G^1, G^2, \dots, G^N >$ воспользуемся представлением поведения -го МРТК в виде генератора G^i языка $L(G^i)$ (автомата). Алфавитом этого языка является множество $E^i = \{e_s^i, e_f^i\}$, в котором определены подмножество управляемых событий $E_c^i = \{e_s^i\}$, подмножество неуправляемых событий $E_u^i = \emptyset$ и подмножество ожидаемых событий $E_w^i = \{e_s^i\}$. Воспользуемся логической структурой последовательности строк (ЛСПС) для представления поведения ДСС [10]. Каждая строка ЛСПС соответствует простому пути графа переходов автомата и состоит из имён состояний и сигналов, взвешивающих ребра, в порядке их следования в этом пути. Последовательность строк соответствует порядку обхода простых путей в графе переходов и задана стрелками с индексами. Стрелка вверх с индексом k ($\uparrow^k$) – исходящее ребро, заканчивающее простой путь (после события, взвешивающего это ребро), стрелка вниз с индексом k ($\downarrow^k$) – входящее ребро (перед состоянием, в которое входит помеченное стрелкой с тем же индексом исходящее ребро). Индексы стрелок однозначно связывают начало и конец перехода между строками. ЛСПС поведения -го МРТК можно представить одной строкой: $\downarrow^1 q_1^i\ e_s^i\ q_2^i\ e_f^i \uparrow^1$.

Теперь составим спецификацию поведения подгруппы для выполнения группового действия по представленному ранее содержательному описанию. С учётом принятых допущений последовательность сигналов-событий для подгруппы из N роботов должна быть следующей: e_s, e_s^1, e_f^1, e_s^2, e_f^2, …, e_s^N, e_f^N, e_f. Тогда ЛСПС спецификации K_N

$$\downarrow^1 q_1\ e_s\ q_2\ e_s^1\ q_3\ e_s^2\ \dots\ q_{N+1}\ e_s^N\ q_{N+2}\ e_f \uparrow^1,$$

где q_1 означает выполнение действий надсистемой (уровнем **А** СГУ) и соответствует состоянию подгруппы «ожидание сигнала старта», q_2 – «сигнал получен», q_{i+2} – «МРТК № i готов», события из E_w^i опущены, $i = 1, 2, \dots, N$. Примем, например, $N = 2$ и проведём для подгруппы $G_2 =< G^1, G^2 >$ и спецификации K_2 ($\downarrow^1 q_1\ e_s\ q_2\ e_s^1\ q_3\ e_s^2\ q_4\ e_f \uparrow^1$) синтез супервизора S_2 согласно процедуре из [10]. На рис. 4 изображена объединённая сеть Петри синтезированного супервизора S_2 и объекта управления G_2. Позиции сети Петри $p_1, p_2, \dots, p_6$ привязаны к состояниям спецификации и автоматов G^1, G^2, переходы t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6 – к событиям e_s, e_s^1, e_f^1, e_s^2, e_f^2, e_f соответственно [11].

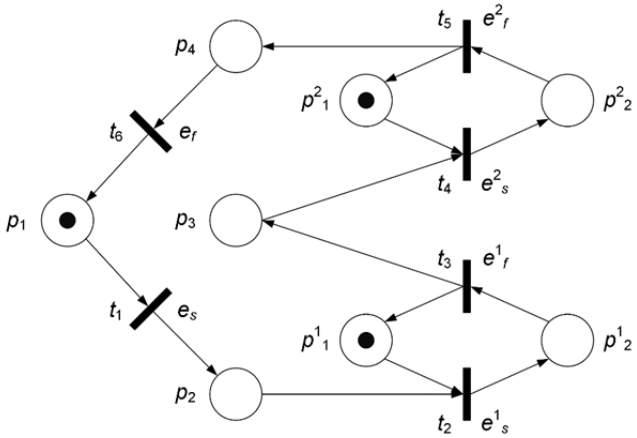


Рисунок 4 – Сеть Петри с управляющими позициями, реализующая управление выходом на рубеж подгруппы из двух роботов, управляющие позиции p_1, p_2, p_3, p_4 соответствуют состояниям q_1, q_2, q_3, q_4 спецификации K_2, позиции p_1^1, p_2^1 – состояниям автомата G^1, позиции p_1^2, p_2^2 – состояниям автомата G^2, для переходов t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6 указаны привязанные события

Объединённая сеть Петри супервизора S_2 и объекта управления G_2 задаёт алгоритм работы системы управления подгруппой из двух МРТК. Программная реализация этого алгоритма как компонента СГУ уровня **Б** обеспечивает требуемое поведение подгруппы. Операторы алгоритма составляют множество $A = \{a_i\}$, $i = 1, 2, \dots, |A|$, где $|A|$ – мощность множества A, и представляют собой решаемые бортовыми вычислителями ИРЗ, включая отправку, получение и обработку сигналов. Множество операторов A и множество дуг $C = \{c_{i,j}\}$, $i = 1, 2, \dots, |A|$, $j = 1, 2, \dots, |A|$, $i \neq j$, определяют вычислительный граф алгоритма $< A, C >$, при этом $c_{i,j} \neq 0$ означает наличие дуги графа $c_{i,j}$ (информационной связи между операторами алгоритма a_i и a_j), а $c_{i,j} = 0$ – её отсутствие. Такой вычислительный граф может быть построен по объединённой сети Петри супервизора и объекта управления. Вычислительный граф алгоритма управления выходом на рубеж подгруппы из двух МРТК представлен на рис. 5.

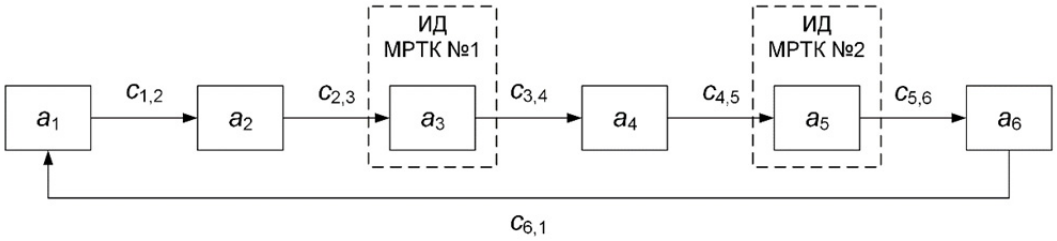


Рисунок 5 – Вычислительный граф алгоритма работы системы группового управления, реализующей управление выходом на рубеж подгруппы из двух роботов, штриховыми прямоугольниками отмечены информационно-расчётные задачи выполнения индивидуальных действий (ИД)

Алгоритм составляют шесть операторов, соответствующих позициям сети Петри: a_1 – ожидание сигнала старта от надсистемы (позиция p_1, состояние q_1 спецификации K_2), a_2 – вычисление P^1, P^2 и отправка сигнала e_s^1 (позиция p_2, состояние q_2), a_3 – запуск ИРЗ автономного движения МРТК №1 к позиции P^1 и ожидание её завершения (позиция p_2^1), a_4 – отправка сигнала e_s^2 (позиция p_3, состояние q_3), a_5 – запуск ИРЗ автономного движения МРТК №2 к позиции P^2 и ожидание её завершения (позиция p_2^2), a_6 – отправка сигнала e_f надсистеме (позиция p_4, состояние q_4). Информационные связи $c_{2,3}$, $c_{3,4}$, $c_{4,5}$, $c_{5,6}$ подразумевают информационный обмен между уровнями **В** и **Б** СГУ (бортовыми вычислителями МРТК и тем узлом вычислительной сети, на котором исполняется программная реализация супервизора), а информационные связи $c_{1,2}$, $c_{6,1}$ – между уровнями **Б** и **А**.

Динамическая реконфигурация системы группового управления

В процессе выполнения рассматриваемого группового действия структура объекта управления может измениться, например, если в подгруппу будет добавлен новый МРТК G^3, обладающий подсистемой автономного движения, которая соответствует описанному ранее автомату (протоколу взаимодействия [12]). В этом случае для изменённого объекта управления $G_2' = G_3 = < G^1, G^2, G^3 >$ необходима генерация спецификации K_3, синтез нового супервизора S_3 и вычислительного графа алгоритма работы СГУ, обеспечивающей выход на рубеж трёх роботов. По вычислительному графу, который будет содержать новые операторы и информационные связи между ними, может быть проведён автоматический синтез программной реализации обновленного компонента СГУ уровня **Б**. После реконфигурации подгруппа сможет продолжить выполнение группового действия. Заметим, протокол взаимодействия с надсистемой при этом не изменится: подгруппа начнёт выполнение группового действия по сигналу e_s и «отчитается» при его завершении отправкой сигнала e_f. Для выполнения описанной процедуры СГУ должна поддерживать возможность замены своих компонентов в процессе функционирования по специальному протоколу реконфигурации. Эту особенность необходимо закладывать в программной архитектуре СГУ ещё на этапе её проектирования.

Альтернативой описанной процедуре динамической реконфигурации является выделение человеком-оператором добавленного МРТК в отдельную группу и организация операции для её выхода на рубеж вблизи рубежа исходной подгруппы. Этот вариант не предполагает взаимодействия между добавляемым МРТК и исходной подгруппой, что в общем случае может привести к выполнению группового действия с меньшей эффективностью.

Таким образом, процесс динамической реконфигурации СГУ при изменении структуры объекта управления (подгруппы МРТК) включает вычисление $\boldsymbol{K}(X)$ для новых аргументов, получение

новой спецификации, а также синтез супервизора и алгоритма работы СГУ в виде соответствующей программной реализации. Описанный подход позволяет повысить эффективность выполнения групповых действий за счёт взаимодействия между членами изменённой подгруппы (эмерджентности системы [6]).

При выполнении групповой операции в недетерминированной изменяющейся среде группа МРТК как объект управления может менять свою структуру, а цели операции могут быть скорректированы человеком-оператором, что обуславливает необходимость динамической реконфигурации СГУ. Динамическая реконфигурация способна повысить эффективность выполнения групповой операции, особенно в случае добавления или перераспределения членов подгрупп. Однако возможность её применения должна быть заложена ещё на этапе проектирования верхних уровней СГУ. Программная архитектура системы должна поддерживать динамическую замену компонентов СГУ, а от проектанта требуется не только разработка правил формирования спецификаций поведения группы $\boldsymbol{K}(X)$, но и проектирование подсистем синтеза супервизора и генерации его программной реализации. Рассмотренные методы представления поведения объекта управления, спецификации и супервизора указывают на потенциал автоматизации указанных проектных процедур при помощи специализированной системы автоматизированного проектирования программно-алгоритмического обеспечения СГУ.

Литература

1 Власов К.С., Тачков А.А., Данилов М.М. Групповое применение наземных робототехнических комплексов при тушении пожаров в резервуарных парках // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования. 2020. № 1. С. 131–136.

2 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.

3 Волосатова Т.М., Козов А.В., Тачков А.А. Система группового управления мобильными роботами с позиций автоматизированного проектирования // Информационные системы. Т. 26, № 5. С. 274–282.

4 Максимов А.А., Тачков А.А., Малыхин А.Ю., Рудианов Н.А. Подход к формализации тактической задачи для группы наземных робототехнических комплексов военного назначения // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2017. № 7–8 (109–110). С. 88–96.

5 Тачков А.А., Козов А.В., Панков С.Е. Транслятор тактической задачи в сеть Петри для группы наземных робототехнических комплексов // Программные продукты и системы. 2018. Т. 31, № 4. С. 728–733.

6 Тачков А.А. Анализ методов группового управления в робототехнических системах // Фундаментально-прикладные проблемы безопасности, живучести, надёжности, устойчивости и эффективности систем. Елец, 2019. С. 401–404.

7 Козов А.В., Волосатова Т.М., Тачков А.А. Направления автоматизации проектирования систем управления группами мобильных роботов // Фундаментально-прикладные проблемы безопасности, живучести, надёжности, устойчивости и эффективности систем. Елец, 2019. С. 335–339.

8 Wonham W.M., Cai K. Supervisory Control of Discrete-Event Systems. Cham: Springer, 2018. 502 с.

9 Амбарцумян А.А. Супервизорное управление структурированными динамическими дискретно-событийными системами // Автоматика и телемеханика. 2009. № 8. С. 156–176.

10 Амбарцумян А.А. Сетецентрическое управление на сетях Петри в структурированной дискретно-событийной системе // Управление большими системами. 2010. Т. 30.1. С. 506–535.

11 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.

12 Апраксин Ю.К. Управление информационным взаимодействием в распределенных технических системах. Конечно-автоматный подход. М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2017. 184 с.

О.В. Кофнов, Б.В. Соколов

ПОСТАНОВКА И МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ДИНАМИЧЕСКОГО ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФУНКЦИЙ ПРИ ГРУППОВОМ УПРАВЛЕНИИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, kofnov@mail.ru

Аннотация

Группа роботов представляет собой сложную организационно-техническую структуру с проактивным управлением. Под проактивным управлением понимается прогнозирование и предупреждение возможных инцидентов в процессе функционирования системы. Основная трудность заключается в многомерности поставленной задачи управления, необходимость многокритериальной оптимизации, что требует значительных вычислительных ресурсов. Решение задачи проактивного управления обеспечивается через моделирование логико-динамических управляемых систем. Логико-динамическое моделирование подразумевает не только моделирование движения роботов, но и моделирование процесса обмена информацией между ними. Разработана новая модификация ранее разработанной авторами вычислительной G-модели, представляющая собой динамический альтернативный системный граф с перестраиваемой структурой, который построен на основе комбинирования математического аппарата сетей Петри с логико-динамическими моделями программного управления движением, каналами, ресурсами, комплексами операций, потоками и структурами группировок активных подвижных объектов. Проблема многомерности решается методом проецирования области допустимых значений параметров системы на двумерные плоскости.

Ключевые слова: робот, управление, многомерность, моделирование, Петри.

O.V. Kofnov, B.V. Sokolov

FORMULATION AND METHODS FOR SOLVING THE PROBLEM OF DYNAMIC REALLOCATION OF FUNCTIONS OF GROUP CONTROL OF ROBOTIC COMPLEXES

St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, kofnov@mail.ru

Abstract

A group of robots is a complex organizational and technical structure with proactive management. Proactive management means the prediction and prevention of possible incidents during the operation of the system. The multidimensionality of this task and the multi-criteria optimization require significant computing resources. The solution of the proactive management problem is provided by modeling of logical-dynamic controlled systems. Logical-dynamic modeling involves not only modeling the movement of robots, but the information exchange modeling between them. The new modification of the G model representation dynamic system with tunable structure alternative graph is developed. This modification is based on Petri nets mathematical apparatus combinations of logical-dynamic models with software motion control, channels, resources, complexes of transactions, flows, and structures of the groups of active mobile objects. The problem of multidimensionality is solved with projections of the acceptable values area of system parameters onto two-dimensional planes.

Key words: robot, management, multidimensionality, modeling, Petri.

В докладе представлены *методологические и методические основы постановки и решения проблем синтеза* программ проактивного управления структурной динамикой робототехнических комплексов (РТК), позволившие с единых позиций подойти к автоматизации процессов мониторинга, многовариантного прогнозирования, управления ресурсами и реконфигурацией РТК. В рамках разработанной методологии управления в качестве базовых была выбрана *концепция комплексного (системного) моделирования РТК*, которая предполагает разработку и реализацию новых принципов, подходов к проведению полимодельного логико-динамического описания различ-

ных вариантов построения и использования РТК, а также разработку и комбинированное использование методов, алгоритмов и методик многокритериального анализа, синтеза и выбора наиболее предпочтительных проактивных управленческих решений (в том числе и ориентированных на их реконфигурацию), связанных с созданием, использованием и развитием рассматриваемых объектов в различных условиях динамически изменяющейся внешней и внутренней обстановок; концепция проактивного управления структурной динамикой РТК в изменяющихся условиях, вызванных воздействием возмущающей среды. Проактивное управление, в отличие от традиционно используемого на практике реактивного управления РТК, ориентированного на оперативное реагирование на уже произошедшие негативные события и недопущение их последующего развития, предполагает упреждающее предотвращение причин возникновения инцидентов за счёт создания (либо целенаправленного поиска) в соответствующие системе проактивного мониторинга и управления новых системно-функциональных резервов, обеспечивающих динамическое формирование принципиально новых возможностей по парированию возможных расчетных и нерасчетных нештатных и аварийных ситуаций, с использованием методологии и технологий системного (комплексного) моделирования, а также многовариантного ситуационно-адаптивного прогнозирования. В докладе представлены конструктивные пути реализации данной концепции на основе построения и использования многомерных аппроксимированных областей достижимости логико-динамических моделей, описывающих рассматриваемую предметную область в пространстве системотехнических параметров [1,2,3]. Еще одной используемой авторами доклада *концепцией является концепция интеллектуализации управления,* предусматривающая в качестве условий эффективного управления РТК (РТК) необходимость применения интеллектуальных инструментов управления (новых интеллектуальных информационных технологий), носящих ярко выраженный инновационный характер и направленных на достижение комплексной интеграции естественного и искусственного интеллектов.

Основные результаты

Для конструктивного решения задач проактивного мониторинга, прогнозирования и управления (в том числе распределения ресурсов и реконфигурации) РТК в проекте разработана новая модификация ранее разработанной авторами вычислительной G-модели, представляющая собой динамический альтернативный системный граф с перестраиваемой структурой, который построен на основе комбинирования математического аппарата сетей Петри с логико-динамическими моделями программного управления движением, каналами, ресурсами, комплексами операций, потоками и структурами группировок активных подвижных объектов. При этом в отличие от существующих поведенческих (сценарных) моделей РТК, базирующихся на конечно-автоматных и имитационных описаниях, предложенный логико-динамический подход позволил на конструктивном уровне решить задачи оперативного структурно-функционального синтеза как облика РТК, так и СУ ими.

На рис. 1 представлена обобщенная структура разработанного специального модельно-алгоритмического обеспечения решения задач проактивного управления РТК.

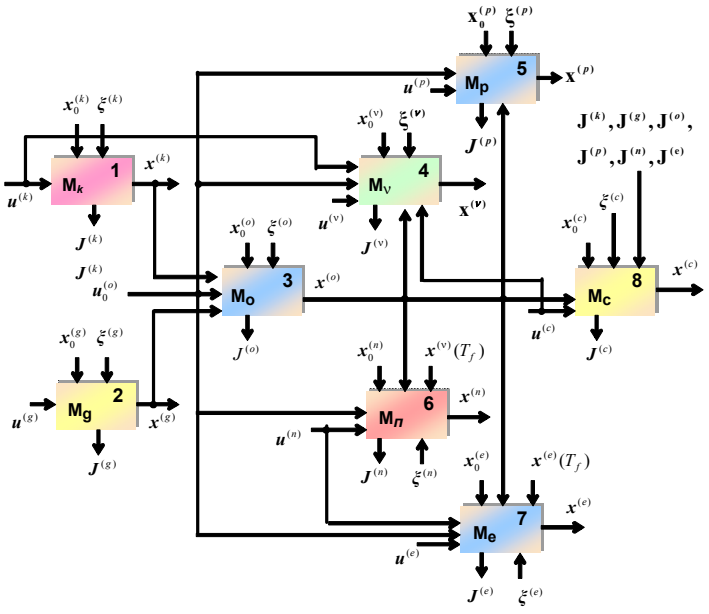


Рисунок 1 – Обобщенная структура и схема взаимодействия моделей управления РТК

На рис. 1 приняты следующие обозначения Mg – динамические модели управления движением РТК; Mk – динамические модели управления каналами РТК; Mo – динамические модели управления операциями в РТК; Mn – динамические модели управления потоками РТК; Mp – динамические модели управления ресурсами РТК; Me – динамические модели управления параметрами операций в РТК; Mc – динамические модели управления структурной динамикой РТК; Mn – динамические модели управления вспомогательными операциями.

Мы предлагаем новый подход, для описания логико-динамических моделей проактивного управления структурной динамикой РТК [1-4]. В отличие от существующих моделей управления сложными динамическими объектами, предполагающих задание логических ограничений с помощью ступенчатых функций в правых частях дифференциальных уравнений, описывающих структурную динамику, мы предлагаем эти ограничения задавать при описании области допустимых управляющих воздействий, добиваясь, чтобы данная область была выпуклой.

В этом случае управляющие воздействия, позволяющие выбирать технологии взаимодействия роботов как друг с другом, так и внешними объектами обслуживания (ОбО), а также расписание их работы принимают крайние (булевы) значения. Это позволяет дискретно-событийную задачу теории расписаний большой размерности решать с использованием методов оптимального управления [1,2]. На сайте лаборатории ЛИТСАМ имеется множество публикаций и проектов, в которых описано как и где используются предложенные логико-динамические модели проактивного управления групповым поведением РТК [4].

Приведем в качестве примера центральную модель из рассмотренного комплекса, структура которого представлена на рис. 1.

Логико-динамическая модель управления операциями взаимодействия (в том числе и измерительно- вычислительными операциями) в РТК (модель Mo) играет координирующую роль в созданном программно-математическом обеспечении:

$$
\begin{aligned}
M_o = \Bigg\{ & \mathbf{u}^{(o)}(t) \mid \dot{x}_{i\gamma}^{(o)} = \sum_{j=1}^{m} r_{ij}(t) \cdot u_{i\gamma\,\mathrm{j}}^{(o)};\ x_{i\gamma}^{(o)}(t_0) = 0, \\
& x_{i\gamma}^{(o)}(t_f) = a_{i\gamma}^{(o)}, \sum_{i=1}^{m} \sum_{\gamma=1}^{s_i} u_{i\gamma\,\mathrm{j}}^{(o)} \le P_j^{(o,1)}, \\
& \sum_{j=1}^{m} \sum_{\gamma=1}^{s_j} u_{i\gamma\,\mathrm{j}}^{(o)} \le P_i^{(o,2)},\ u_{i\gamma\,\mathrm{j}}^{(o)}(t) \in \{0,1\}, \\
& u_{i\gamma\,\mathrm{j}}^{(o)} \left[\sum_{\tilde{\alpha} \in \Gamma_{i\gamma 1}} (a_{i\tilde{\alpha}}^{(o)} - x_{i\tilde{\alpha}}^{(o)}) + \prod_{\tilde{\beta} \in \Gamma_{i\gamma 2}} (a_{i\tilde{\beta}}^{(o)} - x_{i\tilde{\beta}}^{(o)}) \right] = 0, \\
& i, j = 1, \ldots, m;\ i \ne j;\ \gamma = 1, \ldots, s_i \Bigg\},
\end{aligned}
\tag{1}
$$

где $x_{i\gamma}^{(o)}$ — переменная, характеризующая состояние выполнения ОВ $D_\gamma^{(i)}$; $a_\gamma^{(o)}, a_{i\tilde{\alpha}}^{(o)}, a_{i\tilde{\beta}}^{(o)}$ — заданные объёмы выполнения операций $D_\gamma^{(i)}, D_{\tilde{\alpha}}^{(i)}$, $D_{\tilde{\beta}}^{(i)}$; $u_{i\gamma j}^{(o)}(t)$, — управляющее воздействие, $u_{i\gamma j}^{(o)}(t)$ =1, если операция $D_\gamma^{(i)}$ выполняется, $u_{i\gamma j}^{(o)}(t)$=0 — в противоположном случае; $\Gamma_{i\gamma 1}, \Gamma_{i\gamma 2}$ — множество номеров операций взаимодействия, проводимых с объектом B_i, непосредственно предшествующих и технологически связанных с операцией $D_\gamma^{(i)}$ с помощью логических операций «И», «ИЛИ» соответственно; $P_j^{(o,1)}, P_i^{(o,2)}$ — заданные константы, характеризующие технические ограничения, связанные с функционированием РТК в целом; $r_{ij}(t)$ — известная матричная временная функция, с помощью которой задаются пространственно-временные ограничения, связанные с взаимодействием объектов B_i (либо $\overline{B}_k$) с B_j, данная функции принимает значение 1, если B_i попадает в заданную зону взаимодействия B_j; 0 — в противоположном случае.

Показатели качества планирования функционирования РТК

Оценивание качества процессов программного управления операциями и ресурсами РТК можно проводить с использованием различных критериальных (целевых) функций [1-2]. Приведем для примера один из них:

$$J_1^{(o)} = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{m}\sum_{\gamma=1}^{s_i}\{[a_{i\gamma}^{(o)} - x_{i\gamma}^{(o)}(t_f)]^2 + \sum_{j=1}^{m}\int_{t_0}^{t_f}\eta_{i\gamma}(\tau)u_{i\gamma j}^{(o)}(\tau)d\tau\}, i \neq j \qquad (2)$$

где $\eta_{i\gamma}(\tau)$ — известные монотонные функции времени, которые выбираются с учетом заданных директивных сроков начала (конца) выполнения операций взаимодействия (ОВ) объектов обслуживания ОбО с РТК B_i.

Проведенный анализ показал, что в рамках предложенного комплекса моделей группового управления поведением роботов широкое распространение получили идеи динамической декомпозиции, базирующейся на метафорах биоинспирированных подходов, либо агентных технологиях, основанных на организации и проведении аукционов, в рамках которых распределялись ограниченные ресурсы указанных роботов. В докладе предложен принципиально новый вариант динамической декомпозиции задач группового управления РТК, основанный на методе локальных сечений Болтянского В.Г. В этом случае, используя метод локальных сечений, удалось в явном виде получить динамические множители Лагранжа (в качестве которых выступали соответствующие сопряженные переменные). В рамках предложенного варианта алгоритмизации группового управления РТК удалось перейти от исходного класса допустимых импульсных (целочисленных) управлений к расширенному классу, в котором условия релейности управляющих воздействий заменены на интервальные ограничения. Данная особенность позволила на практике при решении разнообразных задач группового управления РТК широко использовать фундаментальные научные результаты современной теории управления.

При многокритериальном анализе поведения РТК неизбежно возникает проблема большой размерности, определяемой количеством параметров, по которым осуществляется оптимизация. Провести такой многомерный анализ можно геометрически, представив область допустимых структурных состояний рассматриваемой системы как некоторое тело в *N*-мерном пространстве, где *N* – количество параметров оптимизации. Однако представить такое тело в многомерном пространстве достаточно сложно. Намного проще работать с двумерными изображениями. Поэтому в данном случае целесообразно использовать известные методы начертательной геометрии. Эти методы успешно применяются в инженерной графике для отражения на плоскости трехмерных объектов. Однако те же самые методы успешно подойдут для визуализации объектов любой размерности. На рис. 2 в качестве примера приведены проекции пятимерного тела на взаимно перпендикулярные плоскости, образованные соответствующими осями координат.

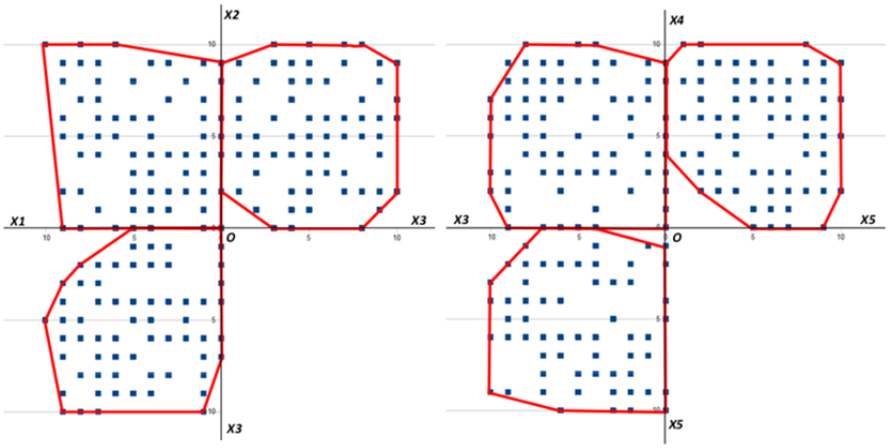


Рисунок 2 – Проекции многомерной области допустимых структурных состояний РТС

Квадратами обозначены рассчитанные точки структурных состояний. Область допустимых состояний всегда выпукла. Благодаря этому свойству можно построить проекции замкнутой границы области. Использование линий проекционной связи между проекциями точки на поверхности позволяет определить координаты всех точек границы области допустимых значений (рис. 3).

Для компьютерной обработки таких областей используются методы выборки из реляционной базы данных и методы обработки цифровых изображений.

Основной научный результат состоит в разработке модельно-алгоритмического обеспечения поиска эталонных (оптимальных) решений в задаче группового управления РТК для различных сценариев их взаимодействия, относительно которых можно уже обоснованно вводить различного

рода эвристики, базируясь на метафорах биоинспирированных подходов, либо агентных технологиях. Конструктивность разработанного модельно-алгоритмического обеспечения была проверена на примере решения задачи динамического перераспределения функций приема, обработки, хранения и передачи данных и информации при групповом управлении РТК космического базирования [1,4].

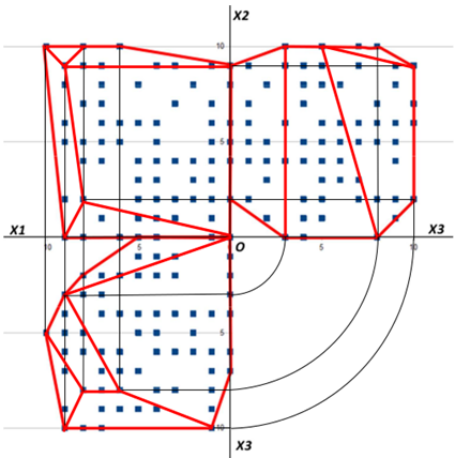


Рисунок 3 – Построение контуров поверхности области с использованием линий проекционной связи

Работа проводилась при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ (№№ 118-07-01272, 18-08-01505, 19–08–00989, 20-08-01046), в рамках бюджетной темы №№0073–2019–0004

Литература

1. Юсупов Р.М., Соколов Б.В., Охтилев М.Ю. Теоретические и технологические основы концепции проактивного мониторинга и управления сложными объектами. // Известия Южного Федерального университета. Технические науки. 2015. №1(162). С. 162–174.

2. Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.

3. Микони С.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов. М.: РАН, 2018. 314 с.

4. ЛИТСАМ // Сайт лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании. [Электронный ресурс]. URL: http://litsam.ru (дата обращения: 02.09.2020).

Р.В. Мещеряков, А.А. Саломатин, Д.В. Сенчук

ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ ТРАНСПОРТИРОВКИ ГРУЗОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОАГЕНТНОЙ АВИАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, tyxer2006@gmail.com

Аннотация

В настоящей статье исследуется вопрос доставки грузов с использованием варьируемой численности беспилотных летательных аппаратов (БЛА), входящих в состав многоагентной системы (МАС). Рассматривается опыт различного применения беспилотных авиационных систем (БАС) для решения задач, возникающих на фоне широкого распространения инфекции COVID-2019 в Китайской Народной Республике. В ходе анализа процесса построения полетного задания, внешних факторов, влияющих на эффективность его выполнения, с помощью инструментов теории графов смоделирована задача коммивояжера, решение которой проводилось с помощью методов целочисленного линейного программирования и алгоритма Дейкстры. В результате успешно построенной модели получен программный продукт для выявления оптимального пути элементов БАС, который в дальнейшем может быть интегрирован в перспективные образцы комплексов виртуальной реальности.

Ключевые слова: многоагентные системы, беспилотные летательные аппараты, беспилотные авиационные системы, ограничения эксплуатации, мультикоптер.

R.V. Mescheryakov, A.A. Salomatin, D.V. Senchuk

OPTIMIZING THE TASK OF CARGO TRANSPORTATION BY USING TOOLS OF THE MULTI-AGENT SYSTEM

V.A. Trapeznikov Institute of Management Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, tyxer2006@gmail.com

Annotation

This article studies the issue of cargo delivery with the use of a variable number of unmanned aerial vehicles (UAV) that are part of the multi-agent system (MAS). Also envisages experience of different using unmanned aerial systems (UAS) for solving new problems appeared while spreading COVID-2019 infection in Chinese People Republic. While analyzing process of making air tasking order, environment factors with the help of instruments of theory of graphs travelling salesman problem modeled, answering was made with the help of integer linear programming methods and Dextra algorithm. In conclusion researchers got software program for searching optimal way for the elements of unmanned aerial systems, which can fit in advanced complex of virtual reality.

Key words: multi-agent systems, unmanned aerial vehicles, unmanned aircraft systems, operation restrictions, multicopter.

В связи с распространением пандемии COVID-2019 в масштабах крупного количества государств, одним из актуальных направлений научных исследований может являться вопрос изучения доставки грузов с использованием БЛА, что позволило бы сократить количество контактов людей и снизить риск возникновения новых очагов заболеваемости. По мнению авторов настоящей работы, современные тренды развития многоагентных систем свидетельствуют о перспективе использования автономных беспилотных авиационных систем (БАС), состоящих из БЛА квадрокоптерного типа для решения широкого круга прикладных задач: получения биологических материалов для проведения анализов на наличие COVID-2019 без риска для здоровья медицинских работников; передачи продуктов питания и товаров первой необходимости лицам, находящимся в изоляции и на карантине. Использование группировок БЛА позволит оперативно решать задачи в случаях ограниченного ресурса времени, различных метеоусловиях и в условиях различного городского ландшафта. По этой причине одними из первостепенных заказчиков разработки данного оборудования могут выступить представители министерства здравоохранения и министерства по чрезвычайным ситуациям.

Проектирование алгоритма управления МАС представляет собой сложный технологический процесс. Это обусловлено переменной численностью летательных аппаратов, которые подвержены выходу из строя в результате механических повреждений, а также динамическим и непредсказуемым характером внешней среды, в которой приходится выполнять поставленные задачи.

По итогам встречи Президента Российской Федерации В.В. Путина с членами Правительства Российской Федерации 9 октября 2019 г. председателем Правительства Российской Федерации Д.А. Медведевым подписано Постановление Правительства Российской Федерации № 1304, в соответствии с которым утверждены принципы модернизации первичного звена здравоохранения. Основополагающим объявлен принцип обеспечения доступности и качества первичной медико-санитарной помощи и медицинской помощи, оказываемой в сельской местности, рабочих поселках, поселках городского типа и малых городах с численностью населения до 50 тыс. человек. Успешное решение данной задачи наглядно иллюстрирует опыт применения БЛА квадрокоптерного типа в сельской местности Китайской Народной Республики (КНР). В различных районах КНР в период с января 2020 года с целью недопущения распространения вируса COVID-2019 квадрокоптеры с камерами и микрофонами следили за соблюдением режима самоизоляции местным населением. Кроме того, грузовые мультикоптеры, обычно используемые в сельском хозяйстве, были переоборудованы и успешно применялись для распыления дезинфицирующих средств в некоторых зараженных регионах Китая.

В настоящем исследовании авторы предлагают рассмотреть процесс задействования БАС, состоящей из нескольких транспортных мультикоптеров (см. рис. 1) для доставки продуктов питания и товаров первой необходимости лицам, находящимся в изоляции и на карантине.

Рисунок 1 – Мультикоптер транспортный

Одним из критериев эффективной доставки грузов является оптимальность пути передвижения БЛА. В рассматриваемой задаче коммивояжера оптимальным считают тот путь, при котором БЛА смог произвести максимальное число доставок, посетив для этой цели все города хотя бы по одному разу и вернувшись в исходную точку старта. Поиск такого решения обеспечивает возможность автоматизировать процесс доставки товаров, при этом оптимизируя ресурс затраты.

Задача коммивояжера моделируется в работе с помощью графа. Вершины графа отображают города, а его ребра представляют пути сообщения между этими городами. Длины ребер задаются с помощью матрицы расстояний между городами

$$X = \begin{Vmatrix} 0 & x_{1,2} & \dots & x_{1,n} \\ x_{2,1} & 0 & \dots & x_{2,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n,1} & x_{n,2} & \dots & 0 \end{Vmatrix}, \text{ где } x_{i,j} > 0, x_{i,j} = x_{j,i}, i \neq j. \quad (1)$$

БЛА считается коммивояжером. Он стартует из заданного города, посещает все остальные города, в которых есть грузы, и производит доставку этих грузов в точку старта.

В случае эксплуатации БАС, состоящей из единой неразделенной системы БЛА, решение поставленной задачи происходит с помощью сведения её к задаче целочисленного линейного программирования. Под критерием оптимальности рассматривают длину гамильтонова пути в графе, которая представляет собой величину пройденного расстояния при доставке всех грузов. Она должна быть минимальной среди всех возможных, удовлетворяющих ограничениям на перемеще-

ние рассматриваемого аппарата Моделирование процесса доставки грузов одним квадрокоптером, находящимся изначально в вершине 1, для девяти грузов показано на Рис. 2 и занимает 183.5 мин при скорости квадрокоптера равной 1 км/мин.

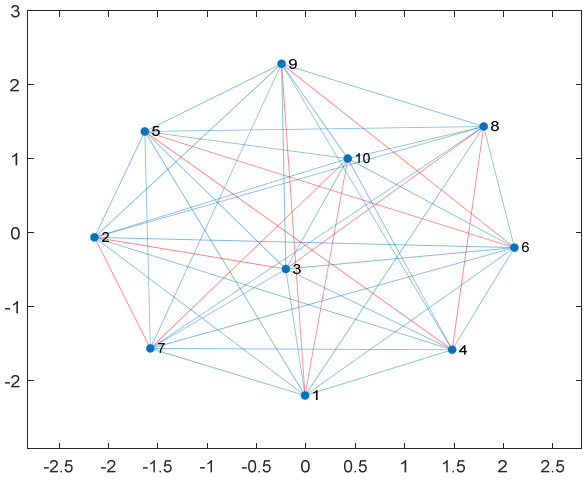


Рисунок 2 – Решение задачи коммивояжера для 1 квадрокоптера в случае 10 городов

В случае эксплуатации БАС, состоящей из девяти БЛА, одновременно запушенных для параллельного выполнения полетного задания, где каждый со скоростью 2 км/мин напрямую будет перемещаться к своему городу и от него, задача доставки грузов решается за 46.3 мин.

Исследуем процесс движения аппаратов, при котором БЛА будут двигаться по самому короткому пути, который не всегда будет совпадать с путём движения напрямую. В результате было обнаружено, что, например, БЛА может двигаться из первой вершины в самую удаленную десятую по самому короткому пути, найденному с помощью алгоритма Дейкстры: из 1 - в 2 – в 10. При аналогичных оптимизациях для остальных 8 путей в города, где изначально находятся доставки, общее время доставки удалось сократилось до 44.9 мин. Следовательно, если допускается распределение полезной нагрузки между элементами БАС, то можно добиться повышения эффективности эксплуатации БАС в отличие от единичного применения БЛА примерно в 4 раза.

Рассмотрим возможность уменьшения численности группировки БАС, не теряя при этом значительную эффективность по времени. В качестве ограничения допустим, что грузоподъемность БЛА позволяет обеспечить доставку двум и более адресатам грузов одним аппаратом. В контексте рассмотрения оперативной доставки необходимых медикаментов для успешной борьбы с инфекцией COVID-2019 данное ограничение возможно выполнить в случае эксплуатации транспортного мультикоптера. Рассмотрим от вершины № 1 до всех других самые короткие пути, при этом проходящие через несколько вершин. В задаче, представленной выше, по результатам получили, что, например, можно задействовать следующие вершины: 6 в пути из 1 в 4; 8 в пути из 1 в 7; 8 в пути из 1 в 9; 2 в пути из 1 в 10. То есть можно не использовать три БЛА, осуществляющих доставку из вершин 2, 6 и 8, и общее число БЛА тогда будет равно 6.

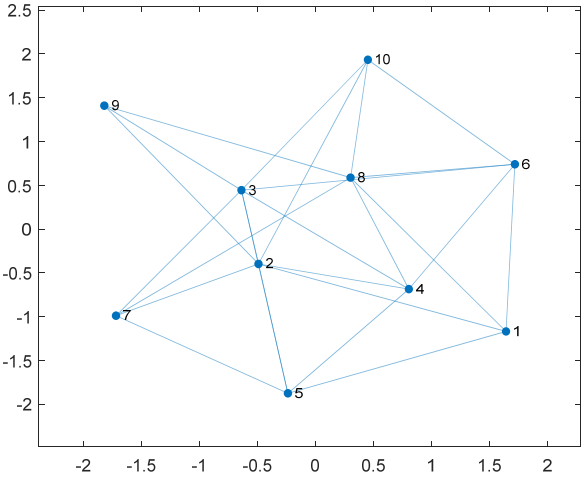


Рисунок 3 – Первая корректировка графа при учёте ограничения на максимальную дальность передвижения без груза для поиска пути доставки

Усложним математическую модель, добавив при этом дополнительные ограничения: максимальная дальность передвижения с грузом = 20± 1 км, максимальная дальность передвижения без груза = 30± 1км. Допустим, что при движении с полезной нагрузкой скорость БЛА останется на том же уровне, что и без неё и будет равняться 2 км/мин. Во-первых, на этапе оценки решения задачи определено, что в случае подобных исходных значений не рассматриваются пути, при которых расстояния между городами > 30 км. Следовательно, граф для дальнейшего поиска решения можно изменить.

Предположительно, БЛА должны двигаться по самым коротким путям, найденным с помощью алгоритма Дейкстры. Однако, необходимо учитывать ограничение на максимальную дальность передвижения с грузом при обратном движении в вершину 1. Не все пути от первой вершины к грузам и обратные пути в первую вершину будут совпадать. Рассматриваются решения, для которых ограничения выполняются и данные пути совпадают.

Таблица 1 – Решения задачи, в которых пути перемещения с грузом и без него совпадают

Номер квадрокоптера	**Порядок посещения городов**	**Возможны доставки из городов под номерами**
1	5,3,5,1	3
2	5, 1	5
3	6, 1	6
4,5	8, 7, 8, 1	7,8
6	8, 9, 8, 1	8,9

Следовательно, необходимо шесть БЛА для доставки шести адресатам. Кроме того, необходимо ещё осуществить доставку из оставшихся 3 городов: городов под номерами 2, 4 и 10, что нельзя сделать одинаковыми путями туда и обратно, поскольку есть ограничение на максимальную дальность передвижения с грузом и без. Рассмотрим, как осуществить доставку из второй вершины. Добраться из 1 в 2 без груза напрямую возможно, но вернуться по нему невозможно напрямую, так как расстояние больше 20 км. Найдем другие варианты. Исключим путь в графе, соединяющий первую вершину со второй, а также пути, которые больше 20 км, так как уже будет рассматриваться передвижение с грузом. Получим следующий граф для поиска пути в вершину №1 после того, как груз забран.

Найдём кратчайший путь из 2 в 1 в этом графе, это путь возвращения с грузом, после того как коптер забрал его во втором городе: 2 9 8 1 и его расстояние равно 46.6451 км. По аналогии сделаем, для двух других вершин: 4 (4 8 1; расстояние 38.8092 км) и 10(10 3 9 8 1; расстояние 56.0042 км).

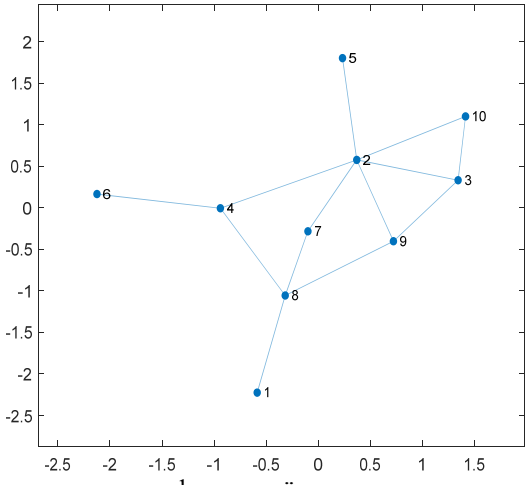


Рисунок 4 – Вторая корректировка графа при учёте ограничения на максимальную дальность передвижения с грузом для поиска обратного пути для доставки

Таблица 2 – Все решения задачи с учётом ограничений

Номер квадрокоптера	**Порядок посещения городов**	**Возможны доставки из городов под номерами**	**Пройденное расстояние**
1	5,3,5,1	3	86.9856

Номер квадрокоптера	Порядок посещения городов	Возможны доставки из городов под номерами	Пройденное расстояние
2	5,1	5	41,8482
3	6,1	6	40,3816
4	8,7,8,1	7	62,5210
5	8,1	8	38,5880
6	8,9,8,1	9	59,3782
7	2,9,8,1	2	66.8359
8	6,4,8,1,	4	75.4120
9	2,10,3,9,8,1	10	100,8661

Из таблицы следует, что самая долгая доставка будет у 9 БЛА, отвечающего за доставку из города под номером 10, а процесс доставки для всех грузов составит 50.4 мин. Проведенное исследование, а именно оптимальный путь БЛА для доставки грузов, в перспективе может использоваться в программном комплексе, имитирующем выполнение полетного задания, в качестве инструмента для оценки данного пути с учетом влияния внешней среды.

В работе проведен анализ целесообразности и эффективности применения БАС состоящей из БЛА мультикоптерного типа. Представлена оптимальная модель построения процесса доставки грузов. С помощью описанной модели для рассматриваемого примера удалось сократить оптимальное время доставки до четырёх раз, по сравнению с ситуацией эксплуатации единичного аппарата. Решение задачи выглядит как набор точек перемещения БЛА для того, чтобы забрать доставки, обратный путь возвращения при этом будет совпадать. Также в результате решения задачи возможно рассчитать общее время доставки всех грузов. Кроме того, возможно исследование использования меньшего числа БЛА при условии, что один аппарат может брать несколько грузов.

Стоит отметить, что тактико-технические характеристики аппаратов возможно изменять в зависимости от района выполнения задач, перевозимых грузов [11]. Например, аппарат с большой дальностью передвижения может быть эффективен в мегаполисах, а аппарат с меньшей дальностью передвижения может использоваться локально на небольших территориях. Аналогичное может быть применимо к транспорту, перевозящему грузы разных масс: тяжелые и легкие. Такие замены, помогают оптимизировать процессы доставки, а также сократить время на обработку данных и выдачу решения как для метода целочисленного программирования, так и для ручной проверки в случаях небольшого числа точек доставки.

В дальнейшем предполагается изучение описанной БАС, в первую очередь при проведении полевых испытаний, а также по итогам исследования влияния внешних факторов при задействовании инструментов виртуального моделирования. [12]

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00331.

Литература

1. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 280 С.

2. Моисеев В.С. Групповое применение беспилотных летательных аппаратов: монография. – Казань: Редакционно-издательский центр «Школа», 2017. – 572 С.

3. Кутахов В.П., Пляскота С.И. Информационное взаимодействие в крупномасштабных робототехнических авиационных системах // Материалы Десятой международной конференции: в 2-х томах Институт проблем управления им. В.А.Трапезникова; Российская академия наук. 2017 – 93-96 С.

4. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю. Планирование движения группы подвижных объектов в двумерной среде с препятствиями // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2016. Vol. 2 (175). P. 6–22.

5. Hadad, Meirav; Kraus, Sarit et al. Group planning with time constraints // Annals of mathematics and artificial intelligence, 2013, Vol. 69 P. 243-291.

2. Jones C. V, Matarić M.J. Behavior-Based Coordination in Multi-Robot Systems // Auton. Mob. Robot. Sens. Control Decis. Appl. 2005. P. 549–569.

3. Liu, Y., & Nejat, G. (2013). Robotic Urban Search and Rescue: A Survey from the Control Perspective. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 72(2), 147–165.

4. Macwan, A., Vilela, J., Nejat, G., & Benhabib, B. (2015). A Multirobot Path-Planning Strategy for Autonomous Wilderness Search and Rescue. IEEE Transactions on Cybernetics, 45(9), 1784–1797.

5. Liu, Y., & Nejat, G. (2015). Multirobot Cooperative Learning for Semiautonomous Control in Urban Search and Rescue Applications. Journal of Field Robotics, 33(4), 512–536.

6. Macwan, A., Nejat, G., & Benhabib, B. (2011). Optimal deployment of robotic teams for autonomous wilderness search and rescue. 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems.

7. Бирин Д.А., Ляпустин Е.С., Мещеряков Р.В. // Беспилотный летательный аппарат сопровождения группы исследователей с многомодальным управлением // В сборнике: XII мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2019) Материалы XII мультиконференции. В 4-х томах. Редколлегия: И.А. Каляев, В.Г. Пешехонов [и др.]. 2019. С. 67-70.

8. Кутахов В.П., Мещеряков Р.В. Принципы формирования модели оптимизации системы роботизированных авиационных средств // В сборнике: XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019 Сборник трудов XIII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2019. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. 2019. С. 1211-1214

С.В. Минчук[1], Л.В. Октябрьская[1], И.С. Козлов[1], О.Н. Резник[2,3], А.Е. Скворцов[2], В.М. Теплов[4], А.В. Лопота[5], В.В. Харламов[5]

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ АППАРАТОВ LIFE STREAM ECMO ДЛЯ БОРЬБЫ С НОВОЙ КОРОНАВИРУСНОЙ ИНФЕКЦИЕЙ COVID-19

[1]АО «НПО «СПЛАВ» им. А.Н.Ганичева», г. Тула, [2]ФГБОУ ВО Северо-западный государственный медицинский университет им И.И. Мечникова» Минздрава России, Санкт-Петербург, [3]ГБУ СПбНИИ скорой помощим им И.И. Джанелидзе, Санкт-Петербург, [4]ФГБОУ ВО ПСПбГМУ им И.П. Павлова, Санкт-Петербург, [5]ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург, minchuk@email.su, oktyabrskaya.lv@splavtula.ru, kozlov.is@splavtula.ru,onreznik@gmail.com, skvortsov.spb@gmail.com, onreznik@gmail.com, vadteplov@mail.ru, v.harlamov@rtc.ru

Аннотация

На сегодняшний день специалистами Министерства Здравоохранения Российской Федерации, ВОЗ, китайского, американского и европейского центров по контролю за заболеваемостью разработаны материалы по лечению и профилактике новой коронавирусной инфекции COVID-19. В статье рассмотрены перспективы применения экстракорпоральной мембранной оксигенации (ЭКМО) с помощью аппарата LIFE STREAM ECMO для поддержки пациентов, находящихся в критическом состоянии с острой дыхательной и/или сердечной недостаточностью, вызванными новой коронавирусной инфекцией COVID-19.

Ключевые слова: экстракорпоральная мембранная оксигенация, ЭКМО, ОРДС, новая коронавирусная инфекция, COVID-19.

S.V. Minchuk[1], L.V. Oktyabrskaya[1], I.S. Kozlov[1], O.N. Reznik[2,3], A.E. Skvortsov[2], V.M. Teplov[4], A.V. Lopota[5], V.V. Kharlamov[5]

APPLICATION PERSPECTIVE OF THE LIFESTREAM ECMO DEVICES FOR TREATMENT OF THE NEW CORONAVIRUS DISEASE (COVID-19)

[1]JSC «SPLAV SPA» named after A. Ganichev», Tula, [2]I.I. Mechnikov North-Western State Medical University, St. Petersburg, onreznik@gmail.com, [3]I.I. Dzhanelidze St. Petersburg Research Institute of Emergency Medicine, St. Petersburg, [4]I.P. Pavlov First St. Petersburg State Medical University, St. Petersburg, [5]Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, St. Petersburg, minchuk@email.su, oktyabrskaya.lv@splavtula.ru, kozlov.is@splavtula.ru,onreznik@gmail.com, skvortsov.spb@gmail.com, onreznik@gmail.com, vadteplov@mail.ru, v.harlamov@rtc.ru

Abstract

To date, specialists of the Ministry of Health of the Russian Federation, WHO, Chinese, American and European Centers for Disease Control have developed guidelines for the treatment and prevention of the new coronavirus disease COVID-19. The article describes perspective for the use of extracorporeal membrane oxygenation (ECMO) using the LIFE STREAM ECMO device for critical patients with acute respiratory failure, acute heart failure caused by the new coronavirus disease COVID-19.

Key words: extracorporeal membrane oxygenation, ECMO, ARDS, extracorporeal membrane oxygenation, new coronavirus disease, COVID-19.

В конце 2019 года в Китайской Народной Республике произошла вспышка новой коронавирусной инфекции с эпицентром в городе Ухань (провинция Хубэй). Всемирная организация здравоохранения присвоила официальное название инфекции, вызванной новым коронавирусом, – COVID-19 [1]. COVID-19 – высокоинфекционное заболевание, в основном поражающее легочные альвеолы, в первую очередь у критических больных, что приводит к тяжелой дыхательной недостаточности [5]. Различают легкие, средние и тяжелые формы течения инфекции. При тяжелом течении часто наблюдается развитие быстро прогрессирующего заболевания нижних дыхательных путей таких, как пневмония с острой дыхательной недостаточностью (ОДН), острый респираторный дистресс-синдром (ОРДС), сепсис и септический шок. При этом практически у всех пациентов с тяжелым течением заболевания зарегистрирована прогрессирующая ОДН и ОРДС [1].

Экстракорпоральная мембранная оксигенация (ЭКМО) – это высокотехнологичный метод, направленный на поддержание оксигенации и кровообращения пациентов, находящихся в критическом состоянии с острой дыхательной и/или сердечной недостаточностью. Известно, что в некоторых случаях, у больных с COVID-19, развивается повреждение значительного объема легочной ткани (более 90%), когда консервативные методы лечения и реанимационные мероприятия становятся неэффективными. В этом случае применение ЭКМО является последним шансом спасти такого пациента, временно заместив функцию пораженных вирусом легких [2]. Летальность у пациентов с тяжелой формой COVID-19 (с ОДН и ОРДС, требующая интенсивной терапия) составляет около 49%, при этом летальность среди госпитализированных пациентов варьируется от 4 % до 11 %. Первоначальный опыт использования ЭКМО для лечения данной категории пациентов показывает потенциальную возможность их выживания.

На сегодняшний день специалистами Министерства Здравоохранения Российской Федерации, ВОЗ, китайского, американского и европейского центров по контролю за заболеваемостью разработаны материалы по лечению и профилактике новой коронавирусной инфекции COVID-19, в том числе с применением ЭКМО. АО «НПО «СПЛАВ» им. А.Н. Ганичева» (г. Тула) совместно с ЦНИИ РТК (Санкт-Петербург) ведут разработку и организацию производства перфузионного комплекса LIFE STREAM ECMO для экстракорпоральной поддержки пациентов, находящихся в критическом состоянии с острой дыхательной и/или сердечной недостаточностью. Рассмотрим перспективы применения данных аппаратов для борьбы с новой коронавирусной инфекции COVID-19.

Временные методические рекомендации [1], разработанные Министерством Здравоохранения Российской Федерации, и руководство Первой академической клиники Университетской школы медицины провинции Чжэцзян [5] освещают вопросы профилактики и лечения новой коронавирусной инфекции COVID-19, в том числе показания и противопоказания, а также общие рекомендации по применению ЭКМО. Российское общество специалистов ЭКМО (РосЭКМО) разработало свои рекомендации по применению ЭКМО при тяжелой легочной и/или сердечной недостаточности у пациентов с COVID-19 [4], данные рекомендации основаны на [10], [л2], [7], [6]. В обзоре в The Lancet Respiratory Medicine, где была рассмотрена роль ЭКМО и центров ЭКМО во время пандемии COVID-19, были определены рекомендации по использованию ЭКМО, было показано, что применение ЭКМО эффективно при COVID-19 в опытных центрах, при наличии соответствующих ресурсов и возможностей [10]. В текущих рекомендациях ВОЗ применение вено-венозной (ВВ) ЭКМО показано пациентам с COVID-19 и тяжелым ОРДС в опытных центрах при достаточном количестве случаев работы с такими пациентами. Рекомендации ведущих мировых экспертов описывают общие требования к организации центра ЭКМО для лечения ОРДС [л2]. Общие рекомендации по показаниям и ведению пациентов на ЭКМО размещены на сайте международной организации экстракорпоральной поддержки жизни – ELSO [7]. Society of Critical Care Medicine также опубликовало рекомендации по ведению пациентов с COVID-19 и рекомендует использовать ЭКМО в случае неэффективности обычных методов лечения [6].

В соответствии с [5] клиническая классификация COVID-19:

- Легкая форма

Клинические симптомы умеренные, при визуализации проявлений пневмонии не наблюдается.

- Умеренная форма

Такие симптомы, как повышение температуры тела и симптомы со стороны респираторного тракта и т.д., проявления пневмонии можно увидеть при визуализации.

- Тяжелая форма

У взрослых при наличии любого из следующих критериев: частота дыхания > = 30 вдохов/мин; насыщение кислородом <= 93% в состоянии покоя; индекс оксигенации (соотношение парциального давления кислорода в артериальной крови (PaO2)/концентрации кислорода на вдохе (FiO2)) <= 300 мм рт. ст. Случаи прогрессирования поражения > 50% в течение 24-48 часов при визуализации легких должны рассматриваться как тяжелые.

- Критические случаи

Соответствие любому из следующих критериев: возникновение дыхательной недостаточности, требующей искусственной вентиляции легких; наличие шока; функциональная недостаточность других органов, которая требует контроля и лечения в отделении интенсивной терапии. В критических случаях различают раннюю, среднюю и позднюю стадии течения болезни в зависимости от индекса оксигенации и работы дыхательной системы.

Ранняя стадия: 100 мм рт. ст. < Индекс оксигенации (PaO2/FiO2) <= 150 мм рт. ст., податливость дыхательных путей > = 30 мл/см H2O; без функциональной недостаточности других орга-

нов, кроме легких. Пациент имеет большие шансы на выздоровление при активной противовирусной и антицитокиновой терапии и поддерживающем лечении.

Средняя стадия: 60 мм рт. ст. < Индекс оксигенации (PaO2/FiO2) <= 100 мм рт. ст. 30 мл/см H2O > податливость дыхательных путей > = 15 мл/см H2O; может быть осложнено легкой или умеренной дисфункцией других органов.

Поздняя стадия: индекс оксигенации (PaO2/FiO2) <= 60 мм рт. ст. податливость дыхательных путей <15 мл/см H2O; диффузное уплотнение обоих легких, что требует применения ЭКМО, или отказ других жизненно важных органов. Риск летального исхода значительно возрастает.

Применение ЭКМО показано при тяжелой рефракторной гипоксемии [1]. Основным показанием является ОРДС средней тяжести и тяжелого течения с длительностью проведения любой ИВЛ (инвазивной или неинвазивной) не более 5 суток.

В соответствии с [1] показаниями для ЭКМО являются:

- индекс Мюррея более 3 и (или) PaO2/FiO2 < 150 при PEEP ≥ 10 см H2O в течение 6 часов (при невозможности измерения PaO2 – показатель SpO2/FiO2 < 200)
- давление плато ≥ 35 см.вод.ст. (25,7 мм рт. ст.) несмотря на снижение PEEP до 5 см.вод.ст. и снижение VT до минимального значения (4 мл/кг) и pH ≥ 7,15.

Противопоказания:

- Тяжелые сопутствующие заболевания с ожидаемой продолжительностью жизни пациента не более 5 лет;
- Полиорганная недостаточность или SOFA > 15 баллов;
- Немедикаментозная кома (вследствие инсульта);
- Техническая невозможность венозного или артериального доступа;
- Индекс массы тела > 40кг/м2.

В свою очередь [4] приводит следующие противопоказания для применения ЭКМО:

- неизлечимое заболевание с плохим краткосрочным прогнозом (менее 6 месяцев), серьезное повреждение центральной нервной системы;
- полиорганная недостаточность или SOFA > 12 баллов;
- длительность механической ИВЛ более 10 дней;

Рекомендации к проведению ЭКМО также описаны в [5]. В течение 72 часов при механической вентиляции легких принимались следующие меры: «щадящие» режимы вентиляции легких и вентиляция в положении лежа на животе (Prone position). При наступлении одного из следующих условий, стоит рассмотреть подключение к ЭКМО, как способ спасения жизни пациента:

- индекс оксигенации (PaO2/FiO2) < 80 мм рт. ст. (Независимо от давления PEEP);
- давление плато <= 30 мм рт. ст. (40,8 мм.вод.ст.), PaCO2 > 55 мм рт. ст.
- начинающийся пневмоторакс, утечка воздуха > 1/3 дыхательного объема, продолжительность > 48 ч;
- ухудшение кровообращения, дозировка норадреналина > 1 мкг / (кг х мин);
- применение экстракорпоральной сердечно-легочной реанимации (ECPR).

В случае, если больному не подходит продленная искусственная вентиляция легких, то есть эффективность ее применения для пациента сомнительна, или при возникновении одного из следующих условий, следует немедленно начать проведение замещающей ЭКМО:

- снижение комплаентности легких. После процедуры раскрытия объема легких, комплаентность дыхательной системы <10 мл/см H2O;
- стойкое обострение пневмомедиастинума или подкожной эмфиземы. Параметры искусственной вентиляции, по расчетам, не могут быть уменьшены в течение 48 часов;
- индекс оксигенации (PaO2/FiO2) <100 мм рт. ст. и ситуация не улучшается обычными методами в течение 72 часов.

Рекомендации РосЭКМО [4] ссылаться на [8], [9] которые указывают на эффективность ЭКМО при ОРДС вызванным COVID-19.

Для обеспечения исскуственного кровообращения и оксигенации применяются различные режимы ЭКМО. Так [5], [4] предлагает следующие режимы:

- первым вариантом для больных с нарушениями дыхания является режим Вено-Венозное (ВВ) ЭКМО. Режим Вено-Артериальная (ВА) ЭКМО не применяется в первую очередь именно из-за возможных проблем с кровообращением.
- для пациентов с дыхательной недостаточностью, осложненной сердечной недостаточностью, с индексом перфузии (PaO2/FiO2) <100 мм рт. ст., следует выбирать режим Вено-Артерио-Венозной (ВАВ) ЭКМО с общим потоком > 6 л/мин, а V / A = 0,5 / 0,5 поддерживается ограничением потока.

- для пациентов с COVID-19 без тяжелой дыхательной недостаточности, но с тяжелой сопутствующей сердечно-сосудистой патологией, несущей риск кардиогенного шока, следует выбирать режим ВА ЭКМО. Однако, таким больным необходима поддержка в виде перемежающейся неинвазивной ИВЛ с положительным давлением (IPPV), а ЭКМО на ранней стадии необходимо проводить при медикаментозной седации пациента.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о целесообразности применения ЭКМО при лечении тяжелых форм ОДН, ОРДС у пациентов с COVID-19 в случае неэффективности обычных методов лечения в опытных центрах при достаточном количестве случаев работы с такими пациентами.

Рассмотрим перфузионный комплекс LIFE STREAM ECMO (см. рис. 1), который предназначен для поддержания искусственного кровообращения в теле пациента при остановке сердца, насыщения крови кислородом (оксигенации) при развитии ОДН. Применение комплекса для экстракорпоральной сердечно-легочной реанимации описано в [3].

Рисунок 1 – Перфузионный комплекс LIFE STREAM ECMO

Комплекс LIFE STREAM ECMO является универсальной платформой для широкого диапазона применения в отделениях интенсивной терапии, экстренной и чрезвычайной медицине, интервенционной кардиологии и отделениях кардиохирургии, а также везде, где необходима поддержка функций сердца и легких. Комплекс LIFE STREAM ECMO позволяет реализовывать режим ВВ, ВАВ и ВА ЭКМО на протяжении 6 часов со скоростью потока до 10 л/мин и насыщения крови кислородом не менее 350 мл/мин.

Показаниями к началу применения являются:

- рефрактерные к медикаментозной терапии нарушения центральной гемодинамики, сопровождаемые развитием синдрома низкого сердечного выброса, метаболическими расстройствами (декомпенсированный метаболический лактатацидоз) и риском развития или развертыванием синдрома полиорганной недостаточности.
- тяжелая пневмония, ОРДС, первичное отторжение легочного трансплантата;

Характеристики комплекса:

- обеспечение расхода перфузата в диапазоне от 0,1 до 10,0 л/мин;
- обеспечение давления потока в диапазоне от 0 до 300 мм рт.ст.;
- определение температуры перфузата от плюс 5 до плюс 40;
- определение значения сатурации кислорода крови SpO2 в диапазоне от 70 до 100 %;
- определение наличия пузырьков воздуха в контуре;
- питание от сети 12 В и 220 В.
- время автономной работы от встроенного источника питания – 2 часа;
- масса 12 кг;
- автоматический режим поддержания потока;
- время работы комплекта изделий одноразовых – 6 часов.

В комплексе действует один канал контроля циркуляции кровеносного потока (датчик расхода). Оператор через устройство управления параметрами перфузии и отображения информации устанавливает требуемый конечный расход перфузата в перфузионном контуре. Комплекс, полу-

чая информацию от устройства управления параметрами перфузии, управляет скоростью вращения двигателя. Средство управления и обработки данных, анализируя информацию, получаемую от инвазивных датчиков давления и датчика расхода, действует согласно алгоритму поддержания заданного расхода перфузата, в результате чего система управления регулирует скорость вращения двигателя. Одноразовый насос, соединенный с двигателем, создаёт поток перфузата.

Устройство управления параметрами перфузии обеспечивает оператору автоматический режим работы системы детектирования пузырьков воздуха за счет системы оповещения. Улавливание пузырьков воздуха осуществляется при помощи окисгенатора и фильтра крови. Фильтр крови также предназначен для фильтрации микроэмбол более 40 мкм.

Насыщение крови кислородом осуществляется за счет оксигенатора, включенного в перфузионный контур, с последующим измерением SpO_2 неинвазивным датчиком. Оператор в зависимости от уровня насыщения крови кислородом регулирует подачу кислорода.

Для повышения уровня безопасности в комплексе предусмотрена система сигнализаций-оповещений о превышении параметров перфузии и критическом изменении состояния комплекса.

Перфузионный комплекс LIFE STREAM ECMO по своим техническим характеристикам может быть успешно применен для лечения ОДН, ОРДС, вызванных новой коронавирусной инфекцией COVID-19. Аппарат LIFE STREAM ECMO проходит государственную регистрацию. Эффективность работы аппарата уже была показана в эксперименте на животных (свиньи) с имитацией внезапной остановки сердечной деятельности.

Статья подготовлена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках комплексного проекта от 03.03.2017 г. 075-11-2018-216 (внутренний номер договора № 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».

Литература

1. Временные методические рекомендации. Профилактика и лечение новой коронавирусной инфекции (COVID-19): сайт. – URL: https://static-1.rosminzdrav.ru/system/attachments/attaches/000/050/116/original/28042020_%D0%9CR_COVID-19_v6.pdf (дата обращения: 10.08.2020). – Текст: электронный.

2. Применение ЭКМО в борьбе с COVID-19: сайт. – URL: https://cardioweb.ru/news/item/2179-primenenie-ekmo-v-borbe-s-covid-19 (дата обращения: 10.08.2020). – Текст: электронный.

3. Применение экстракорпоральной мембранной оксигенации в практике сердечно-легочной реанимации: обзор и перспективы технологии / О.Н Резник, А.Е. Скворцов, В.М. Теплов [и др.] // Вестник хирургии им. И.И. Грекова. - 2018. - Т. 177, № 4. - С. 92-97.

4. Рекомендации по применению ЭКМО при тяжелой легочной и/или сердечной недостаточности у пациентов с COVID-19: сайт. – URL: https://экмо.рф/rekomendatsii/ekmo-s-covid-19 (дата обращения: 10.08.2020). – Текст: электронный.

5. Руководство по профилактике и лечению новой коронавирусной инфекции COVID-19. Первая академическая клиника Университетской школы медицины провинции Чжэцзян. Составлено на основе клинической практики: сайт. – URL: http://webmed.irkutsk.ru/doc/pdf/covid19china.pdf (дата обращения: 10.08.2020). – Текст: электронный.

2. COVID-19 Guidelines: сайт. – URL: https://sccm.org/SurvivingSepsisCampaign/ Guidelines/ COVID-19 (дата обращения: 10.08.2020). – Текст: электронный.

3. Extracorporeal Life Support Organization: сайт. – URL: https://www.elso.org/Resources /Guidelines.aspx (дата обращения: 10.08.2020). – Текст: электронный.

4. Extracorporeal Membrane Oxygenation for Severe Acute Respiratory Distress Syndrome / A Combes, D Hajage, G Capellier [et al.] // N Engl J Med. – 2018. – 378, №21. – P. 1965-1975.

5. Extracorporeal membrane oxygenation support in 2019 novel coronavirus disease: indications, timing, and implementation / Li M, SC Gu, XJ Wu [et al.] // Chinese Medical Journal. – 2020. – 133, №9. – P. 1115-1117.

6. Planning and provision of ECMO services for severe ARDS during the COVID-19 pandemic and other outbreaks of emerging infectious diseases / K Ramanathan, D Antognini, A Combes [et al.] // Lancet Respir Med. – 2020. – 8, №5. – P.518-526.

7. Position Paper for the Organization of Extracorporeal Membrane Oxygenation Programs for Acute Respiratory Failure in Adult Patients / A Combes, D Brodie, R Bartlett [et al.] // Am J of Respir Crit Care Med. – 2014. - 190, №5. – P. 488-496.

В.Е. Пряничников, М.Д. Соловьева, Р.Б. Тарасов, В.В. Чернышев

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПЛАНЕТАРНО-ЦЕВОЧНОГО РЕДУКТОРА ДЛЯ МАНИПУЛЯТОРА СЕРВИСНОГО РОБОТА АМУР-307 И ШАГАЮЩЕГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук, Москва, ВолгГТУ, Волгоград, МГТУ «Станкин», Москва, v.e.pr@yandex.ru, masha_ru94@mail.ru

Аннотация

В данной статье представлен анализ возможности применения планетарно-цевочного редуктора нового типа для манипулятора сервисного робота АМУР-307 и шагающего подводного аппарата. Проведено исследование траектории перемещения выходного звена эксцентриково-циклоидального зацепления с передаточным отношением 1:20. Проанализирована траектория перемещения выходного звена механизма Чебышева при использовании в качестве привода входного звена эксцентриково-циклоидальное зацепление. В заключении сделаны выводы о возможности применения исследуемого планетарно-цевочного редуктора для манипулятора робота АМУР-307 и шагающего подводного робота.

Ключевые слова: эксцентриково-циклоидального зацепление, механизм Чебышева, планетарно-цевочный редуктор, манипулятор, сервисный робот, шагающий подводный робот.

V.E. Pryanichnikov, M.D. Soloveva, R.B. Tarasov, V.V. Chernyshev

ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF APPLICATION OF THE CYCLOIDAL SPEED REDUCER FOR THE MANIPULATOR OF THE AMUR-307 SERVICE ROBOT AND THE PASSING UNDERWATER VEHICLE

Keldysh Institute of Applied Mathematics Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, VolgSTU, Volgograd, MSTU «Stankin», Moscow, v.e.pr@yandex.ru, masha_ru94@mail.ru

Abstract

This article presents an analysis of the possibility of using a cycloidal speed reducer of a new type for the manipulator of the AMUR-307 service robot and a walking underwater vehicle. The study of the trajectory of movement of the output link of the eccentrically cycloidal gear with a gear ratio of 1/20 was carried out. The trajectory of movement of the output link of the Chebyshev's Lambda Mechanism is analyzed when an eccentrically cycloidal gear is used as a drive of the input link. In conclusion, conclusions are drawn about the possibility of using the investigated cycloidal speed reducer for the manipulator of the AMUR-307 robot and the walking underwater robot.

Key words: eccentrically cycloidal gear, Chebyshev's Lambda Mechanism, cycloidal speed reducer, manipulator**,** service robot, walking underwater robot.

Одним из важных элементов роботизированных устройств является преобразователь вращательного движения привода в возвратно-поступательное. Самым распространённым зацеплением, используемое в современных редукторах является эвольвентное. Это можно объяснить рядом факторов, таких как: простота изготовления зуборезного инструмента, наличие огромного парка специального оборудования, унифицированная технология изготовления и контроля колес.

В последние годы широкое распространение получают планетарно-цевочные редукторы на базе эксцентриково-циклоидального зацепления.

Эта тенденция объясняется сочетанием ряда преимуществ данного зацепления: компактностью, плавностью хода, большой мощностью, надежностью. Планетарно-цевочный редуктор может достигать для одной передачи передаточного числа более 150. Эксцентриково-циклоидального зацепление имеет КПД до 95%, а одновременно в зацеплении участвуют почти 50% зубьев передачи. При этом удельная масса планетарно-цевочных редукторов меньше до семи раз в сравнении с эвольвентными планетарными редукторами.

В планетарно-цевочном редукторе при вращении входного вала с установленным на него эксцентриком обеспечивается несколько неравномерное вращение сателлита, сцепленного непосредственно с эксцентриком. В таких редукторах обычно устанавливают компенсаторные механизмы

для устранения неравномерности вращения выходного вала. В настоящей работе мы рассмотрели применимость такого редуктора с существенным упрощением конструкции (только пара деталей эксцентрик-сателлит).

С целью увеличения крутящего момента и уменьшения габаритов конструкции манипулятора сервисного робота АМУР-307 и шагающего подводного робота предполагается использование предельно упрощенных планетарно-цевочных редукторов, выполненных из полимерных материалов с использованием лазерных и аддитивных технологий. По этой упрощенной технологии изготовления редуктора допускается отклонение траектории перемещения выходного вала от идеальной окружности. Предложен новый тип редуктора с выходным валом, закрепленном на сателлите эксцентриково-циклоидального зацепления.

Целью данной работы является произвести анализ возможности использования планетарно-цевочного редуктора нового типа для поворота нижних звеньев подъёмно-захватного механизма (манипулятора) сервисного робота АМУР-307 и проанализировать возможности применения планетарно-цевочных редукторов нового типа для преобразования вращательного движения в возвратно-поступательное на примере шагающего подводного робота, использующего механизм Чебышева. Исследование продолжает выполненные ранее работы [1-6] и применимы для многих типов роботов, например, для представленного в работе [7]. Более подробные результаты исследований шагающего привода с использованием модифицированного механизма Чебышева можно найти в работах Волгоградского государственного технического университета [8-12].

Графическим методом проведено исследование траектории перемещения выходного звена, закрепленного на сателлите эксцентриково-циклоидального зацепления с передаточным отношением 1:20. Полученная траектория перемещения выходного звена представлена на рис. 1, на котором D – идеальная траектория вращения выходного звена; A - величина отклонения траектории перемещения конечной точки выходного звена циклоидального зацепления от окружности; φ- дискретный угол поворота выходного звена (шаг по углу, принятый для расчетов).

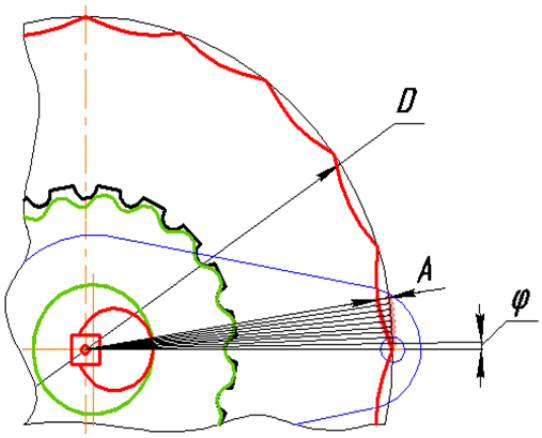


Рисунок 1 – Схема траектории перемещения выходного звена эксцентриково-циклоидального зацепления с передаточным отношением 1:20

Для оценки относительного отклонения траектории перемещения выходного звена эксцентриково-циклоидального зацепления от желаемой окружности введем величину Δ, которая равна:

$$\Delta = \frac{A}{D} \cdot 100\%$$

Относительное отклонение траектории Δ при повороте выходного вала на угол от 0° до 9° показано на рис. 2. При рассматриваемых параметрах конструкции редуктора это отклонение максимально при угле 9°.

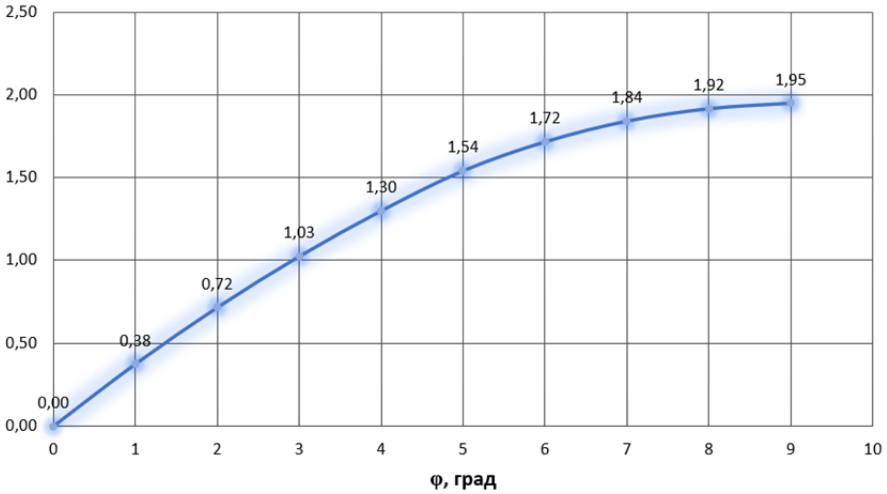
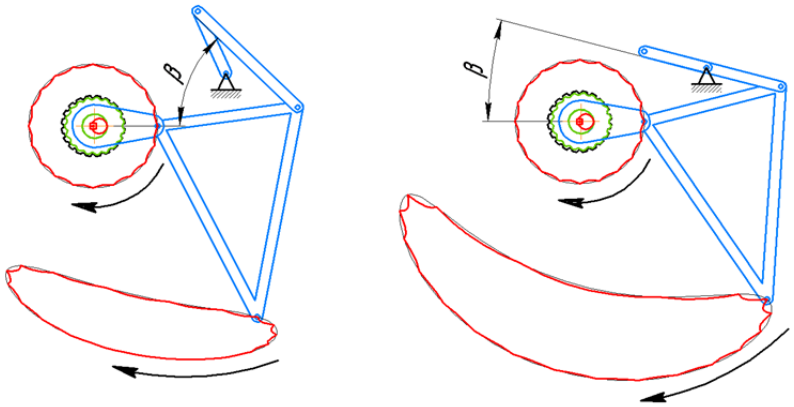


Рисунок 2 – График изменения относительного отклонения траектории циклоидального зацепления Δ, % от желаемой окружности

С применением CAD-системы удалось проанализировать анимацию работы шагающего движителя и построить траекторию перемещения выходного звена механизма Чебышева, соединенного со ступнями шагающего подводного робота, при использовании в качестве привода входного звена механизма редуктор с эксцентриково-циклоидальным зацеплением. На рис. 3 для двух основных типов походок показаны две траектории шагового цикла — с приводным звеном (кривошипом) от обычного редуктора (движение по окружности) и с приводом от упрощенного планетарно-цевочного редуктора (траектории показаны более жирной линией), где слабо заметны негладкие участки (пики и впадины).



а) б)

Рисунок 3 – Траектории движения ступни шагающего аппарата относительно корпуса (шаговые циклы) при различных угловых положениях поворотного рычага (β), определяющего: а) основную маршевую походку при β = 45°; б) походку для перешагивания через высокие препятствия при β = 15°

На рис. 4 показана кинограмма реального движения стопы шагающего механизма, точки на траектории соответствуют положению стопы при повороте приводного кривошипа на фиксированный дискретный угол. С этой траекторией и происходило сопоставление работы шагающего механизма со стандартным редуктором и с новым планетарно-цевочным редуктором (сравните рис. 3а и 4).

На рис. 5 показан выход из-под воды подводного шагающего аппарата, снабженного механизмом адаптации шагового цикла к препятствиям. Его схема была взята за основу для анализа возможной оптимизации конструкции за счет применения планетарно-цевочных редукторов нового типа.

Исследование показало, что относительная погрешность отклонения траектории перемещения конечной точки выходного звена механизма эксцентриково-циклоидального зацепления по сравнению с траекторией идеальной окружности находится в пределах нескольких процентов. Это позволяет применить такой редуктор с упрощенной схемой планетарно-цевочного механизма (ПЦМ) в подъемно-захватном устройстве мобильного сервисного робота Амур-307. В этом случае между соответствующим звеном манипулятора и ПЦМ дополнительно устанавливается эластичный элемент (упругая компенсирующая муфта).

Рисунок 4 – Эталонная траектория стопы подводного шагающего аппарата

Рисунок 5 – Исследование трансформации траекторий шагового цикла при переходе на новый тип привода с эксцентриково-циклоидальным зацеплением

Применение в качестве привода входного звена шагающего аппарата механизма с эксцентриково-циклоидальным зацеплением показало, что в опорной части траектории шагания, отклонения от «плавной траектории» минимальны (не более 2,5 %), такие отклонения несущественны для реализации шагания, визуально неразличимы. При этом конструкция шагающего аппарата существенно упрощается и снижается стоимость изделия.

Литература

1. Кудрявцев В.Н. Планетарные передачи / В.Н. Кудрявцев.– Л.: Машиностроение, 1966. – 307 с.

2. Соловьева М.Д., Щепин В.Д. / Совершенствование технологического процесса изготовления планетарно-цевочных редукторов (ПЦР) с применением методов лезвийной обработки // Научному прогрессу – творчество молодых: материалы XI международной молодежной научной конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам (Йошкар-Ола, 22-23 апреля 2016 г.): в 4 ч. / редкол.: Д. В. Иванов [и др.]. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2016. – Ч. 2. – 264 с.

3. Pryanichnikov V.E., Chernyshev V.V., Arykantsev V.V., Aryskin A.A., Eprikov S.R., Ksenzenko A.Ya., Petrakov M.S. (2018). Enhancing the Functionality of the Groups of Autonomous Underwater Robots, Proceedings of the 29th DAAAM International Symposium, pp.1319-1325, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-20-4, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria DOI: 10.2507/29th.daaam.proceedings.190.

4. V.V. Chernyshev, V.V. Arykantsev, A.E. Gavrilov et al, Design and underwater tests of subsea walking hexapod MAK-1, in *Proc. of the ASME 2016 35th Int. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE 2016)*, (Busan, Korea, 2016).

5. V.V. Chernyshev, V.V. Arykantsev, Ya.V. Kalinin, «Underwater Tests of The Walking Robot MAK-1», Human-Centric Robotics. Proceedings of the 20th International Conference on CLAWAR 2017, Professional Engineering Publishing, 2017, pp. 571-578.

6. Bogdanovich A.V., Kirsanov K.B., Khelemendik R.V., Pryanichnikov V.E., Prysev E.A. (2018). Development of Technology for Manufacturing Hardware and Intelligent Levels of the Service Autonomous Mobile Robot AMUR-307, Proceedings of the 29th DAAAM International Symposium, pp.1313-1318, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-20-4, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria DOI: 10.2507/29th.daaam.proceedings.189

7. S.Y. Yoo, B.H. Jun, H. Shim, Design of static gait algorithm for hexapod subsea walking robot: Crabster, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 38, Issue 9, (2014), pp. 989-997.

8. Chernyshev, V.V. Traction properties of walking machines on underwater soils with a low bearing ability / V.V. Chernyshev, A.E. Gavrilov // Minerals of the Ocean – 7 & Deep-Sea Minerals and Mining – 4: abstracts of Int. Conf. / VNIIOkeangeologia. St. Petersburg, 2014. P.21-24.

9. Арыканцев, В.В. Подводные исследования тягово-сцепных свойств и проходимости шагающего аппарата МАК-1 / В.В. Арыканцев, В.В. Чернышев // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 10. С. 169–178.

10. Chernyshev V.V. Design and underwater tests of subsea walking hexapod MAK-1 / V.V. Chernyshev, V.V. Arykantsev, A.E. Gavrilov et al. // Proc. of the ASME 2016 35th Int.Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE 2016, Busan, 2016. – 9 p.

11. 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. - С. 71-79.

12. Пат. 2207583 РФ B 62 D 57/032. Шагающая опора для транспортных средств повышенной проходимости / Чернышев В.В., Брискин Е.С., Савин А.Ю.; ВолгГТУ. 2003.

А.П. Федин, Я.В. Калинин, Е.А. Марчук

ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ YOULA – KUCERA В МОДЕЛИ КОНТРОЛЛЕРА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОРМОЗНЫХ УСИЛИЙ КОЛЕСНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, marocci@bk.ru

Аннотация

Задачи управления и оптимизации реальных нелинейных процессов в зависимости от вида формализации могут быть практически неразрешимы в силу крайне высоких или бесконечных размерностей, сложностей моделирования и вычислений. Однако, возможно приведение подобных моделей в несколько этапов к виду задач выпуклой оптимизации с конечными размерностями. Например, на первом этапе достигается приведение к выпуклости задачи, в отношении контроллеров производится параметризация Youla – Kucera. На втором этапе достигается приведение к виду задачи с конечными размерностями. Известны эффективные алгоритмы, позволяющие решать задачи такого типа. С использованием обозначенного подхода задачи могут быть поставлены и решены как для SISO, так и для MIMO контроллеров. В настоящей работе предлагается к рассмотрению параметризация Youla – Kucera в процессе моделирования регулятора распределения тормозных усилий колесного транспортного средства. Адекватность модели определяется посредством реализации в среде MATLAB Simulink.

Ключевые слова: управление, распределение, тормозные усилия, оптимизация, Youla, Kucera, параметризация, выпуклость, транспортное средство.

A.P. Fedin, Ya.V. Kalinin, E.A. Marchuk

YOULA – KUCERA PARAMETERIZATION IN THE MODEL OF BRAKE FORCES DISTRIBUTING CONTROLLER OF WHEELED VEHICLE

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia, marocci@bk.ru

Abstract

Control and optimization problems for real non-linear proceses, depending on the type of formalization, can be practically unsolvable due to extremely high or infinite dimensions, complexities of modeling and calculations. However, it is possible to reduce such models to the form of convex optimization problems with finite dimensions. For example, at the first stage Youla – Kucera parameterization is applied to the controllers and the problem is reduced to the convexity. At the second stage the problem is reduced to the form with finite dimensions. There are well known effective algorithms that allow to solve this type of problems. The problem can be set and solved for both SISO and MIMO controllers using this approach. In this paper is proposed to consider Youla – Kucera parameterization in the process of modeling the brake force distributing controller of wheeled vehicle. The adequacy of the model is determined by implementing in the MATLAB Simulink.

Key words: control, distribution, brake forces, optimization, Youla, Kucera, parameterization, convexity, vehicle.

С одной стороны, концепция контролируемого проскальзывания колеса в режиме торможения известна около столетия. Так, уже в 30-е годы XX в. антиблокировочные системы торможения использовались в шасси самолетов. Также концепция контролируемого проскальзывания колеса в режиме торможения находит применение в задачах движения железнодорожного транспорта. Однако, широкое распространение среди наземного колесного транспорта данная концепция получила только в последнюю четверть XX в. Внедрение в серийные модели автомобилей антиблокировочных систем торможения было связано с одной стороны, с требованиями повышения безопасности дорожного движения в условиях увеличения скоростных режимов и плотности трафика, и с другой стороны, с возможностью реализации технических решений, появившихся в период бурного развития электроники и информационных технологий. Помимо антиблокировочных систем торможения контролируемое проскальзывание колеса находит применение в системах контроля зацепления (Traction Control), курсовой устойчивости (ESP) и др. На настоящий момент времени

известны различные варианты реализации принципов теории автоматического управления в электронных блоках систем торможения, все они имеют как свои преимущества, так и недостатки.

С другой стороны, на продолжении более чем двух последних столетий наблюдается нарастающая значимость и распространенность автоматического управления в различных технических системах. Начиная со второй половины XIX в. появляются строгие положения теории автоматического управления [1]. Первоначально принципы теории автоматического управления были применимы к линейным или линеаризованным формам задач, в дальнейшем были разработаны и вплоть до настоящего времени продолжают развиваться методы, применимые к нелинейным задачам. Важным этапом в разработке автоматической системы управления следует отметить определение принципа управления и выбор типа контроллера. Предпосылки к решению задачи параметризации всех возможных стабилизирующих регуляторов, относящихся к конкретному объекту управления, начали появляться в работах исследователей последней четверти XX в. и первоначально относились только к конечномерным линейным стационарным системам с обратной связью. В дальнейшем были произведены исследования в отношении и нестационарных, и нелинейных, и систем с бесконечными размерностями. Результатом исследований стало оформление фундаментального результата в теории управления, называемого, как правило, параметризацией Youla – Kucera [2].

С учетом актуальности задачи разработки эффективного контроллера антиблокировочной системы торможения и актуальности математических методов и методов обработки информации, далее в настоящей работе будет производиться рассмотрение параметризации Youla – Kucera в отношении процесса моделирования регулятора распределения тормозных усилий колесного транспортного средства. Подойдем к вопросу моделирования антиблокировочной системы торможения с акцентированием внимания на системе автоматического управления.

Антиблокировочная система торможения колесных транспортных средств

Концепция антиблокировочных систем торможения хорошо известна, и подробное описание принципов работы современных систем может быть найдено, например, в изданиях Bosch или Springer [3], [4]. Главной целью включения антиблокировочной системы торможения является сохранение управляемости в режиме экстренного торможения. Вообще, в силу сложностей физической природы процессов трансформации трения качения в трение скольжения в реальных условиях, в настоящий момент не существует строгого математического определения зависимости коэффициента продольного зацепления колеса от коэффициента продольного проскальзывания колеса. Данный процесс имеет выраженные нелинейные характеристики. Существующие модели функциональной зависимости имеют эмпирический вид и отображают сущность реального процесса с различной степенью адекватности. Большинство существующих моделей функциональной зависимости можно рассматривать как полиномиальные аппроксимации, в том числе тригонометрические, в соответствии с теоремой Вейерштрасса. Возможна и нечеткая аппроксимация, в соответствии с теоремой Коско (1992) [5]. Возможна и аппроксимация посредством искусственных нейронных сетей [6]. Описания нечетких и нейронечетких аппроксимаций функциональных зависимостей в моделях антиблокировочных систем торможения могут быть найдены, например, в работах [7], [8]. Заметим, что в русскоязычной традиции зачастую используют обозначение зависимости $\varphi(S)$, в то время как для англоязычных авторов типична запись $\mu(\lambda)$.

Коэффициент продольного проскальзывания колеса определяется в виде отношения:

$$S = \lambda = \frac{V - \omega * r}{V} \qquad (1)$$

где V - линейная скорость оси колеса, ω - угловая скорость колеса, r - динамический радиус колеса.

В качестве примеров приведем две известные формулы выражения функциональной зависимости коэффициента продольного зацепления колеса от коэффициента продольного проскальзывания колеса:

формула А.А. Ревина:

$$\varphi(S) = \frac{f_0 * S}{a * S^2 + b * S + c} \qquad (2)$$

где a, b, c, f_0 - табличные коэффициенты, определенные для некоторых частных случаев дорожного покрытия, S – коэффициент продольного проскальзывания колеса [9];

формула H.B. Pacejka (один из вариантов):

$$\mu(\lambda) = C_1 * \sin x * (C_2 * \tan^{-1}(C_3 * \lambda_x - C_4 * (C_3 * \lambda_x - \tan^{-1}(C_3 * \lambda_x))) \quad (3)$$

где C_1, C_2, C_3, C_4 - табличные коэффициенты, определенные для некоторых частных случаев дорожного покрытия, λ_x – коэффициент продольного проскальзывания колеса [10].

Задача автоматической системы управления антиблокировочной системы торможения заключается в поддержании значения аргумента S, соответствующего максимальному значению функции φ(S), посредством передачи тормозного момента тормозному диску. Заметим, что для различных типов дорожного покрытия максимум функции φ(S) находится в окрестности значения аргумента 0.2, при этом, максимальные значения самих функций существенно отличаются. В простейших образцах систем автоматического управления антиблокировочной системы торможения предлагалось использование принципов ПИД-управления или нечеткого управления с регулированием по отклонению коэффициента продольного проскальзывания колеса от целевого значения 0.2. Вообще, на настоящее время известны системы автоматического управления антиблокировочной системы торможения на принципах ПИД-управления, адаптивного, оптимального, робастного, нечеткого, интеллектуального управления, а также их различных комбинаций и гибридов как single input, так и multi input типов [11], [12], [13], [14]. Наиболее простые системы в плане описания математической модели и технической реализации решения, как правило, обладают худшей адекватностью в отношении реальных процессов. Решения, обладающие большей адекватностью, могут быть существенно сложнее в плане математического моделирования и требуют от разработчиков глубоких познаний сразу в нескольких различных областях нескольких различных научных дисциплин. Таким образом, проектирование системы автоматического управления антиблокировочной системы торможения при обилии существующих решений остается нетривиальной задачей.

Параметризация Youla – Kucera

Методы, первоначально относящиеся только к конечномерным линейным стационарным системам с обратной связью, и лежащие в основе параметризации Youla – Kucera, впервые появляются в работах Larin, Naumenko, Suntsev (1971), Kucera (1975), Youla, Bongiorno, Jabr (1976) [15], [16], [17], [18]. Параметризация Youla – Kucera основывается на обобщении тождества Безу и использовании взаимно простых полиномиальных матриц, обеспечивающих управляемость динамических систем [19]. Таким образом, осуществляется факторизация матриц на взаимно простые матричные факторы. Вообще, факторизационный подход в теории автоматического управления занимает важное место, в качестве примера здесь укажем используемый в робастном управлении метод H_∞ [20]. Классическим изданием, посвященным факторизационному подходу в теории автоматического управления, считается двухтомник автора Vidyasagar (1985) [21], [22]. Параметризация Youla – Kucera может осуществляться как при описании динамической системы через передаточные функции, так и при описании динамической системы через пространство состояний. К настоящему времени выделены три основных случая применения параметризации Youla – Kucera:

параметризация регулятора – используется параметризация Youla – Kucera, которая позволяет параметризовать все возможные стабилизирующие регуляторы, относящиеся к конкретному объекту управления; также параметризация Youla – Kucera может использоваться в задачах уменьшения влияния возмущений и шумов;

параметризация объекта управления – используется двойная параметризация Youla – Kucera, которая позволяет параметризовать все возможные линейные стационарные объекты управления, относящиеся к конкретному стабилизирующему регулятору, посредством введения дополнительной передаточной функции; также двойная параметризация Youla – Kucera используется в относительно новой концепции систем автоматического управления plug-and-play, которая позволяет в режиме реального времени подключать новые элементы (например, датчики или активаторы) к замкнутой системе и при этом не требует перепроектировки системы управления;

параметризация и регулятора, и объекта управления – одновременно используются два первых пункта списка, что обеспечивает возможность изменения системы управления в соответствии с определяемой динамикой объекта управления; также одновременная параметризация и регулятора, и объекта управления может использоваться в адаптивном управлении и в системах отказоустойчивого управления.

В настоящее время параметризация Youla – Kucera получает все большее распространение в области автоматического управления, разрабатываются новые подходы, метод находит применение в различных областях инженерной деятельности [23], [24]. Широкий и качественный обзор

публикаций, связанных с развитием, описанием, и практическим применением параметризации Youla – Kucera произведен авторами Mahtout et al. (2020) [25]. Доступное изложение метода может быть найдено заинтересованным читателем в статье Kucera (2011) [2].

Моделирование системы распределения тормозных усилий

Поставим задачу автоматического управления в форме разработки системы автоматической стабилизации с поддержанием значения аргумента *S*, соответствующего максимальному значению функции *φ(S)*. Система управления должна быть способной к оптимизации по одному или нескольким критериям (например, энергетической эффективности и т.д.). Представим систему автоматического управления антиблокировочной системы торможения в виде системы общего вида с отрицательной обратной связью (см. рис. 1).

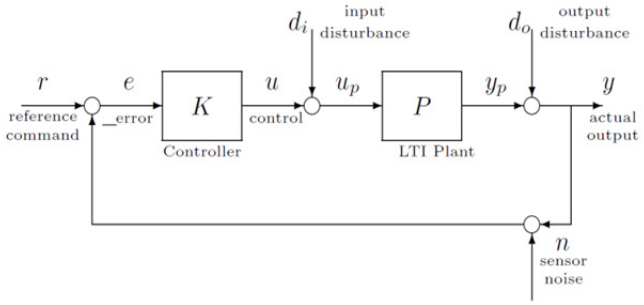


Рисунок 1 – Общий вид системы с отрицательной обратной связью

Рассмотрим объект управления *P*, приведенный к стандартному виду *G*. Тогда внешние воздействия обозначим $w \in R^w$, контролируемую переменную обозначим $u \in R^u$, измеренную переменную обозначим $e \in R^e$ и регулируемую переменную (сигнал ошибки) $z \in R^z$ (см. рис. 2).

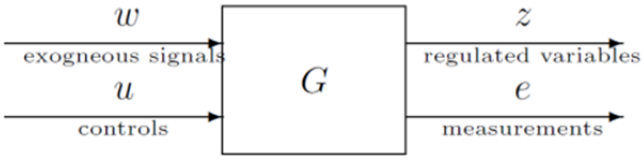


Рисунок 2 – Обобщенный объект управления

Задача оптимизации в данном случае предполагает определение стабилизирующего регулятора, минимизирующего H_∞ - норму матрицы передаточных функций при удовлетворении всех заданных ограничений. Следует принять во внимание, что задача оптимизации регулятора изначально нелинейна и имеет бесконечную размерность. Для нахождения решения требуется привести изначальную задачу к форме конечномерной задачи выпуклой оптимизации.

Воспользовавшись параметризацией Youla – Kucera, приведем задачу к выпуклому виду. Представив объект управления *P = [A, B, C, D]*, обозначим множество стабилизирующих регуляторов *S(P) = K(Q)|* $Q \in H_\infty$. После произведенных преобразований представление регулятора *K(Q)* в пространстве состояний приобретает вид:

$$K(Q) = \left[\begin{array}{c|c} A_K & B_K \\ \hline C_K & D_K \end{array}\right] = \left[\begin{array}{cc|c} A - BF - LC - BD_QC & BC_Q & BD_Q - L \\ -B_QC & A_Q & B_Q \\ \hline F - D_QC & C_Q & D_Q \end{array}\right] \quad (4)$$

Множество всех стабилизирующих регуляторов *K(Q)* в отношении объекта управления *P* может быть параметризовано следующим образом:

$$K(Q) = (N_k - D_pQ)(D_k - N_pQ)^{-1} \quad (5)$$

где

$$N_p = \left[\begin{array}{c|c} A-BF & B \\ \hline C-DF & D \end{array}\right] \quad D_p = \left[\begin{array}{c|c} A-BF & B \\ \hline -F & I \end{array}\right]$$
$$N_k = \left[\begin{array}{c|c} A-BF & L \\ \hline -F & 0 \end{array}\right] \quad D_k = \left[\begin{array}{c|c} A-BF & L \\ \hline C-DF & I \end{array}\right] \tag{6}$$

либо:

$$K(Q) = (\tilde{D}_k - Q\tilde{N}_p)^{-1}(\tilde{N}_k - Q\tilde{D}_p) \tag{7}$$

где

$$\tilde{N}_p = \left[\begin{array}{c|c} A-LC & B-LD \\ \hline C & D \end{array}\right] \quad \tilde{D}_p = \left[\begin{array}{c|c} A-LC & -L \\ \hline C & I \end{array}\right]$$
$$\tilde{N}_k = \left[\begin{array}{c|c} A-LC & L \\ \hline -F & 0 \end{array}\right] \qquad \tilde{D}_k = \left[\begin{array}{c|c} A-LC & -(B-LD) \\ \hline F & I \end{array}\right] \tag{8}$$

После проведения аффинных преобразований в конечном счете получаем матрицу передаточных функций:

$$T = \left[\begin{array}{c|c} T_1 & T_2 \\ \hline T_3 & 0 \end{array}\right] = \left[\begin{array}{cc|cc} A+BF & -BF & B & B \\ 0 & A+LC & B+LD & 0 \\ \hline C+DF & -DF & D & D \\ 0 & C & D & 0 \end{array}\right] \tag{9}$$

$$T(Q) = F_l(T, Q) = T_1 + T_2 Q T_3 \tag{10}$$

Условие выпуклости достигнуто, однако, пока еще сохраняется бесконечная размерность задачи.

Дальнейшее приведение задачи к конечной размерности производится с использованием алгоритма, предложенного в работе Polak, Salcudean (1989) [26].

Моделирование процесса в MATLAB Simulink подтверждает адекватность модели.

В настоящем исследовании показана возможность эффективного использования параметризации Youla – Kucera в задаче моделирования автоматической системы управления антиблокировочной системы торможения наземного колесного транспорта. Дальнейшее направление исследований видится в решении задачи с использованием нейронечеткой аппроксимации процессов.

Результаты были получены при поддержке РФФИ, (19-48-340016).

Литература

1. Микеров А.Г. Классики теории автоматического регулирования / А.Г. Микеров / Control Engineering – Россия. – 2015. - №1 (55). – с. 76 – 79

2. Kucera V. A Method to Teach the Parameterization of All Stabilizing Controllers / V.Kucera / 18th IFAC World Congress. – 2011. – August 28 – September 2. – pp. 6355 – 6360

3. Reif K. Brakes, Brake Control and Driver Assistance Systems. BOSCH professional automotive information / K. Reif / Springer. – 2014. – 275 p.

4. Denton T. Automobile Electrical and Electronic Systems / T. Denton / Elsevier. – 2004

5. Kosko B. Fuzzy Systems as Universal Approximators / B. Kosko / IEEE Trans. on Computers. – 1992. – Vol. 43. - № 11. – pp. 1153 – 1162

6. Hornik K. Multilayer Feedforward Networks are Universal Approximators / K. Hornik / Neural Networks. – 1989. – vol. 2. – pp. 359 – 366

7. Ferro J. Design and Simulation of an ABS Control Scheme for a Formula Student Prototype / J. Ferro / Tecnico Lisboa / MSc Thesis. – 2014

8. Yadav D.K. Modeling an Intelligent Controller for Anti-Lock Braking System / D.K. Yadav / International Journal of Technical Research and Applications. – 2015. – vol. 3. – issue 4. – pp. 122 – 126

9. Revin A.A. Increase the effectiveness, stability and steerability of the vehicles brake processes / A.A. Revin / Volgograd State Technical University / PhD Thesis. – 1983

10.Pacejka H.B. Tyre and Vehicle Dynamics / H.B. Pacejka / Elsevier. – 2005. – 672 p.

11.Ahmetshin A.M. Adaptive anti-lock braking system for wheeled vehicles / A.M. Ahmetshin / Moscow / PhD Thesis. – 2006

12.Aksjonov A. Design and Simulation of the Robust ABS and ESP Fuzzy Logic Controller / A. Aksjonov / Applied Sciences. – 2016. - №6 (12). http://www.mdpi.com/2076-3417/6/12/382

13.Fedin A.P., Kalinin Ya.V., Marchuk E.A. ANN and elements of differentional games in the model of regulated wheel slippage process in a braking mode / A.P. Fedin, Ya.V.Kalinin, E.A.Marchuk / NIR. – 2020

14.Fedin A.P., Kalinin Ya.V., Marchuk E.A. Antilock braking system fuzzy controller optimization with a genetic algorithm in a form of cellular automaton / A.P. Fedin, Ya.V.Kalinin, E.A.Marchuk / DCNAIR-2020. – 2020

15.Larin, V.B., Naumenko, K.I., Suntsev, V.N. Spectral Methods for Synthesis of Linear Systems with Feedback (in Russian) / V.B. Larin, K.I. Naumenko, V.N. Suntsev / Naukova Dumka, Kiev, Ukraine. – 1971

16.Kučera, V. Stability of discrete linear control systems / Kučera, V. / Proc. 6th IFAC World Congress. – 1975. – vol. 8(1). – pp. 573 – 578

17.Youla, D.C., Bongiorno, J.J., Jabr, H.A. Modern Wiener-Hopf design of optimal controllers, Part I: The single-input case / D.C. Youla, J.J.Bongiorno, H.A. Jabr / IEEE Trans. Auto. Control. – 1976. – vol. 21. – pp. 3 – 14

18.Youla, D.C., Jabr, H.A. , Bongiorno J.J. Modern Wiener-Hopf design of optimal controllers, Part II: The multivariable case / D.C. Youla, H.A. Jabr, J.J.Bongiorno / IEEE Trans. Auto. Control. – 1976. – vol. 21. – pp. 319 – 338

19.Pommaret J.F., Quadrat A. Generalized Bezout Identity / J.F. Pommaret, A. Quadrat / Applicable Algebra in Engineering, Communication and Computing. – 1998. – vol.9, pp. 91 – 116

20.McFarlane D., Glover K. Robust controller design using normalized coprime factor plant descriptions / D. McFarlane, K. Glover / Springer, London. – 1990

21.Vidyasagar M. Control System Synthesis: A Factorization Approach, Part I / M. Vidyasagar / Morgan & Claypool. – 2011

22.Vidyasagar M. Control System Synthesis: A Factorization Approach, Part II / M. Vidyasagar / Morgan & Claypool. – 2011

23.Mikles J., Cirka L., Fikar M. Youla – Kucera Parameterization in Self-Tuning LQ Control of a Chemical Reactor / J. Mikles, L. Cirka, M. Fikar / Slovak University of Technology in Bratislava

24.Shoukry Y., Martin P., Tabuada P., Srivastava M. Non-Invasive Spoofing Attacks for Anti-Lock Braking Systems / Y. Shoukry, P. Martin, P. Tabuada, M. Srivastava / Cryptographic Hardware and Embedded Systems – CHES 2013. – pp. 55 – 72

25.Mahtout I., Navas F., Milanes V., Nashashibi F. Advances in Youla – Kucera Parameterization: A Review / I. Mahtout, F. Navas, V. Milanes, F. Nashashibi / Annual Reviews in Control. – 2020. https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2020.04.015

26.Polak, E., Salcudean S. On the design of linear multivariable feedback systems via constrained nondifferentiable optimization in h-infinity spaces / E. Polak, , S. Salcudean / IEEE Transactions on Automatic Control. – 1989. – vol. 34. – issue 3. – pp. 268 – 276

И.И. Нестеров, Н.В. Мальгин, А.Б. Кутман, А.А. Торопков

ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПЛАТФОРМЕННЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ГИРОСТАБИЛИЗИРОВАННЫХ ПЛАТФОРМ ПРОИЗВОДСТВА ООО «ГИРОЛАБ» ДЛЯ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РАЗРАБОТКИ

ООО «Гиролаб», г. Пермь, inbox@gyrolab.ru

Аннотация

Приведен обзор достигнутых результатов и перспективных разработок ООО «Гиролаб» в области инерциальных навигационных систем (БИНС). Системы построены на базе МЭМС, волоконно-оптических и кольцевых лазерных гироскопов и предназначены для решения задач навигации, стабилизации, ориентации, контроля и диагностики объектов наземного / подземного, авиационного, морского/ подводного назначения.

БИНС «Гиролаб» прошли многократные испытания, в том числе на спецтехнике, включая ударные и вибрационные испытания с большими перегрузками.

Ключевые слова: БИНС, бесплатформенные инерциальные навигационные системы, МЭМС, микроэлектромеханические системы, волоконно-оптические гироскопы, кольцевые лазерные гироскопы, ГСП, гиростабилизированные платформы.

I.I. Nesterov, N.V. Malgin, A.B. Kutman, A.A. Toropkov

APPLICATION EXPERIENCE OF STRAPDOWN INERTIAL NAVIGATION SYSTEMS AND GYROSTABILIZED PLATFORMS FOR EXTREME ROBOTICS PRODUCED BY GYROLAB LLC. PERSPECTIVE ENGINEERING

Gyrolab LLC, Perm, inbox@gyrolab.ru

Abstract

A review of achieved results and future developments of LLC Gyrolab in the field of inertial navigation systems (SINS) is given. The systems are built on the basis of MEMS, fiber-optic and ring laser gyroscopes and are intended for solving problems of navigation, stabilization, orientation, monitoring and diagnostics of land / underground, aviation, sea / underwater objects.

SINS produced by Gyrolab LLC passed multiple tests, including on special equipment, including shock and vibration tests with large overloads.

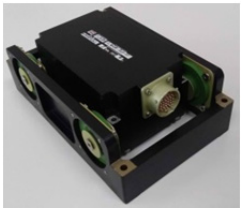
Key words: SINS, strapdown inertial navigation systems, MEMS, microelectromechanical systems, fiber-optic gyroscopes, ring laser gyroscopes, GSP, gyrostabilized platforms.

ООО «Гиролаб» с 2009 года разрабатывает и с 2013 года серийно выпускает бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС) различного класса точности на базе микроэлектромеханических датчиков (МЭМС), волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) и кварцевых акселерометров, а с 2018 года также на кольцевых лазерных гироскопах (КЛГ).

При поставках изделий наше предприятие особое внимание уделяет согласованию Заказчиком технического задания (ТЗ), где скрупулезно прописываются все параметры, отвечающие требованиям условий применения БИНС на конкретном объекте и для решения конкретного круга задач. Для выполнения требований ТЗ, выходящих за рамки серийных изделий, мы выполняем необходимые доработки и модификацию конструктивных, схемных и программно-математических решений. БИНС «Гиролаб» прошли многократные испытания, в том числе на спецтехнике, включая ударные и вибрационные испытания с большими перегрузками. Изделия поставляются широкому кругу заказчиков как для военного так и гражданского применений.

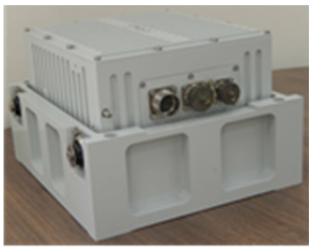
На рис. 1 приведена линейка базовых моделей БИНС, производимых ООО «Гиролаб» на сегодняшний день.

ГЛ-ВГ110


ГЛ-ВГ203

ГЛ-90

ГЛ-100


ГЛ-150

ГЛ-150.052

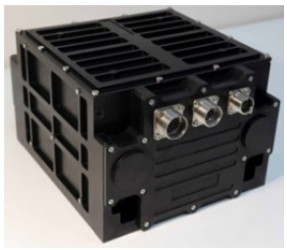

ГЛ-180.300

Рисунок 1 – Линейка базовых моделей БИНС производства ООО «Гиролаб»

Вся линейка приборов построена по единой концепции – полная унификация алгоритмического и программного обеспечения, максимальная унификация конструктивных и схемотехнических решений и применение унифицированого протокола информационного взаимодействия. Такая концепция позволяет пользователю легко менять одну систему на другую при изменении точностных требований. Все БИНС «Гиролаб» поддерживают комплексирование со спутниковыми навигационными системами (СНС), датчиками скорости различного типа (одометр, СВС, лаг), с баровысотомером и трехосевым магнитометром. Возможно подключение и других источников дополнительной информации.

БИНС на базе МЭМС

Рисунок 2 – БИНС ГЛ-ВГ109 исполнения OEM и в корпусе

Произведены более 1 000 единиц БИНС МЭМС модели «ГЛ-ВГ109» в бескорпусном (OEM) и 10 изделий в металлическом пыле-брызго защищенном корпусе (Рис.2), которые нашли основное применение в системах стабилизации и в качестве гировертикали в составе пилотажно-навигационных комплексов (ПНК) для легкомоторной авиации. Применяются также в составе оборудования малоразмерных необитаемых подводных аппаратов (АНПА). С 2019 года данному изделию на смену пришла обновлённая модель «ГЛ-ВГ110». В новом приборе применены передовые решения повышающие, прежде всего, функциональные возможности его применения, а также и основные точностные параметры. Вместо 3-х одноосных акселерометров применен кластер из 4-х трехосных акселерометров, рассчитанных на повышение точности измерений (за счет избыточности) и масштабируемость в диапазоне ускорений до ±40g. Теперь применен тот же высокопроизводительный микроконтроллер, что и в высокоточных системах. В состав БИНС введены два новых датчика – баровысотомер (для демпфирования неустойчивого вертикального канала, что особенно актуально для грубых датчиков МЭМС) и трехосный магнитометр (для демпфирования курсового канала). Добавлен новый высокоскоростной и гальванически развязанный интерфейс Ethernet. Все указанные дополнения выполнены при сохранении габаритно-присоединительных размеров и минимальных изменениях схемы внешних подключений. Основные технические характеристики приведены в следующем разделе и совмещены (для сравнения) с изделием следующего класса «ГЛ-ВГ203».

БИНС на базе волоконно-оптических гироскопов с разомкнутым контуром

Модели этой линейки (рис. 3), разработанные с применением гироскопов российского производства хорошо себя зарекомендовали в системах стабилизации, в том числе в условиях повышен-

ных ударных воздействий в составе амортизационной платформы (рис.4).

Рисунок 3

Рисунок 4

В 2019 году запущена в производство новая модель БИНС на волоконно-оптических гироскопах с разомкнутым контуром — «ГЛ-ВГ204» - которая обладает не значительно большей массой и габаритами (0,950 кг, 124 х 106 х 78 мм), но зато существенно более низкой ценой. Кроме того расширена функциональность и повышены точностные характеристики прибора за счет таких же доработок, как и в изделии «ГЛ-ВГ110». Дополнительно повышена надежность функционирования электроники - выполнена полная гальваническая развязка сигнальной части от линий питания. После завершения испытаний «ГЛ-ВГ204» аналогичные изменения будут введены в изделие ГЛ-ВГ203. До конца 2020 года запланированы испытания «ГЛ-ВГ204» в составе пилотажно- навигационного комплекса авиационного применения.

В табл. 1 приведены сравнительные характеристики БИНС «ГЛ-ВГ109» и «ГЛ-ВГ203».

Таблица 1 – Характеристики БИНС «ГЛ-ВГ109» и «ГЛ-ВГ203»

Курс (σ), °	Уточняется	15 2 (наличие СНС и скорости объекта > 2 м/с)
Угол рыскания, уход (σ), ° / час	50	10
Крен, Тангаж (σ), °	0.4 (наличие одометра / СВС / лага или СНС) 1.0 (отсутствие одометра / СВС / лага и СНС)	0.2 (наличие одометра / СВС / лага или СНС) 0.9 (отсутствие одометра / СВС / лага и СНС)
Точность счисления пройденного пути (σ) (требуется одометр / СВС / лаг)	3 % (от пройденного пути в течении 5 минут после потери данных от СНС)	2 % (от пройденного пути в течении 5 минут после потери данных от СНС)
Погрешность приращения угла рыскания (σ), %	0.8	0.3
Внешние факторы		
Температура (устойчивость), °С	-40… +55	-30… +55
Температура (прочность), °С	-55… +85	-55… +85
Вибрация (прочность) (случайная 20 Hz - 2000 Hz), g	6	6
Удары (прочность) (длительность: 1 мс, форма: ½ синуса), g	90	90
Выходные данные		
Время: функциональной готовности / начальной выставки, сек	0,5/	0,5/
Частота выдачи данных, Hz	500	500
Электрические параметры		
Выходной интерфейс:	RS232, RS485	RS232 (или RS422)
Напряжение питания / потребляемая мощность	9…30 V / <1.5W	9…30 V / <6W
Массогабаритные параметры		
Габаритные размеры, OEM (L x W x H), мм	89x51x17 (OEM вариант)	132 x 80 x 62
Вес, кг	0,125 (OEM вариант)	0.6
Наработка на отказ (расчетная)	40000 часов	20000 часов

БИНС на базе волоконно-оптических гироскопов с замкнутым контуром

БИНС этого класса, построенные на волоконно-оптических гироскопах российского производства, нашли широчайший спектр применения в высокоточных комплексах навигации, стабилизации, ориентации, контроля и диагностики объектов наземного, подземного, авиационного, морского (включая подводное) применения. Данные системы имеют возможность автономного гирокомпасирования.

«ГЛ-90» (рис. 1) – до недавнего времени самая «недорогая» из класса точных БИНС. В настоящее время применяется для решения всего спектра задач навигации, ориентации и стабилизации на объектах наземного и морского применения. Успешно прошла предварительные испытания в составе системы управления роботизированным комплексом. Для решения задач в условиях больших ускорений и ударных воздействий (например, для задач наведения и стабилизации вооружения) применяется в составе амортизатора. В базовом варианте применяется в проекте беспилотного катера. Для применения в составе малоразмерного АНПА (автономного необитаемого подводного аппарата) была поставлена модификация в уменьшенном массо-габарите (рис. 5). Данная система в 2018 г. успешно прошла испытания, в том числе глубоководные. В 2019 г. для применения в составе малоразмерного АНПА по ТЗ Заказчика была поставлена супер легкая модификация «ГЛ-90.008» в пластиковом корпусе (Рис. 6).

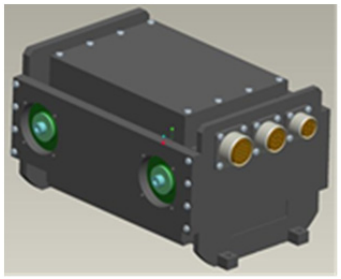


Рисунок 5

Рисунок 6

«ГЛ-100» (рис.1) – система повышенной точности (по сравнению с «ГЛ-90»). Унифицирована с «ГЛ-90» по корпусу, разъемам и электронике. Области применения те же. В 2018 г. для применения в составе гиростабилизированной платформы разработки «Гиролаб» для РЛС авиационного назначения была выполнена модификация корпуса. За счет тщательной проработки каждой детали удалось облегчить систему более чем на 1 кг, что существенно для данных условий эксплуатации. При этом габаритно-присоединительные размеры были сохранены. В настоящее время основное применение – системы наведения и топопривязки наземных объектов. В 2015 г. по ТЗ Заказчика была выпущена модификация «ГЛ-100» на расширенный диапазон температур от минус 60°С.

«ГЛ-150» (рис.1) – система высокой точности. Унифицирована с «ГЛ-90» и «ГЛ-100» в части электроники и разъемных соединителей. Самая востребованная на сегодняшний день система. В 2015 году были проведены сравнительные испытания морского гирокомпаса «ГЛ-150» с гирокомпасом PHINS компании iXBlue (Франция). С результатами можно ознакомиться по ссылке www.гирокомпас.бинс.рф. В 2015 г. по ТЗ Заказчика была выпушена модификация «ГЛ-150» на расширенный диапазон температур от минус 60°С.

«ГЛ-150.052» – система повышенной точности. Применены первичные датчики те же, что и в «ГЛ-150», но за счет применения поворотного основания и алгоритма модулированного гирокомпасирования удалось почти в 2 раза повысить точность начальной выставки системы. С 2014 года поставлено 16 изделий. В настоящее время поставляются для применения в диагностических вагонах-лабораториях РЖД (рис. 6);

В табл. 2 представлены технические характеристики базовых моделей БИНС на основе датчиков ВОГ с замкнутым контуром.

Таблица 2 – Характеристики базовых моделей БИНС ВОГ с замкнутым контуром

Изделие	ГЛ-90	ГЛ-100	ГЛ-150	ГЛ-150/052
Параметры ориентации/навигации				
Погрешность начального определения угла курса (σ), не более, °	0.2 / cos (широты)	0.12 / cos (широты)	0.08 / cos (широты)	0.05 / cos (широты)
Погрешность удержания угла курса за 1 час работы, (σ) не более, °	0.06	0.05	0.04	0.035

Погрешность определения углов Крен, Тангаж (σ), не более, °	0.05	0.04	0.03	0.03
Погрешность счисления координат (σ) с коррекцией от одометра, не более, % (от пройденного пути)	0.6	0.4	0.25	0.2
Погрешность счисления высоты (σ) с коррекцией от одометра, не более, % (от пройденного пути)	0,3	0,3	0,2	0,2
Диапазон: X/Y/Z, °/с	± 300	± 250	± 500	± 500
Диапазон линейных ускорений: X/Y/Z (g)	± 10 (по заказу до 30g)			
Стойкость к воздействию внешних факторов				
Температура (рабочая, устойчивость), °С	-40… +55 (опционально -55...+55)			-40… +55
Температура (предельная, прочность), °С	-55… +85 (опционально -60...+85)			-55… +85
Вибрация (устойчивость), в составе амортизатора, (случайная 60 Hz – 1 KHz), g	5	5	5	5
Устойчивость к ударным воздействиям, в составе амортизатора, (длительность: 1 мс, форма: ½ синуса), g	100	100	100	100
Выходные данные				
Время функциональной готовности, не более, с	5	5	5	5
Время ускоренного гирокомпасирования, не более, с	360	360	360	360
Максимальная частота выдачи данных, Гц	600	640	640	640
Электрические параметры				
Входной/выходной интерфейсы	TCP-IP (Ethernet), RS-422, RS-232, IP, разовые сигналы			
Напряжение питания / потребляемая мощность	18…32 V / <15W	18…32 V / <20W	18…32 V / <25W	18…32 V / <25W (установившееся)
Массогабаритные параметры				
Габаритные размеры; (L x W x H), мм, не более:	120 x 166 x 107	166 x 154 x 155	300 x 293 x 186 (с амортиз.)	Ø302x354
Вес, кг, не более	2,5	3,7	16 (с амортизатором)	25
Наработка на отказ (расчетная), час	20 000	20 000	20 000	20 000

Перспективные разработки ООО «Гиролаб». Введение дополнительных датчиков в состав БИНС

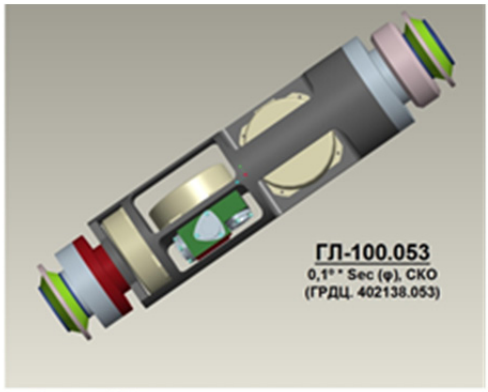
В 2018 г. были проведены исследовательские и опытно-конструкторские работы в части возможности измерения некоторых параметров внешних воздействий в условиях эксплуатации. В состав БИНС были интегрированы:

- модуль 3-х-осного магнитометра;
- модуль датчика барометрического давления.

Кроме электронных модулей были разработаны модели и алгоритмы измерения внешних магнитных полей и барометрического давления, доработано встроенное ПО, опробованы методики калибровки новых элементов в составе БИНС, новые параметры введены в состав протокола информационного взаимодействия. Так же состав интерфейсов прибора был дополнен интерфейсом Ehernet.

Новые области применения БИНС

В 2018 г. БИНС на основе ГЛ-100 была применена для использования в составе ротационной буровой установки для ведения направленного бурения нефтяных скважин. Впервые была применена система разгрузки БИНС от вращения. На рис.7 представлен навигационный блок установки.



1. Диаметр 115мм.
2. Блок разгрузки, вращающийся токоподвод, энкодер и система амортизации.

Рисунок 7 – Навигационный блок 3D-модель и проверочный стенд

В 2018 г. также запущены 2 новых уникальных проекта рудничного применения БИНС:

- Система мониторинга состояния вертикальных проводников – контроль состояния направляющих, по которым движутся сосуды, поднимающие на поверхность добытую руду (рис.8);
- Система навигации добывающего комбайна, обеспечение правильной траектории его движения при зарезании в пласт и добыче руды (рис. 9).

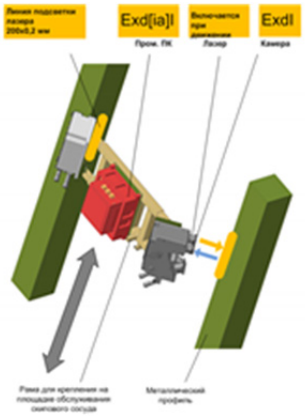


Рисунок 8 – Система мониторинга проводников

Рисунок 9 – Система навигации комбайна

Новые модели БИНС

Разработаны несколько новых моделей БИНС с функцией гирокомпасирования на базе волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) с замкнутым контуром и на базе кольцевых лазерных гироскопов (КЛГ, подробнее www.клг.бинс.рф).

БИНС КЛГ имеют повышенную устойчивость к изменению температур и ударным воздействиям, имеют низкое потребление, высокий ресурс и высокую точность, малый размер и вес с уже встроенной амортизацией.

Применяемые в БИНС кольцевые лазерные гироскопы производятся с применением новых современных технологий и комплектующих. Этим обеспечивается низкое энергопотребление и повышенный ресурс надежности. При высоких точностных характеристиках, стабильности масштабного коэффициента, повышенной устойчивости к воздействию магнитного поля и изменению температуры КЛГ позволяют обеспечивать возможность серийного производства БИНС высокого качества, со стабильными параметрами и надежностью эксплуатации в разных условиях применения.

Таблица 3 – Характеристики новых моделей БИНС

Изделие	ГЛ-80 (ВОГ)	ГЛ-120 (КЛГ)	ГЛ-180 (КЛГ)	ГЛ-300 (КЛГ)
	Облегченный малогабаритный БИНС на базе ВОГ с замкнутым контуром	БИНС на базе кольцевых лазерных гироскопов		

Параметры ориентации/навигации				
Погрешность начального определения угла курса (σ), не более, °	0.4 / cos (широты)	0.18 / cos (широты)	0.07 / cos (широты)	0.04 / cos (широты)
Погрешность удержания угла курса за 1 час работы, (σ) не более, °	0.15	0.04	0.03	0.01
Погрешность определения углов Крен, Тангаж (σ), не более,°	0.1 (неподвижное основание: 0,02)	0.05 во всех режимах 0.015 в статике	0.03	0.02 (неподвижное основание: 0,01)
Погрешность счисления координат (σ) с коррекцией от одометра, не более, % (от пройденного пути)	1	0.5	0.25	0.2
Погрешность счисления высоты (σ) с коррекцией от одометра, не более, % (от пройденного пути)	0,3	0.25	0,2	0.15
Диапазон: X/Y/Z, °/c	±550	±600	±500	±500
Диапазон линейных ускорений: X/Y/Z (g)	± 10 (по заказу до 30g)			
Стойкость к воздействию внешних факторов				
Температура (рабочая, устойчивость), °C	-40… +55 (опционально -55...+55)	-40… +55 (опционально -60...+55)		
Температура (предельная, прочность), °C	-55… +85 (опционально -60...+85)	-55… +85 (опционально -70...+85)		
Вибрация (устойчивость) (случайная 60 Hz–1KHz), g	5 (в составе амортизатора)	5		
Устойчивость к ударным воздействиям (длительность: 1 мс, форма: ½ синуса), g	100 (в составе амортизатора)	100		
Выходные данные				
Время функциональной готовности, не более, с	2	2		
Время ускоренного гирокомпасирования, не более, с	360	360		
Частота навигационных решений, Гц	610	1220 Гц (0,8 мс)		
Электрические параметры				
Входной/выходной интерфейсы	Ethernet (100 Мбит), RS-485 2W/4W, RS-422, RS-232, дискретные сигналы			
Напряжение питания / потребляемая мощность	18…32 В / <15 Вт	18...32 В / < 20 Вт		
Массогабаритные параметры (без амортизатора и в облегченном корпусе до 1,5-2 раз меньше указанных)				
Габаритные размеры (в составе амортизатора / без амортизатора) (L x W x H), мм, не более:	/ 157x79x110 (вписывается в диаметр 119,8 мм)		262x224x167 /	325x269x234 /
Вес (в составе амортизатора / без амортизатора), кг, не более	- / 1,33 кг		9.5 /	22.3 /
Наработка на отказ (расчетная)	20000 часов	15000 часов	15000 часов	15000 часов

Гиростабилизированные платформы (ГСП)

С 2017 года ООО «Гиролаб» начало разрабатывать гиростабилизированные платформы и подвесы (ГСП) по ТЗ заказчиков. На сегодняшний день мы можем разработать и изготовить ГСП для полезной нагрузки до 100 кг. В ближайшей перспективе - до 200 кг. В ГСП применяются бесколлекторные двигатели прямого привода, высокоточные датчики угла поворота (энкодеры) и вра-

щающиеся контакты. Управление ГСП может осуществляться с помощью пространственного джойстика «пропорционального» управления с встроенной микроБИНС, обеспечивающего выработку управляющих воздействий в географической системе координат. (ГСП) представляет собой комплект готовых узлов для построения точных систем ориентации, стабилизации и управления, работающих в условиях внешних возмущающих воздействий.

Разработанный ООО «Гиролаб» блок управления обеспечивает оптимальную работу бесколлекторного двигателями мощностью до 500 Вт и напряжением до 48 В с использованием обратной связи по сигналам с абсолютного энкодера. Конструктивные элементы подвеса и приводов могут быть разработаны под требования заказчика, особенности применения и габариты полезной нагрузки.

На рис. 10 пример гиростабилизированной платформы с интегрированной внутрь корпуса электроподводкой и выводом на оси полезной нагрузки через скользящие контакты 11-ти пользовательских линий (по 1,8 А на линию). Ограничения по углам вращения осей отсутствуют. Масса ГСП 7,5 кг. При полезной уравновешенной нагрузке 5 кг, ускорения по осям до 2000 [град / сек2]. Точность позиционирования ± 30'.

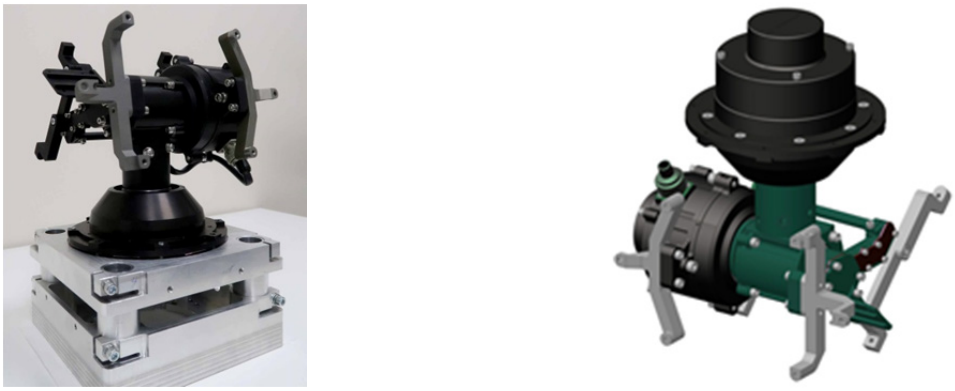


Рисунок 10 – Гиростабилизированная платформа

БИНС в комплекте с ГСП выполняет:

- стабилизацию полезной нагрузки по 2-м осям в географической системе координат (СК);
- управление её положением в связанной с объектом или в географической СК.

В БИНС дополнительно реализован контур настройки параметров управления приводами, доступный для пользователя.

С.В. Голубев, И.В. Поляков

ПОДХОДЫ К ДЕМОНТАЖУ И ФРАГМЕНТАЦИИ КОНСТРУКЦИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ВЫВОДЕ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород, golubevsv@okbm.nnov.ru, polyakoviv@okbm.nnov.ru

Аннотация

В докладе рассматривается состояние дел по выводу из эксплуатации российских атомных реакторных установок, в том числе исследовательских. Приведены подходы к демонтажу и фрагментации конструкций и оборудования при выводе из эксплуатации исследовательского тяжеловодного реактора ОК-187 (ИТВР ИТЭФ, г. Москва). Рассматриваются варианты использования принятых решений применительно к ВВЭР-210 и ВВЭР-365 (блоки 1 и 2 Нововоронежской АЭС, г. Нововоронеж). Сделаны выводы о необходимости разработки и/или внедрения типового ряда отечественных специализированных технологий и технических средств для демонтажа и фрагментации конструкций и оборудования при выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии.

Ключевые слова: демонтаж, фрагментация, вывод из эксплуатации, исследовательский реактор, рабочая документация, нестандартное оборудование, оснастка, экран, дисковая пила, робототехника, специальный контейнер, уровень излучения.

S.V. Golubev, I.V. Polyakov

APPROACHES TO THE DISMANTLING AND FRAGMENTATION OF THE STRUCTURES AND EQUIPMENT DURING DECOMMISSIONING OF NUCLEAR FACILITIES

JSC «Afrikantov OKBM», Nizhny Novgorod, golubevsv@okbm.nnov.ru, polyakoviv@okbm.nnov.ru

Abstract

The presentation discusses the status of the decommissioning of Russian nuclear power plants including the research facilities. The presentation provides the approaches to dismantling and fragmentation of structures and equipment during decommissioning of the research heavy water reactor OK-187 (RHWR ITEP, Moscow). There are discussed the variant of the use of the taken solutions applicable to VVER-210 and VVER-365 (units 1 and 2 of the Novovoronezh nuclear power station). The conclusions are made relatively to the requirement to develop and /or introduction of a typical row of ingenious specialized technologies and technical means for dismantling and fragmentation of the structures and equipment during decommissioning of nuclear power facilities.

Key words: dismantling, fragmentation, decommissioning, research reactor, working documentation, non-standard equipment, tools, accessories, shield, rotary saw, robotics, special container, radiation level.

По данным подготовленного МАГАТЭ «Обзора ядерных технологий-2016», по состоянию на конец 2015 года в мире насчитывалось 246 действующих исследовательских реакторов в 55 странах и свыше 180 реакторов, которые уже остановлены или выводятся из эксплуатации. Полностью выведены из эксплуатации более 300 исследовательских реакторов и критических стендов. Возраст около половины всех эксплуатируемых сейчас исследовательских реакторов более 40 лет, в связи с чем перед эксплуатирующими организациями сегодня стоят две главные задачи – управление старением и вывод из эксплуатации этих объектов использования атомной энергии.

В настоящее время в России остановлено, но из эксплуатации не выведено 14 атомных реакторных установок, и прогнозируется, что к 2030 г. будут остановлены еще 10. Большинство действующих исследовательских установок эксплуатируются более 35-40 лет, что увеличивает риск потери знаний об особенностях и истории их эксплуатации в связи с уходом опытного персонала по причине его естественного старения. Это позволяет сказать, что проблемы вывода из эксплуатации российских установок требуют наискорейшего и всестороннего их рассмотрения, что необходимо для принятия взвешенных решений и их последующего отражения в национальной технической политике.

В настоящее время для получения разрешения на сооружение исследовательского реактора организация, которая в будущем будет его эксплуатировать, должна представить предварительный план вывода новой установки из эксплуатации после ее окончательной остановки. Однако в 1950-е, 1960-е, 1970-е годы, когда было построено большинство исследовательских реакторов, такого требования не было. В результате в исследовательских центрах стоит большое количество неиспользуемых реакторов, поскольку у эксплуатирующих организаций нет надлежащих планов их вывода из эксплуатации.

Несмотря на меньшую мощность и размеры, вывести из эксплуатации исследовательские реакторы в некоторых отношениях сложнее, чем реакторы энергетические. Они нередко размещаются в исследовательском институте, при этом вокруг расположены другие используемые помещения и здания. Исследовательский реактор может быть соединен с лабораториями или другими исследовательскими установками либо иметь с ними общие системы, например, общий резервуар для хранения отходов.

В настоящем докладе рассматриваются подходы к демонтажу и фрагментации конструкций и оборудования при выводе из эксплуатации исследовательского тяжеловодного реактора (ИТВР ИТЭФ, г. Москва).

Исследовательский тяжеловодный реактор ОК-187 (ИТВР) находится на территории «Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»« (ИТЭФ) в густонаселенном районе города Москвы. В связи с этим наиболее приемлемым вариантом вывода из эксплуатации является вариант полного демонтажа оборудования ИТВР, включая бетонную защиту.

В 1986 году ИТВР был остановлен. Весь период функционирования ИТВР характеризуется его безаварийной работой.

В 2016 году выполнено комплексное инженерное и радиационное обследование (КИРО).

В 2017 году разработан проект вывода из эксплуатации ИТВР.

В 2018 году разработана рабочая документация по выводу из эксплуатации (в т.ч. технологические карты на демонтаж оборудования и конструкторская документация на нестандартное оборудование и оснастку).

В настоящее время идет изготовление нестандартного оборудования и оснастки для демонтажа оборудования ИТВР.

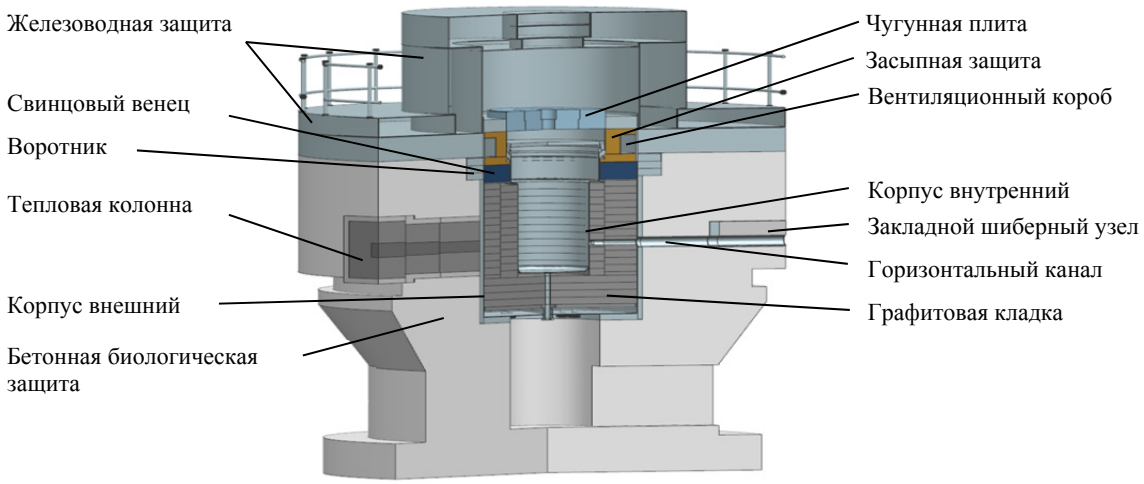


Рисунок 1 – Общий вид реакторной установки

По результатам КИРО выполнен расчётный анализ радиационной обстановки в местах проведения работ.

Расчеты показали, что максимальные уровни излучения ожидаются при выполнении следующих работ:

- разрезка и подъем нижней части внутреннего корпуса;
- демонтаж графитовой кладки шахты реактора в стадии его завершения;
- разрезка обечайки внешнего корпуса;
- выгрузка и разрезка днища внешнего корпуса;
- демонтаж конструкций закладных шиберных узлов.

Прогнозируемые уровни излучения от нижней части внутреннего корпуса, обечайки и днища внешнего корпуса достигают значений более 10 мЗв/ч.

Операции по разрезке демонтированных конструкций реактора требуют использования устройств и мер для ограничения облучения персонала.

Для снижения мощности дозы, получаемой персоналом, выполняющим работы, предусмотрено применение защитных костюмов, экранов, временной биологической защиты (свинцовых листов), при максимально прогнозируемых уровнях излучения предусмотрено применение специальных радиационно-стойких устройств (робототехники) для дистанционного демонтажа и фрагментации, специальных контейнеров для обращения с высокоактивными изделиями.

При демонтаже и резке конструкций ИТВР предусмотрены специальные технологические укрытия с открывающейся крышей (вплотную к тепловой колонне и над шахтой реактора), технические средства для очистки воздуха в помещении от радиоактивной пыли и аэрозолей (удаление пыли с помощью штатной или местной вентиляции оснащенной фильтрами).

Краткая последовательность выполнения работ:

- демонтаж железоводной защиты реактора;
- демонтаж конструкций реактора над свинцовым венцом;
- демонтаж оборудования горизонтальных экспериментальных каналов;
- демонтаж нижней водяной коммуникации в подреакторном помещении;
- демонтаж внутреннего корпуса;
- демонтаж и фрагментация свинцового венца;
- демонтаж графитовой кладки тепловой колонны;
- демонтаж графитовой кладки реактора;
- демонтаж внешнего корпуса реактора;
- демонтаж закладных шиберных узлов горизонтальных экспериментальных каналов;
- демонтаж металлоконструкций тепловой колонны.

На каждый из выше указанных видов работ на основании проектной документации разработаны отдельные технологические карты выполнения демонтажных работ.

Для обеспечения безопасного выполнения работ разработаны следующие специальные средства технологического оснащения:

1. Вкладыш контейнера для транспортирования блоков графитовой кладки.
2. Захват вкладыша контейнера.
3. Комплект защитных заглушек с ключом для установки в горизонтальные каналы.
4. Комплект устройств для подрыва и демонтажа закладных шиберных узлов горизонтальных каналов.
5. Комплект устройств для демонтажа графитовой кладки и внешнего корпуса реактора.
6. Укрытия технологические (шатры) для обеспечения демонтажа корпуса реактора, графитовой кладки реактора и тепловой колонны.
7. Траверса для демонтажа внутреннего корпуса.

Для обеспечения безопасного выполнения работ выбраны для закупки следующие специальные устройства:

1. В качестве машины, позволяющей дистанционно выполнять радиационно-опасные работы выбрана дистанционно-управляемая электрогидравлическая машина (далее по тексту – ДУЭМ) Brokk 110 с комплектом сменного навесного оборудования (ковши, грейферы, захваты, дисковые пилы и вакуумный захват и т.д.).
2. Для разрезки свинцового венца предполагается использовать машину дисковой резки Braun (Австрия). Данная машина, установленная на специальную раму, позволяет выполнять дистанционную фрагментацию свинцового венца.
3. Подъемник вакуумный (устанавливается на горизонтальные поверхности грузов).
4. Подъемник вакуумный (устанавливается на вертикальные поверхности грузов).
5. Захват электромагнитный.

Рисунок 2 – Устройство ДУЭМ Brokk 110

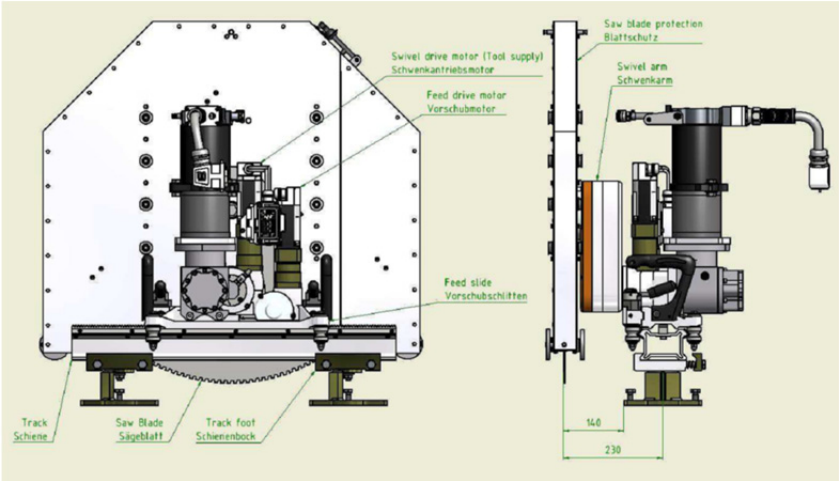


Рисунок 3 – Устройство дисковой резки Braun

Остановимся подробнее на операциях, в которых используется устройство дисковой резки Braun (демонтаж и фрагментация свинцового венца) и ДУЭМ Brokk 110 (демонтаж графитовой кладки тепловой колонны и демонтаж внешнего корпуса реактора).

1. Демонтаж и фрагментация свинцового венца:

- заполнение внешнего корпуса реактора водой;
- демонтаж бетонной защиты реактора до отметки + 2,5 м;
- монтаж шатра;
- установка на графитовую кладку защитной плиты;

Примечание: по предварительным расчетам, нижняя часть свинцового венца внешнего корпуса реактора относится к среднеактивным отходам (САО), верхняя часть свинцового венца относится к низкоактивным отходам (НАО).

- срезание, отделение фланца от свинцового венца, его демонтаж;
- выполнение вертикальных (радиальных и хордовых) и горизонтальных резов с помощью машины BRAUN;
- приварка технологических проушин;
- выполнение горизонтальных резов с отделением оставшихся фрагментов от массива свинцового венца;
- демонтаж фрагментов с помощью мостового крана и перемещение на участок упаковки;
- выполнение разделительного горизонтального кругового реза, с отделением фрагментов от массива свинцового венца.

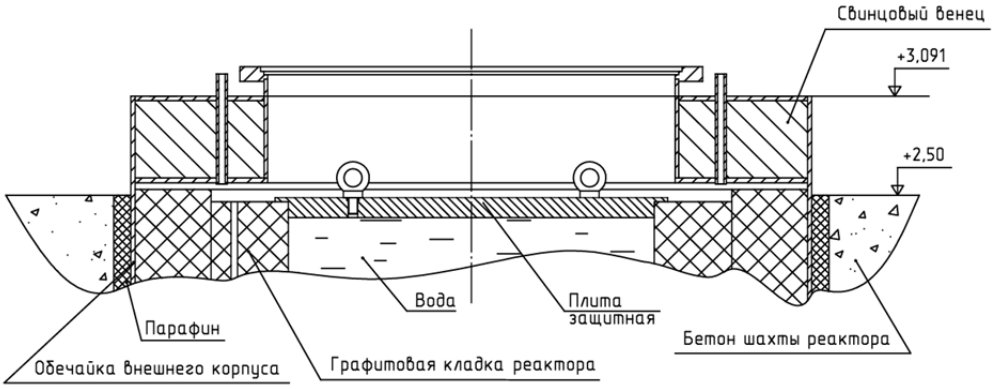


Рисунок 4 – Свинцовый венец

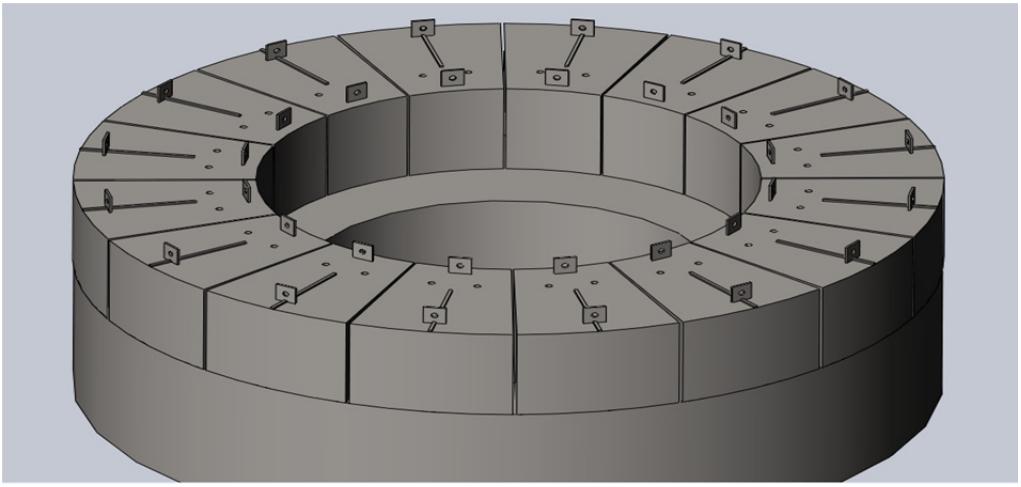


Рисунок 5 – Схема разрезки свинцового венца с помощью устройства Braun

2. Демонтаж графитовой кладки тепловой колонны осуществляется с помощью ДУЭМ Brokk 110 с комплектом навесного оборудования.

Демонтаж графитовой кладки реактора включает в себя:

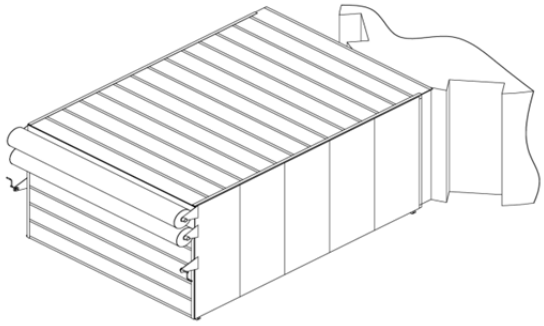
I этап демонтажа:

- монтаж системы телевизионной специальной внутри шатра на шахте реактора с выводом сигнала на рабочее место оператора;
- установка на ДУЭМ Brokk 110 вакуумного захвата;
- снижение уровня воды во внешнем корпусе реактора до уровня середины графитовых блоков демонтируемого ряда кладки и последовательный демонтаж графитовых блоков;
- захват вкладыша контейнера захватом, перемещение его в контейнер НЗК-150-1,5П;

Возможен демонтаж графитовой кладки реактора при помощи подъемника вакуумного AL-BUTLER 200.

II этап демонтажа:

- монтаж платформы демонтажной;
- демонтаж графитовой кладки с помощью ДУЭМ Brokk 110;
- последовательное опускание плиты с ДУЭМ Brokk 110 с помощью захвата и мостового крана;
- захват вкладыша контейнера захватом, перемещение его в контейнер НЗК-150-1,5П.



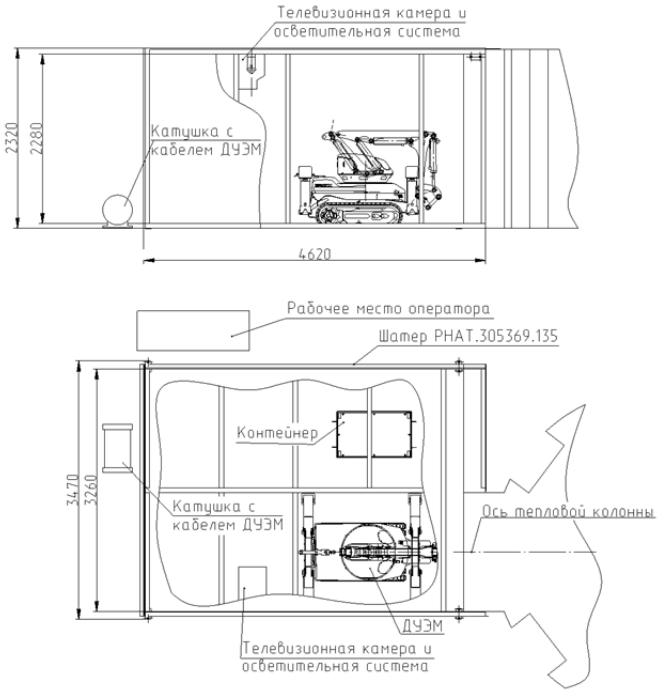


Рисунок 6 – Схема установки шатра, ДУЭМ Brokk 110 и систем видеонаблюдения и освещения

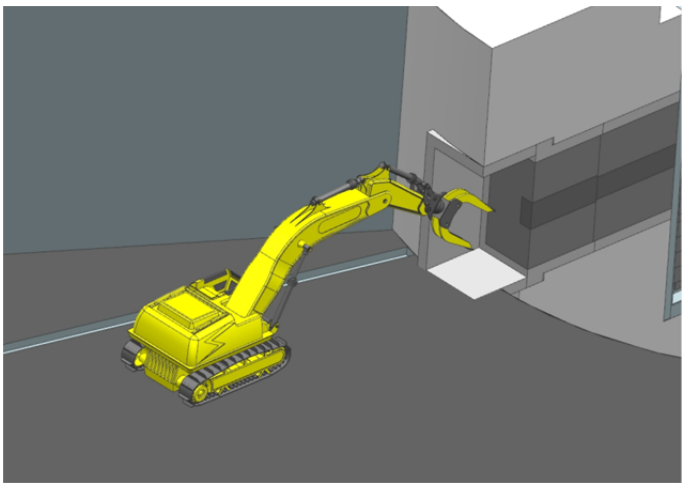


Рисунок 7 – Демонтаж графитовой кладки тепловой колонны

3. Демонтаж внешнего корпуса реактора включает в себя два этапа:

I этап демонтажа:

– разрезка обечайки внешнего корпуса на фрагменты при помощи ДУЭМ Brokk 110 с дисковой пилой;

– демонтаж и загрузка фрагментов обечайки в контейнер НЗК-150-1,5П с помощью мостового крана и подъемника вакуумного или захвата с устройством поворотным;

– транспортировка контейнеров НЗК-150-1,5П, заполненных фрагментами обечайки, с шахты реактора на участок упаковки;

– демонтаж парафина с поверхности шахты реактора при помощи ДУЭМ с ковшом, подбор и загрузка обломков парафина с крышки и с плиты платформы демонтажной во вкладыши контейнеров при помощи ДУЭМ Brokk 110;

– транспортировка вкладышей контейнеров с парафином в контейнеры НЗК-150-1,5П с помощью мостового крана г/п 5 т и захвата для вкладыша контейнера.

II этап демонтажа:

– подрыв двойного днища внешнего корпуса реактора с помощью устройства для подрыва;

– демонтаж двойного днища из шахты реактора на участок дезактивации с помощью мостового крана и электромагнита грузоподъемного.

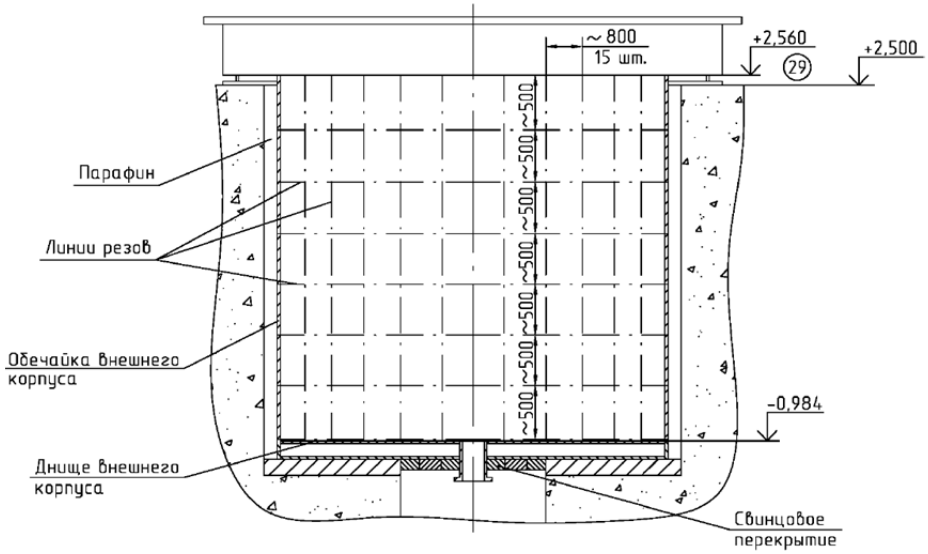


Рисунок 8 – Демонтаж внешнего корпуса реактора

Принятые решения и применяемые средства позволяют вывести из эксплуатации ИТВР с минимальными дозовыми нагрузками на персонал и окружающую среду.

Учитывая, что в АО «ОКБМ Африкантов» разработан комплект рабочей документации на демонтаж оборудования установки ОК-187 (ИТВР ИТЭФ, г. Москва), рассматривались варианты использования принятых решений применительно к ВВЭР-210 и ВВЭР-365 (блоки 1 и 2 НВАЭС, г. Нововоронеж).

Также АО «ОКБМ Африкантов» имеет опыт по выводу из эксплуатации судовых реакторных установок.

Ключевые проблемы вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии, как исследовательских реакторов, так и энергетических, кроме всего прочего, обуславливают необходимость разработки и/или внедрения типового ряда отечественных специализированных технологий и технических средств, обеспечивающих выполнение демонтажа и фрагментации дистанционным образом, то есть с помощью специальной робототехники.

Недостаток отечественных технологических и технических разработок может быть скомпенсирован (при достаточности финансирования) за счет коммерческих предложений, в избытке имеющихся на международном рынке. Однако это ведет к деградации отечественных организаций, специализирующихся в области разработок требуемого технологического оснащения (робототехники), что в конечном итоге негативно отразится на культуре безопасности и качестве выполнения работ по выводу из эксплуатации российских объектов использования атомной энергии.

Литература

1. Ю.А. Зверков, О.П. Иванов, В.И. Колядин, А.В. Лемус, В.И. Павленко, В.Е. Степанов, С.Ю. Фадин, А.Д. Шиша. Анализ проблем подготовки и вывода из эксплуатации российских исследовательских реакторов. – Атомная энергия, 13.04.2012 г., https://www.atomic-energy.ru/articles/2012/04/13/32657.

2. В.А. Устюгов. Ключевые технологические операции, предусмотренные проектом вывода из эксплуатации исследовательского тяжеловодного реактора (ИТВР);

3. В.В. Кокурин «Определение проблемных вопросов по демонтажу конструкций исследовательского реактора HWR-101 в пределах бетонной защиты»;

4. С.А. Душев, В.В. Кокурин, И.А. Ерофеев «Концептуальный подход к демонтажу и фрагментации конструкций реакторов ВВЭР-210 и ВВЭР-365 на блоках 1 и 2 НВАЭС».

А.А. Иванов

ФОРМАЛИЗМ ДУАЛЬНЫХ ЧИСЕЛ В ЗАДАЧЕ РАВНОВЕСИЯ НЕСУЩЕГО ТЕЛА НА ШЕРОХОВАТОЙ ПЛОСКОСТИ

ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург, al_ivanov@rtc.ru

Аннотация

В докладе рассматривается задача равновесия на шероховатой наклонной плоскости платформы с подвижной нагрузкой. Область контакта платформы с опорной плоскостью задаётся множеством точек с заданной площадью пятна контакта. Реакции плоскости в точках контакта полагаются пропорциональными деформации её в направлении нормали.

Для вывода уравнений равновесия применён формализм дуальных чисел, который позволил получить строгий вывод уравнений равновесия в обобщённых координатах, задающих положение несущего тела на плоскости и девиации несущего тела относительно положения равновесия. Для шести обобщённых координат сформулированы девять уравнений. Дополнительные дифференциально-алгебраические уравнения позволяют строить уравнения наблюдателей, согласованные с математической моделью механической системы.

Рассмотрены условия неподвижности несущего тела на поверхности с сухим трением. Получены алгебраические выражения для неравенств, задающих область допустимых внешних воздействий и законов движения несомых тел. Рассмотрена задача остойчивости несущего тела на плоскости. Получены условия неопрокидывания. Предложен критерий оценки запаса остойчивости.

Используемый математический аппарат имеет перспективу применения в задачах управления движением несущих тел по задаваемым траекториям как при контакте с твёрдыми поверхностями, так и в подвижных средах.

Ключевые слова: мобильная несущая платформа, дуальные числа, равновесие на плоскости, сухое трение, остойчивость на плоскости.

A.A. Ivanov

FORMALISM OF DUAL NUMBERS IN THE PROBLEM OF EQUILIBRIUM OF A CARRIER BODY ON A ROUGH PLANE

Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics Russian Federation, Saint-Petersburg, al_ivanov@rtc.ru

Abstract

The report considers the problem of equilibrium on a rough inclined plane of a platform with a moving load. The contact area of the platform with the reference plane is specified by a set of points with a given area of the contact patch. The reactions of the plane at the points of contact are assumed to be proportional to its deformation in the direction of the normal.

To derive the equilibrium equations, the formalism of dual numbers was applied, which made it possible to obtain a rigorous derivation of the equilibrium equations in generalized coordinates that specify the position of the carrier body on the plane and the deviation of the carrier body relative to the equilibrium position. Nine equations are formulated for six generalized coordinates. Additional differential-algebraic equations allow constructing observer equations consistent with the mathematical model of a mechanical system.

The conditions of motionlessness of the bearing body on the surface with dry friction are considered. Algebraic expressions are obtained for inequalities that define the region of permissible external influences and the laws of motion of carried bodies. The problem of stability of a bearing body on a plane is considered. The conditions of non-tipping are obtained, the criterion for assessing the stability margin is proposed.

The used mathematical apparatus has the prospect of application in the problems of controlling the motion of carrying bodies along given trajectories both in contact with solid surfaces and in moving media.

Key words: mobile bearing platform, dual numbers, balance on a plane, dry friction, stability on a plane.

Для решения задачи управления мобильным робототехническим комплексом, несущим в качестве полезной нагрузки системы тел с заданным относительно платформы законом перемещения, требуется адекватная математическая модель механической системы. Модель должна содержать соотношения для формирования дифференциально-алгебраических наблюдателей, обеспечивающих оценивание внешних воздействий по измеряемым на борту платформы величинам. Равновесие робототехнической мобильной платформы (РМП) с подвижной нагрузкой на шероховатой плоскости является самостоятельной задачей, которая должна рассматриваться как первый этап в построении модели РМП.

Постановка задачи и основные определения

Рассмотрим систему связанных твёрдых тел, состоящую из покоящегося на шероховатой плоскости с нормалью $\bar{\nu}$ несущего тела и движущихся относительно несущего тела по задаваемым законам несомых тел. Несущее тело контактирует с плоскостью в точках, принадлежащих области Ω, ограниченной кусочно-гладким контуром $\partial\Omega$, натянутом на множество контактных точек. Положение точки i системы относительно инерциальной системы отсчёта может быть определено с использованием формализма дуальных чисел [1-3] обобщёнными координатами $\{x, y, \varphi, \theta_\lambda, \theta_\mu, z\}$ и задаваемым в системе координат несущего тела радиус-вектором $\bar{\rho}_i(t)$

$$\bar{R}_i = x\,\bar{i} + y\,\bar{j} + \varepsilon z\,\bar{\nu} + \bar{\bar{P}}_\nu(\varphi)\cdot\bar{\bar{P}}_\mu(\varepsilon\theta_\mu)\cdot\bar{\bar{P}}_\lambda(\varepsilon\theta_\lambda)\cdot\bar{\rho}_i = \bar{R}_{i(\mathrm{m})} + \varepsilon\,\bar{R}_{i(\mathrm{t})}, \quad (1)$$

где x, y - декартовые координаты выбранной за полюс точки O области Ω, φ - угол поворота Ω относительно осей, жёстко связанных с опорной плоскостью, вокруг нормали $\bar{\nu}$, z - координата малого смещения полюса вдоль нормали к деформируемой плоскости, $\bar{\theta} = (\theta_\lambda\bar{\lambda} + \theta_\mu\bar{\mu})$ - вектор поворота вокруг ортов $\bar{\lambda}$ и $\bar{\mu}$ связанной с несущим телом системы координат.

В формуле (1) и далее ε - символ Клиффорда ($\varepsilon^2 = 0$), а индексы (m) и (t) обозначают главную и моментную части вектора в поле дуальных чисел. В соответствии с правилами представления функций над этим полем операторы малого поворота вокруг связанных с телом осей имеют вид

$$\bar{\bar{P}}_\mu(\varepsilon\theta_\mu) = \bar{\bar{E}} + \varepsilon\theta_\mu\bar{\bar{P}}'_\mu(0),\ \bar{\bar{P}}_\lambda(\varepsilon\theta_\lambda) = \bar{\bar{E}} + \varepsilon\theta_\lambda\bar{\bar{P}}'_\lambda(0). \quad (2)$$

Главная и моментная части радиус-вектора $\bar{R}_i$ имеют вид

$$\bar{R}_{i(\mathrm{m})} = \bar{\bar{P}}_\nu\cdot(x\,\tilde{\bar{i}} + y\,\tilde{\bar{j}} + \bar{\rho}_i),\ \bar{R}_{i(\mathrm{t})} = \bar{\bar{P}}_\nu\cdot(\bar{\theta}\times\bar{\rho}_i + z\,\bar{\nu}). \quad (3)$$

Для компактности выражений обозначено: $\bar{\bar{P}}_\nu = \bar{\bar{P}}_\nu(\varphi)$ - тензор поворота вокруг нормали, $\bar{i} = \bar{\bar{P}}_\nu^T\cdot\tilde{\bar{i}}$, $\bar{j} = \bar{\bar{P}}_\nu^T\cdot\tilde{\bar{j}}$ - орты системы координат связанной с опорной плоскости, а $\tilde{\bar{i}}$ и $\tilde{\bar{j}}$ их представления в системе координат, связанной с несущим телом.

Скорость точки i задаются производной определения (1)

$$\begin{aligned}\bar{V}_i = \bar{\bar{P}}_\nu\cdot(&\dot{x}\,\tilde{\bar{i}} + \dot{y}\,\tilde{\bar{j}} + \dot{\varphi}(\bar{\nu}\times\bar{\rho}_i) + \dot{\bar{\rho}}_i + \\ &+ \varepsilon(\dot{\bar{\theta}}\times\bar{\rho}_i + \dot{\varphi}\,\bar{\theta}\,\bar{\nu}^T\cdot\bar{\rho}_i + \dot{z}\,\bar{\nu} + \bar{\theta}\times\dot{\bar{\rho}}_i)) = \bar{\bar{P}}_\nu\cdot(\bar{u}_{i(\mathrm{m})} + \varepsilon\bar{u}_{i(\mathrm{t})})\end{aligned}. \quad (4)$$

В положении равновесия ускорение точки i равно

$$\bar{a}_i = \bar{\bar{P}}_\nu\cdot(\ddot{\bar{\rho}}_i + \varepsilon(\ddot{\bar{\theta}}\times\bar{\rho}_i + \ddot{z}\,\bar{\nu} + 2\dot{\bar{\theta}}\times\dot{\bar{\rho}}_i + \bar{\theta}\times\ddot{\bar{\rho}}_i)) = \bar{\bar{P}}_\nu\cdot(\tilde{\bar{a}}_{i(\mathrm{m})} + \varepsilon\tilde{\bar{a}}_{i(\mathrm{t})}). \quad (5)$$

Возможные перемещения точки i связаны с вариациями обобщённых координат выражением

$$\begin{aligned}\delta\bar{R}_i = \bar{\bar{P}}_\nu\cdot(&\tilde{\bar{i}}\,\delta x + \tilde{\bar{j}}\,\delta y + (\bar{\nu}\times\bar{\rho}_i)\delta\varphi + \\ &+ \varepsilon(\delta\bar{\theta}\times\bar{\rho}_i + \bar{\theta}\,\bar{\nu}^T\cdot\bar{\rho}_i\delta\varphi + \delta z\,\bar{\nu})) = \bar{\bar{P}}_\nu\cdot(\delta\bar{r}_{i(\mathrm{m})} + \varepsilon\,\delta\bar{r}_{i(\mathrm{t})})\end{aligned}. \quad (6)$$

Обобщённые силы инерции точки, соответствующие координатам q_α, с учётом правила умножения дуальных чисел определяются выражением

$$Q_{i\alpha} = -(m_i \frac{\partial \overline{R}_{i(\mathrm{m})}^{\ T}}{\partial q_\alpha} \cdot \overline{a}_{i(\mathrm{m})} + \varepsilon m_i (\frac{\partial \overline{R}_{i(\mathrm{m})}^{\ T}}{\partial q_\alpha} \cdot \overline{a}_{i(\mathrm{t})} + \frac{\partial \overline{R}_{i(\mathrm{t})}^{\ T}}{\partial q_\alpha} \cdot \overline{a}_{i(\mathrm{m})})) = \\ = Q_{i\alpha(\mathrm{m})} + \varepsilon Q_{i\alpha(\mathrm{t})} \quad (7)$$

Уравнения модели

Для точек несущего тела обобщённые силы инерции равны сумме соответствующих сил (7) для всех точек твёрдого тела. Просуммировав по точкам тела и точкам, движущимся относительно него, получаем выражения для обобщённых сил инерции системы

$$Q_{(\mathrm{m})x} = -\overline{\tilde{i}}^T \cdot \ddot{\overline{W}}_r(t),\ Q_{(\mathrm{m})y} = -\overline{\tilde{j}}^T \cdot \ddot{\overline{W}}_r(t),\ Q_{(\mathrm{m})\varphi} = -\overline{\nu}^T \cdot \overline{Z}_r(t) \quad (8)$$

$$Q_{(\mathrm{t})x} = -((\overline{\tilde{i}} \times \ddot{\overline{\theta}})^T \cdot \overline{W}(t) + 2(\overline{\tilde{i}} \times \dot{\overline{\theta}})^T \cdot \dot{\overline{W}}(t) + (\overline{\tilde{i}} \times \overline{\theta})^T \cdot \ddot{\overline{W}}(t)), \quad (9)$$

$$Q_{(\mathrm{t})y} = -((\overline{\tilde{j}} \times \ddot{\overline{\theta}})^T \cdot \overline{W}(t) + 2(\overline{\tilde{j}} \times \dot{\overline{\theta}})^T \cdot \dot{\overline{W}}(t) + (\overline{\tilde{j}} \times \overline{\theta})^T \cdot \ddot{\overline{W}}(t)), \quad (10)$$

$$Q_{(\mathrm{t})\varphi} = -\overline{\nu}^T \cdot ((\overline{\overline{J}}_0 + \overline{\overline{J}}_r(t)) \cdot \ddot{\overline{\theta}} + 2\overline{\overline{Y}}_r(t) \cdot \dot{\overline{\theta}} + (\overline{\theta} \times \overline{Z}_r(t))) \quad (11)$$

$$Q_{(\mathrm{t})\theta_\lambda} = -\overline{\lambda}^{\ T} \cdot \overline{Z}_r(t), \quad (12)$$

$$Q_{(\mathrm{t})\theta_\mu} = -\overline{\mu}^T \cdot \overline{Z}_r(t), \quad (13)$$

$$Q_{(\mathrm{t})z} = -\overline{\nu}^T \cdot \ddot{\overline{W}}_r(t), \quad (14)$$

Формулы (8)-(14) записаны для несущего тела в состоянии равновесия на плоскости, т.е. для $\dot{\varphi} = 0$ и $\ddot{\varphi} = 0$, с обозначениями

$$m = m_b + m_r,\ m_b = \iiint dm, \\ \overline{W}(t) = \overline{W}_b + \overline{W}_r(t) = m\overline{\rho}_C,\ \overline{W}_b = \iiint \overline{\rho} dm = m_b \overline{\rho}_{Cb}, \\ m_r = \sum_i m_i,\ \overline{W}_r(t) = \sum_i m_i \overline{\rho}_i = m_r \overline{\rho}_{Cr}, \\ \overline{\overline{J}}_b = \iiint (\overline{\rho}^T \cdot \overline{\rho}\overline{\overline{E}} - \overline{\rho}\,\overline{\rho}^T) dm,\ \overline{\overline{J}}_r = \sum_i m_i (\overline{\rho}_i^T \cdot \overline{\rho}_i \overline{\overline{E}} - \overline{\rho}_i\,\overline{\rho}_i^T), \\ \overline{Z}_r(t) = \sum_i m_i \overline{\rho}_i \times \ddot{\overline{\rho}}_i, \qquad \overline{\overline{Y}}_r(t) = \sum_i m_i \dot{\overline{\rho}}_i \overline{\rho}_i^T. \quad (15)$$

Задаваемые обобщённые силы определяются поверхностными, объёмными и контактными задаваемыми силами.

Положим, что поверхностные и объёмные силы приложены к несущему твёрдому телу и подвижным телам на нём, тогда соответствующие обобщённые силы равны

$$Q_{L(\mathrm{m})x} = \overline{i}^T \cdot \overline{F}_0,\ Q_{L(\mathrm{m})y} = \overline{j}^T \cdot \overline{F}_0,\ Q_{L(\mathrm{m})\varphi} = \overline{\nu}^T \cdot \overline{M}_0, \\ Q_{L(\mathrm{t})\varphi} = (\overline{M}_0 \times \overline{\nu})^T \cdot \overline{\theta},\ Q_{L(\mathrm{t})x} = Q_{L(\mathrm{t})y} = 0, \\ Q_{L(\mathrm{t})\theta_\lambda} = \overline{\lambda}^T \cdot \overline{M}_0,\ Q_{L(\mathrm{t})\theta_\mu} = \overline{\mu}^T \cdot \overline{M}_0,\ Q_{Lz} = \overline{\nu}^T \cdot \overline{F}_0, \quad (16)$$

где $\overline{F}_0$ - главный вектор, а $\overline{M}_0$ - главный вектор-момент сосредоточенных сил относительно точки O.

Контактные силы действуют на несущее тело в точках $\overline{\rho}_{sk}$, принадлежащих Ω - области контакта с опорной плоскостью. Они представлены силами нормальных и касательных реакции в точке контакта. Полагая, что нормальные реакции пропорциональны упругому перемещению против нормали к плоскости, запишем выражение для вектора силы через проекцию моментной части координаты точки (формула (3)) плоскости несущего тела на нормаль

$$\overline{F}_{s\nu k}=\begin{cases}-c\overline{\nu}(\theta_\mu\overline{\lambda}^T\cdot\overline{\rho}_{sk}-\theta_\lambda\,\overline{\mu}^T\cdot\overline{\rho}_{sk}+z)S_k & ,\quad \theta_\mu\overline{\lambda}^T\cdot\overline{\rho}_{sk}-\theta_\lambda\,\overline{\mu}^T\cdot\overline{\rho}_{sk}+z\le 0\\ 0 & ,\quad \theta_\mu\overline{\lambda}^T\cdot\overline{\rho}_{sk}-\theta_\lambda\,\overline{\mu}^T\cdot\overline{\rho}_{sk}+z>0\end{cases}. \tag{17}$$

Выражение (17) записано для нормальной реакции в точке плоской области возможного контакта, частью которой является область Ω.

С учётом (24) и (6) ненулевые обобщённые силы нормальных реакций выражаются линейными зависимостями от координат θ_λ, θ_μ, z

$$\begin{aligned}
&Q_{s\nu(t)\theta_\lambda}=-c((\theta_\lambda I_{0\lambda}-\theta_\mu I_{0\lambda\mu})-z\,S\overline{\rho}_{Cs}{}^T\cdot\overline{\mu}),\\
&Q_{s\nu(t)\theta_\mu}=-c((-\theta_\lambda I_{0\lambda\mu}+\theta_\mu I_{0\mu})+z\,S\overline{\rho}_{Cs}{}^T\cdot\overline{\lambda}),\\
&Q_{s\nu(t)z}=-c\,(-\theta_\lambda\,\overline{\mu}^T\cdot\overline{\rho}_{Cs}S+\theta_\mu\overline{\lambda}^T\cdot\overline{\rho}_{Cs}S+z\,S),
\end{aligned} \tag{18}$$

где

$I_{0\lambda}=\sum_{k\in\Omega}(\overline{\mu}^T\cdot\overline{\rho}_{sk})^2$, $I_{0\mu}=\sum_{k\in\Omega}(\overline{\lambda}^T\cdot\overline{\rho}_{sk})^2$, $I_{0\lambda\mu}=\sum_{k\in\Omega}(\overline{\lambda}^T\cdot\overline{\rho}_{sk})(\overline{\mu}^T\cdot\overline{\rho}_{sk})$, $S=\sum_{k\in\Omega}S_k$, $\overline{\rho}_{Cs}=\sum_{k\in\Omega}S_k\overline{\rho}_{sk}/S$ - осевые и центробежные моменты, мощность (площадь области) и геометрический центр множества точек контакта.

Необходимое условие покоя несущего тела на плоскости состоит в равенстве нулю суммы обобщённых задаваемых и инерционных сил подвижных точек. Главная часть дуальных обобщённых сил отвечает уравнениям

$$\overline{\lambda}^T\cdot(-\ddot{\overline{W}}_r(t)+\overline{F}_0+\sum_{k\in\Omega}\overline{F}_{s\tau k})=0, \tag{19}$$

$$\overline{\mu}^T\cdot(-\ddot{\overline{W}}_r(t)+\overline{F}_0+\sum_{k\in\Omega}\overline{F}_{s\tau k})=0, \tag{20}$$

$$\overline{\nu}^T\cdot(-\overline{Z}_r(t)+\overline{M}_0+\sum_{k\in\Omega}\overline{\rho}_k\times\overline{F}_{s\tau k})=0. \tag{21}$$

Равенство нулю моментных частей даёт шесть уравнений

$$\overline{\lambda}^T\cdot(\overline{\theta}\times\overline{W}(t))^{\cdot\cdot}=0, \tag{22}$$

$$\overline{\mu}^T\cdot(\overline{\theta}\times\overline{W}(t))^{\cdot\cdot}=0, \tag{23}$$

$$\overline{\nu}^T\cdot(\overline{\overline{J}}_b+\overline{\overline{J}}_r(t))\cdot\ddot{\overline{\theta}}+2\overline{\nu}^T\cdot\dot{\overline{\overline{Y}}}_r(t)\cdot\dot{\overline{\theta}}+((\overline{Z}_r(t)-\overline{M}_0)\times\overline{\nu})^T\cdot\overline{\theta}=0, \tag{24}$$

$$\overline{\lambda}^T\cdot(\overline{Z}_r(t)-\overline{M}_0+c(\overline{\overline{I}}_0\cdot\overline{\theta}+z\,S(\overline{\nu}\times\overline{\rho}_{Cs})))=0, \tag{25}$$

$$\overline{\mu}^T\cdot(\overline{Z}_r(t)-\overline{M}_0+c(\overline{\overline{I}}_0\cdot\overline{\theta}+z\,S(\overline{\nu}\times\overline{\rho}_{Cs})))=0, \tag{26}$$

$$\overline{\nu}^T\cdot(\ddot{\overline{W}}_r(t)-\overline{F}_0)+c\,S(-(\overline{\nu}\times\overline{\rho}_{Cs})^T\cdot\overline{\theta}+z)=0. \tag{27}$$

Для краткости записи использовано обозначение $\overline{\overline{I}}_0$ - плоский тензор инерции множества точек контакта, $\overline{\theta}$ - плоский вектор поворота.

Уравнения динамического и статического равновесия

Уравнения (19)-(21) позволяют определить главный вектор касательных сил и проекцию их главного момента на нормаль. Уравнения (22)-(23) представляют систему линейных однородных дифференциальных уравнений относительно функций θ_λ и θ_μ, решением которой является плоский вектор

$$\bar{\theta}(t) = \frac{(W_{0\nu}\dot{\bar{\theta}}_0 + \dot{W}_{r0\nu}\bar{\theta}_0)t + W_{0\nu}\bar{\theta}_0}{W_\nu(t)} + f_\lambda(t)\,\bar{\lambda} + f_\mu(t)\,\bar{\mu} = \\ = \bar{\Theta}(t) + f_\lambda(t)\,\bar{\lambda} + f_\mu(t)\,\bar{\mu} \quad , \tag{28}$$

$$\text{где } W_{0\nu} = \bar{\nu}^T \cdot \bar{W}(0),\ \dot{W}_{r0\nu} = \bar{\nu}^T \cdot \dot{\bar{W}}_r(0) \quad , \tag{29}$$

а $f_\lambda(t)$, $f_\mu(t)$ - произвольные функции, обращающие равенство (24) в тождество и удовлетворяющие начальным условиям $f_\lambda(0) = 0$, $f_\mu(0) = 0$, $\dot{f}_\lambda(0) = 0$, $\dot{f}_\mu(0) = 0$.

Подстановка (28) в уравнение (27) даёт выражение для z

$$z = (-\ddot{W}_{r\nu}(t) + F_{0\nu}) / (c\,S) + (\bar{\nu} \times \bar{\rho}_{Cs})^T \cdot \bar{\theta}(t) . \tag{30}$$

Формула (30) может быть записана в компактной форме

$$z = \bar{\nu} \cdot \bar{F}(t) / (c\,S) - (\bar{\nu} \times \bar{\rho}_{Cs})^T \cdot \bar{\theta} . \tag{31}$$

Произведение $c\,S$ имеет размерность жёсткости и должно быть выбрано из условия малости деформации опорной поверхности по сравнению с L - габаритом несущего тела, а именно

$$m\,g / (c\,S) \ll \mathrm{L} . \tag{32}$$

Подстановка (30) в (25)-(26) даёт равенства-ограничения для законов движения точек относительно несущего тела.

$$-\bar{\lambda}^T \cdot (\bar{Z}_r(t) - \bar{M}_0 + \bar{\nu} \cdot \bar{F}(t)(\bar{\nu} \times \bar{\rho}_{Cs}) + c(\bar{\bar{I}}_0 - S(\bar{\nu} \times \bar{\rho}_{Cs})(\bar{\nu} \times \bar{\rho}_{Cs})^T) \cdot \bar{\theta}) = 0, \tag{33}$$

$$-\bar{\mu}^T \cdot (\bar{Z}_r(t) - \bar{M}_0 + \bar{\nu} \cdot \bar{F}(t)(\bar{\nu} \times \bar{\rho}_{Cs}) + c(\bar{\bar{I}}_0 - S(\bar{\nu} \times \bar{\rho}_{Cs})(\bar{\nu} \times \bar{\rho}_{Cs})^T) \cdot \bar{\theta}) = 0 . \tag{34}$$

При неизвестных воздействиях $\bar{F}_0, \bar{M}_0$ соотношения (33)-(34) можно рассматривать как соотношения для оценки внешних воздействий по наблюдаемым усилиям в точках контакта.

Условия сохранения покоя несущего тела на шероховатой плоскости имеют вид

$$|\sum_{k\in\Omega} \bar{F}_{s\tau k}| < f_{st} \sum_{k\in\Omega} F_{s\nu k} , \ |\sum_{k\in\Omega} \bar{\nu}^T \cdot (\bar{\rho}_k \times \bar{F}_{s\tau k})| < f_{st.rot} \sum_{k\in\Omega} F_{s\nu k} , \tag{35}$$

Выражая главные векторы нормальных и касательных сил, получаем неравенства, при выполнении которых несущее тело находится в покое в плоскости

$$\sqrt{\frac{|\ddot{\bar{W}}_r(t) - \bar{F}_0|^2}{(\ddot{W}_{r\nu}(t) - F_{0\nu})^2} - 1} < f_{st} , \ \frac{|-Z_{r\nu}(t) + M_{0\nu}|}{\ddot{W}_{r\nu}(t) - F_{0\nu}} < f_{st.rot} , \ \ddot{W}_{r\nu}(t) - F_{0\nu} > 0 . \tag{36}$$

Система касательных контактных сил является плоской и эквивалентна равнодействующей. Система нормальных контактных сил также эквивалентна равнодействующей как система параллельных сил. Условие начала опрокидывания несущего тела возникает при выходе точки приложения равнодействующей контактных нормальных сил за пределы выпуклой оболочки, натянутой на контур $\partial\Omega$.

Положение точки приложения равнодействующей параллельных сил относительно полюса O задаётся классической формулой

$$\bar{\rho}_{OC} = -\bar{V}(\{F_{s\nu k}\bar{\nu}\}) \times \bar{M}_O(\{F_{s\nu k}\bar{\nu}\}) / \bar{V}(\{F_{s\nu k}\bar{\nu}\}) \cdot \bar{V}(\{F_{s\nu k}\bar{\nu}\}) = \\ = -\bar{V}^a_\nu \times \bar{M}^a_{O\perp\nu} / \bar{V}^a_\nu \cdot \bar{V}^a_\nu = -\bar{\nu}^T \cdot \bar{V}^a \bar{\nu} \times (\bar{\bar{E}} - \bar{\nu}\,\bar{\nu}^T) \cdot \bar{M}^a_O / (\bar{\nu}^T \cdot \bar{V}^a)^2 = , \\ = -\bar{\nu} \times (\bar{\lambda}\,\bar{\lambda}^T + \bar{\mu}\,\bar{\mu}^T) \cdot \bar{M}^a_O / \bar{\nu}^T \cdot \bar{V}^a = -(\bar{\mu}\,\bar{\lambda}^T - \bar{\lambda}\,\bar{\mu}^T) \cdot \bar{M}^a_O / \bar{\nu}^T \cdot \bar{V}^a \tag{37}$$

где $\bar{V}(\{F_{s\nu k}\bar{\nu}\})$ и $\bar{M}_O(\{F_{s\nu k}\bar{\nu}\})$ - главный вектор и главный вектор-момент контактных нормальных сил, $\bar{V}^a_\nu$ и $\bar{M}^a_{O\perp\nu}$ параллельная нормали опорной плоскости составляющая главного вектора и параллельная опорной плоскости составляющая главного вектора-момента активных сил.

С учётом (25)-(27) из (37) получаем выражение для радиус-вектора центра приложения равнодействующей нормальной реакции плоскости $\overline{\rho}_{OC}$

$$\overline{\rho}_{OC} = -\frac{(\overline{\mu}\ \overline{\lambda}^T - \overline{\lambda}\ \overline{\mu}^T)\cdot(\overline{M}_0 - \overline{Z}_r(t)))}{\overline{\nu}^T\cdot(-\ddot{\overline{W}}_r(t) + \overline{F}_0)} \in \mathrm{Conv}\ . \tag{38}$$

Условие неопрокидывания несущего тела – принадлежность точки С выпуклой оболочке множества Ω. Оценкой запаса остойчивости может быть площадь области

$$\mathrm{Conv}\,\Omega \bigcap \{(\overline{\theta}\times\overline{\nu})\cdot(\overline{\rho}_{sk} - \overline{\rho}_{OC}) > 0\}\ . \tag{39}$$

Равновесие с неподвижной нагрузкой в поле силы тяжести

Рассмотрим несущее тело на произвольно ориентированной плоскости с неподвижной известным образом расположенной полезной нагрузкой и внешним воздействием сил тяжести. Для рассматриваемого случая статического равновесия (static equilibrium - se) центр приложения равнодействующей согласно формуле (37) задаётся выражением

$$\overline{\rho}_{OC}^{(\mathrm{se})} = -\frac{(\overline{\mu}\ \overline{\lambda}^T - \overline{\lambda}\ \overline{\mu}^T)\cdot(\overline{\rho}_C\times\tilde{\overline{g}})}{\overline{\nu}^T\cdot\tilde{\overline{g}}} \in \mathrm{Conv}\,\Omega\,. \tag{40}$$

Главный вектор нормальных реакций поверхности не зависит от выбора центра приведения, равен по величине главному вектору активных нормальных сил, а следовательно, в силу уравнения (27)

$$cS^{(se)}\,\mathrm{z}^{(se)} = -\,|\,m\overline{\nu}^T\cdot\overline{g}\,| = cS\,\mathrm{z}_0\,. \tag{41}$$

Равновесие нормальных активных сил и сил реакций связей выполняется при приложении равнодействующих в одной и той же точке, т.е. при условии

$$\overline{\rho}_{OC}^{(\mathrm{se})} = \overline{\rho}_{Cs} \tag{42}$$

Уравнение (24) соответствует условию коллинеарности векторов $\overline{\theta}$ и $\overline{M}_{0\perp\nu}$

$$\begin{aligned}(\overline{M}_0\times\overline{\nu})^T\cdot\overline{\theta} &= (\overline{M}_{0\perp\nu}\times\overline{\nu})^T\cdot\overline{\theta} = \\ &= m\,(\overline{\theta}\times(\overline{\rho}_{C\perp\nu}\times\tilde{\overline{g}}_{\nu} + \overline{\rho}_{C\nu}\times\tilde{\overline{g}}_{\perp\nu}))^T\cdot\overline{\nu} = 0\end{aligned}\ , \tag{43}$$

т.е. требованию

$$\overline{M}_{0\perp\nu} = c\kappa\overline{\theta}\ . \tag{44}$$

Уравнения (25)-(26) с учётом (30) могут быть приведены к виду

$$\overline{\lambda}^T\cdot(\overline{M}_{0\perp\nu} - c\overline{\overline{I}}_C^{(se)}\cdot\overline{\theta}) = 0\ , \tag{45}$$

$$\overline{\mu}^T\cdot(\overline{M}_{0\perp\nu} - c\overline{\overline{I}}_C^{(se)}\cdot\overline{\theta}) = 0\ . \tag{46}$$

Подстановка (44) в (45)-(46) приводит к условию

$$(\overline{\overline{I}}_C^{(se)} - \kappa\overline{\overline{E}})\cdot\overline{M}_{0\perp\nu} = 0\ , \tag{47}$$

означающему, что $\overline{M}_{0\perp\nu}$ является собственным вектором плоского тензора инерции множества точек контакта относительно центра приложения равнодействующей внешних контактных нормальных сил. Это означает, что направление вектора $\overline{M}_{0\perp\nu}$ и вектора $\overline{\theta}$ определяют направление главной оси тензора инерции множества Ω. Запас неопрокидывания определяется критерием

$$\mathrm{Conv}\,\Omega \bigcap \{(\overline{\nu}\times(\overline{\rho}_{sk} - \overline{\rho}_{OC}))\cdot\overline{M}_{0\perp\nu} > 0\}\ , \tag{48}$$

что для внешних сил, задаваемых силой тяжести, определяет условие

$$\mathrm{Conv}\,\Omega \bigcap \{((-g_{\nu}(\overline{\rho}_{sk} - \overline{\rho}_{OC})\cdot\overline{\rho}_{sk} + \rho_{k\nu}(\overline{\rho}_{sk} - \overline{\rho}_{OC})\cdot\overline{g}_{\perp\nu})) > 0\}\ . \tag{49}$$

С точки зрения наблюдателя на несущей платформе, для которого положение точек (нетрудно обобщить для тел) известно, а направление и величина ускорения свободного падения измеряется в осях, жёстко связанных с платформой, условие (49) - критерий для возможного изменения конфигурации системы.

Равновесие с подвижной нагрузкой в поле силы тяжести

Рассмотрим несущее тело на горизонтально ориентированной плоскости с подвижной полезной нагрузкой и внешним воздействием сил тяжести. Для рассматриваемого случая динамического равновесия (dynamic equilibrium - de) центр приложения равнодействующей согласно формуле (37) задаётся выражением

$$\overline{\rho}_{OC}^{(de)} = -\frac{(\overline{\mu}\ \overline{\lambda}^T - \overline{\lambda}\ \overline{\mu}^T)\cdot(m\overline{\rho}_C \times \overline{g} - \overline{Z}_r(t))}{\overline{\nu}^T \cdot (m\overline{g} - \ddot{\overline{W}}_r(t))} \in \mathrm{Conv}\,\Omega\,. \tag{50}$$

Главный вектор нормальных реакций поверхности не зависит от выбора центра приведения, равен по величине главному вектору активных нормальных сил и сил инерции подвижной нагрузки, а следовательно, в силу уравнения (27)

$$cS^{(de)}\,\mathrm{z}^{(de)} = -\,|\,(m\,g_\nu - m_r \ddot{z}_{Cr}(t))\,| = cS\,\mathrm{z}_0\,. \tag{51}$$

Равновесие между нормальными составляющими активных сил и сил инерции подвижной нагрузки и силами нормальных реакций связей выполняется при приложении равнодействующих в одной и той же точке, т.е. при условии

$$\overline{\rho}_{OC}^{(de)} = \overline{\rho}_{Cs}(t)\ . \tag{52}$$

Главный момент внешних активных сил и сил инерции для рассматриваемых условий равен

$$\begin{aligned} \overline{M}_O^a &= m_b\overline{\rho}_b \times \overline{g} + m_r\overline{\rho}_r \times \overline{g} - \overline{Z}_r(t) = \\ &= \overline{W}_{\perp\nu} \times \overline{g}_{\perp\nu} + g_\nu \overline{W}_{\perp\nu} \times \overline{\nu} + W_\nu \overline{\nu} \times \overline{g}_{\perp\nu} - \overline{Z}_r(t) \end{aligned}\,. \tag{53}$$

Условие неопрокидывания несущего тела – принадлежность точки С выпуклой оболочке множества Ω. Оценкой запаса остойчивости может быть площадь области

$$\mathrm{Conv}\,\Omega \bigcap \{(\overline{M}_O^a \times \overline{\nu})\cdot(\overline{\rho}_{sk} - \overline{\rho}_{OC}) > 0\}\ . \tag{54}$$

С точки зрения наблюдателя на несущей платформе, для которого положение точек (нетрудно обобщить для тел) известно, а направление и величина ускорения свободного падения измеряется в осях, жёстко связанных с платформой, условие (54) - критерий для возможного изменения конфигурации системы.

Представлен строгий вывод системы уравнений равновесия несущего твёрдого тела, позволяющих учесть влияние неравномерности распределения сил по контактной области произвольной формы. Предлагаемая система уравнений кроме трёх классических уравнений плоского равновесия содержит определяющие уравнения для распределения нормальных контактных сил и три уравнения, которые могут быть использованы в качестве наблюдателей контактных сил при построении управления движением несущего тела. Сформулированные условия равновесия при статическом и динамическом положении состоянии системы несомых тел позволяют оценивать допустимые режимы их движения. Предложен критерий оценки запаса остойчивости несущего тела.

Используемый математический аппарат имеет перспективу применения в задачах управления движением несущих тел по задаваемым траекториям как при контакте с твёрдыми поверхностями, так и в подвижных средах.

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № НИОКТР АААА-А19-119032690029-6.

Литература

1. Гордеев В. Н.. Кватернионы и бикватернионы с приложениями в геометрии и механике / В. Н. Гордеев. – Киев: Издательство «Сталь», 2016. – 316 с.

2. https://ru.wikipedia.org/wiki/Дуальные_числа

3. Яглом И.М.. Комплексные числа и их применение в геометрии / И.М.Яглом/ - № 168. Изд. 4, стереотип. URSS. 2020. 200 с.

А.Б. Николаев

КООПЕРАТИВНЫЕ РОБОТЫ – СПАСЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ РОБОТОТЕХНИКИ РОССИИ

ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург, a.nikolaev@rtc.ru

Аннотация

В статье дан краткий анализ современного состояния промышленного бизнеса в России, в том числе, на фоне пандемии COVID-19. Отмечены основные, по мнению автора, неблагоприятные экономические факторы существующей экономической ситуации и приведены положительные аспекты развития кооперативной/коллаборативной, а также «мягкой» робототехники.

Содержание предлагаемого автором информационного материала позволяет ответить положительно на вопрос, вынесенный в название данной работы.

Ключевые слова: рынок робототехники, промышленные роботы, цифровая экономика, персонализация/кастомизация продукции, коллаборативные роботы, мягкие роботы, промышленность России.

A.B. Nikolaev

COOPERATIVE ROBOTS – SALVATION OF INDUSTRIAL ROBOTICS IN RUSSIA

Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, Saint-Petersburg, a.nikolaev@rtc.ru

Abstract

This article provides a brief analysis of the current state of industrial business in Russia, including against the background of the COVID-19 pandemic. The main, in the author's opinion, unfavorable economic factors of the existing economic situation are noted and positive aspects of the development of cooperative/collaborative, as well as «soft» robotics are given.

The content of the information material proposed by the author allows us to answer positively the question posed in the title of this work.

Key words: robotics market, industrial robots, economy digitalization, product customization, collaborative robots, soft robotics, industry in Russia.

Внедрение высокопроизводительных робототехнических промышленных систем, рассчитанных на массовый выпуск продукции, предполагает наличие развитой производственной инфраструктуры со связанными с ней издержками, относительно большого пространства для безопасной работы, необходимости вовлечения потенциальных заказчиков, длительных циклов разработки и наладки и представляет собой дорогой (от нескольких сотен тысяч долларов) инвестиционный проект. Вышеперечисленное приводит к ожидаемо низкой доходности и высокому риску таких проектов по сравнению с другими проектами в области информационных/информационно-коммуникационных технологий (ИТ), что создает основной барьер для инвестиций. Несмотря на значительное внимание к промышленной робототехнике со стороны общества и инвесторов, она привлекает незначительный объём частного финансирования. Например, в США инвестиции в робототехнику составляют около 1 % всех венчурных инвестиций.

В России кризисное состояние промышленности, связанное, прежде всего, с ограниченностью внутреннего спроса вследствие низкой платёжеспособности основной массы населения, ориентацией на поддержку сырьевых отраслей и ростовщической политики банковской системы, усугубляется ещё оттоком капитала, инициированным ужесточением денежно-кредитной политики Федеральной резервной системы США, усилением внешнеторговых ограничений, санкционной политикой Запада в отношении России и зависимостью российской экономики от ситуации на нефтегазовых рынках.

В нынешнем, 2020 году, отмеченным ещё и пандемией короновируса с соответствующими решениями правительственных органов, экономическое положение РФ только ухудшилось.

Так, согласно [1], в 2020 году чистый отток капитала из России ожидается на уровне US$ 53 млрд., вместо ранее прогнозируемых ЦБ – US$ 25 млрд.: «Таким образом, показатели 2020 г. приблизились

к антирекорду 2018 г., когда чистый отток капитала из России составил US$ 67,5 млрд.». В 2019 г. этот показатель оценивался в US$ 26,7 млрд. Кроме того, по прогнозу ЦБ, в 2021 г. отток капитала из страны составит US$ 35 млрд. вместо ранее прогнозируемых US$ 20 млрд. А в 2022 г. – US$ 25 млрд. вместо прогнозируемых US$ 15 млрд.

ЦБ также отмечает замедление роста российской экономики, связанное с продолжающейся отрицательной динамикой внутреннего спроса. По мнению регулятора, ухудшение эпидемиологической обстановки негативно отражается на настроениях населения и бизнеса, что влияет на спрос, и предложение. «… дезинфляционное давление, вызванное более слабым спросом, будет преобладать. С учётом этого фактора и данных за II-III кварталы Банк России пересмотрел вниз прогноз потребительского и инвестиционного спроса по итогам 2020 гг. В целом в 2020 г. российская экономика, по оценке Банка России, сократится на 4,0 - 5,0 %», – отмечается в [1].

Одновременно, председатель Счётной палаты Алексей Кудрин допустил падение ВВП в 2020 году более, чем на 5 % [2]. По его мнению, в прогнозе Минэкономразвития: «не учтена вторая волна коронавируса, которая «увы, уже началась» … в 2022-2023 гг. экономический рост вряд ли превысит 2,5 % ... потери для малого и среднего бизнеса от ограничений по коронавирусу будут больше, чем прогнозирует правительство».

Современное экономическое положение России также характеризуется высоким уровнем бедности россиян, что не способствует развитию массового внутреннего спроса на товары и услуги. По словам А. Кудрина, 19,3 млн. россиян на 01.01.2018 имели доход ниже прожиточного минимума, среднее значение которого к началу 2018 года составляло (постановление Правительства РФ от 08.12.17 № 1490) 10328 руб. на душу населения [3]. В 2020 году средний по России прожиточный минимум равен 11185 руб. [4], что при его росте на 8,3 % за два года и, примерно, такой же инфляции общей картины не меняет.

Такое положение на фоне перехода крупнейших мировых производителей продукции машиностроения на модель сервисно-продуктовых систем (Product-service systems – PSS) может оказать разрушительное воздействие не только на отечественную сферу материального производства, но и на сферу услуг, доля которой в России превышает 55 % ВВП (перепродажа и обслуживание импортного оборудования). Переход мировых компаний-производителей на модель PSS, при которой они получат прямой доступ к конечному потребителю, означает, что вся цепочка отечественных посредников лишается возможности независимой деятельности на рынке оказания такого рода услуг и переходит под контроль производителя. Отсутствие собственного конкурентоспособного производства в России в парадигме PSS будет означать отсутствие и отечественной сферы услуг, связанной с продажей и обслуживанием продукции машиностроения.

На рынке оборонной продукции и инвестиционного машиностроения доля продукции, произведенной российскими предприятиями, существенно выше. Но здесь имеет место другая проблема – меньший размер этих рынков, по сравнению с массовыми, их высокая волатильность, а также высокая доля импортных комплектующих.

В рамках реализации Указа Президента Российской Федерации от 7 мая 2018 г № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года», в том числе, с целью решения задачи по обеспечению ускоренного внедрения цифровых технологий в экономике и социальной сфере, Правительством Российской Федерации сформирована Национальная программа «Цифровая экономика Российской Федерации» утвержденная протоколом заседания президиума Совета при Президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и национальным проектам от 4 июня 2019 г. № 7 [5].

В состав Национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации» входят следующие федеральные проекты, утверждённые протоколом заседания президиума Правительственной комиссии по цифровому развитию, использованию информационных технологий для улучшения качества жизни и условий ведения предпринимательской деятельности от 28 мая 2019 г. № 9 [5]:

- «Нормативное регулирование цифровой среды»,
- «Кадры для цифровой экономики»,
- «Информационная инфраструктура»,
- «Информационная безопасность»,
- «Цифровые технологии»,
- «Цифровое государственное управление».

При этом только в «Систему управления реализацией Национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации» по постановлению Правительства РФ от 02 марта 2019 г. № 234 входят [5]:

- президиум Совета при Президенте РФ по стратегическому развитию и национальным проектам,
- правительственная комиссия по цифровому развитию, использованию информационных технологий для улучшения качества жизни и условий ведения предпринимательской деятельности,
- президиум Правительственной комиссии по цифровому развитию, использованию информационных технологий для улучшения качества жизни и условий ведения предпринимательской деятельности,
- куратор национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации» и куратор федеральных проектов национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации»,
- подкомиссия по цифровой экономике Правительственной комиссии по цифровому развитию, использованию информационных технологий для улучшения качества жизни и условий ведения предпринимательской деятельности,
- автономная некоммерческая организация «Цифровая экономика»,
- рабочие группы (формируются автономной некоммерческой организацией «Цифровая экономика» из представителей заинтересованных федеральных органов исполнительной власти, центров компетенций, проектного офиса по реализации национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации» и иных организаций),
- центры компетенций, определяемые автономной некоммерческой организацией «Цифровая экономика»,
- руководитель национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации» Министр цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации,
- администратор национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации» заместитель Министра цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации,
- аналитический центр при Правительстве Российской Федерации – проектный офис национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации»,
- проектный офис Правительства Российской Федерации.

Только приведённое выше перечисление органов «Системы управления» даёт представление о предполагаемой «эффективности» использования бюджета Национальной программы в 1 триллион 837,7 миллиардов рублей до 31.12.2024 года.

Анализ разделов 2 – «Цели и показатели федерального проекта», 3 – «Задачи и результаты федерального проекта» Паспорта федерального проекта «Цифровые технологии» [6] показывает, что существующие на сегодняшний день в России концепции выхода из создавшегося положения с помощью цифровизации сконцентрированы исключительно на создании и поддержке новых видов сервисов, базирующихся на сборе и анализе данных с различных физических объектов, и не охватывают вопросы кардинального изменения подходов к «жизненному циклу» этих объектов.

Согласно результатам опроса консалтинговой компанией IHS Markit российских производителей товаров и поставщиков услуг [7] настроения негосударственного бизнеса в России осенью резко ухудшились, достигнув минимума с 2009 года. Большинство из предпринимателей заявили о намерении повышать отпускные цены, чтобы компенсировать прогнозируемый рост издержек. А доля компаний, готовых к новым инвестициям в ближайшие 12 месяцев, впервые более чем за десять лет оказалась ниже доли тех, кто не готов к вложениям.

«Устойчивое воздействие пандемии COVID-19 на спрос и деловую активность в значительной степени повлияло на ожидания компаний в отношении объёмов производства, занятости и инвестиций в предстоящий год», – констатировал экономист IHS Markit Шиан Джонс – «Настроения российского частного сектора на фоне сохраняющейся экономической неопределенности оказались гораздо более мрачными, чем летом. В октябре (на фоне обострения ситуации с заболеваемостью) восстановление производственной активности приостановилось, а в обрабатывающей промышленности «с очень высокой вероятностью» наблюдалось слабое ухудшение конъюнктуры», – добавил он [7]. В IHS Markit отметили, что российские производители в октябре потеряли импульс к восстановлению, поскольку производство и новые заказы сократились. Как сообщила организация, значение индекса деловой активности IHS Markit PMI снизилось в октябре в обрабатывающих отраслях до 46,9 после 48,9 в сентябре (уровень ниже 50 свидетельствует об ухудшении ситуации). Прогноз по найму работников в октябре также оказался самым слабым с начала 2016 года: сальдо компаний производственного сектора, которые прогнозируют увеличение численности персонала, упало до десятилетнего минимума +3 %. Наибольший пессимизм российские производители демонстрируют в отношении своих инвестиционных планов на 2021 год. Впервые с января 2009 года

доля компаний, которые не планируют новые капитальные вложения, превысила долю планирующих – сальдо между ними ушло в отрицательную зону и составило минус 1 % [7].

Таким образом, учитывая вышесказанное, можно утверждать, что в сложившейся в России ситуации использование «больших» робототехнических систем для развития мелкосерийного производства по индивидуальным заказам потребителей, неоднократно меняющимся в течение короткого промежутка времени, требующего быстрой перенастройки технологических линий под конкретные требования заказчика, влекущее за собой временные и материальные потери – нереально.

Решение проблемы видится в применении тандемов «человек-робот», в которых робот служит своеобразным инструментом, выполняющим простые, повторяющиеся действия, а человек вырабатывает креативные решения.

Такие, как правило, недорогие (от US$10 тыс.), лёгкие в установке, использовании и переналадке роботы, оснащённые системами технического зрения для предотвращения столкновения с препятствиями, включая человека, получили название коллаборативных (кооперативных) роботов или коботов. Они работают в тесной кооперации с людьми и, в отличие от промышленных робототехнических систем, не находятся в специально огороженных зонах.

Главными «плюсами» коллаборативных роботов считаются:

- упрощённое программирование (работник вручную перемещает манипулятор по желательным траекториям в необходимые позиции, робот запоминает и затем повторяет эти движения самостоятельно),
- универсальность (быстрая переналадка),
- простота в установке и интеграции,
- экономичность в эксплуатации (в частности, по электроэнергии),
- отсутствие особых требований к условиям эксплуатации и относительная безопасность для людей (малые размеры не требуют значительных площадей и ограждения периметра безопасности, что, однако, приводит к повышенным требованиям к интерфейсу взаимодействия с людьми),
- сравнительно низкие цены с тенденцией дальнейшего удешевления, что определяет небольшой срок окупаемости и преимущество в создании бизнес-проектов с применением коботов. Например, промышленный робот Baxter от Rethink Robotics (США), обладающий двумя манипуляторами для осуществления операций сборки и упаковки, в 2016 году стоил US$22 тыс., а коллаборативный манипулятор Franka (Franka Emika, Германия) для сборочных и сверлильных операций, способный к позиционированию инструментов с точностью до 0,1 мм, с 7 степенями свободы, программированием модульного типа или путём задания траектории, с возможностью сохранения успешных операций в «облаке», имеет в настоящее время стоимость порядка US$10 тыс.

Кооперативные роботы обычно способны манипулировать грузами весом до 10 кг и хорошо выполняют повторяющиеся действия, такие, как выбор или расстановка, упаковка, нанесение клея или пайка. Ограничениями, по сравнению с промышленными роботами, являются, в целом, меньшая скорость движений и меньшие усилия, создаваемые на манипуляторах.

Удобство в эксплуатации и относительно малые затраты на внедрение привели к высоким темпам востребованности коботов на мировом рынке (см. рис. 1), особенно, в сферах малого и среднего бизнеса.

В 2019 году рынок коллаборативных роботов оценивался в US$ 573,12 млн. и по прогнозу октября 2020 года должен достичь к 2025 году объёма в US$ 1,62 млрд. [8]. Такой рост соответствует примерно 23 % CAGR в период с 2020 по 2025 год. До пандемии, в 2019 году, основываясь на высоких темпах снижения стоимости коботов и высокой рентабельности инвестиций в данное направление, прогнозы консалтинговых компаний были более оптимистичны. Например, «Research and Markets» прогнозировал к 2025 году объём рынка до US$ 10,14 млрд., а «Barclays Capital» – до US$ 11,5 млрд. с темпом роста в период 2019 – 2025 гг. 44,5 % (CAGR) [9, 10].

Обычно коботы используются для сборки, обслуживания машин, а также контроля качества. Например, в ноябре 2019 года компания Invertek Drives, специализирующаяся на разработке, производстве и продаже частотно-регулируемых приводов для двигателей переменного тока, включила двух кооперативных роботов в технологическую цепочку тестирования своей производственной линии. Компания считает, что коботы могут успешно справиться с проверкой и испытанием постоянно меняющихся устройств в рамках одной производственной линии.

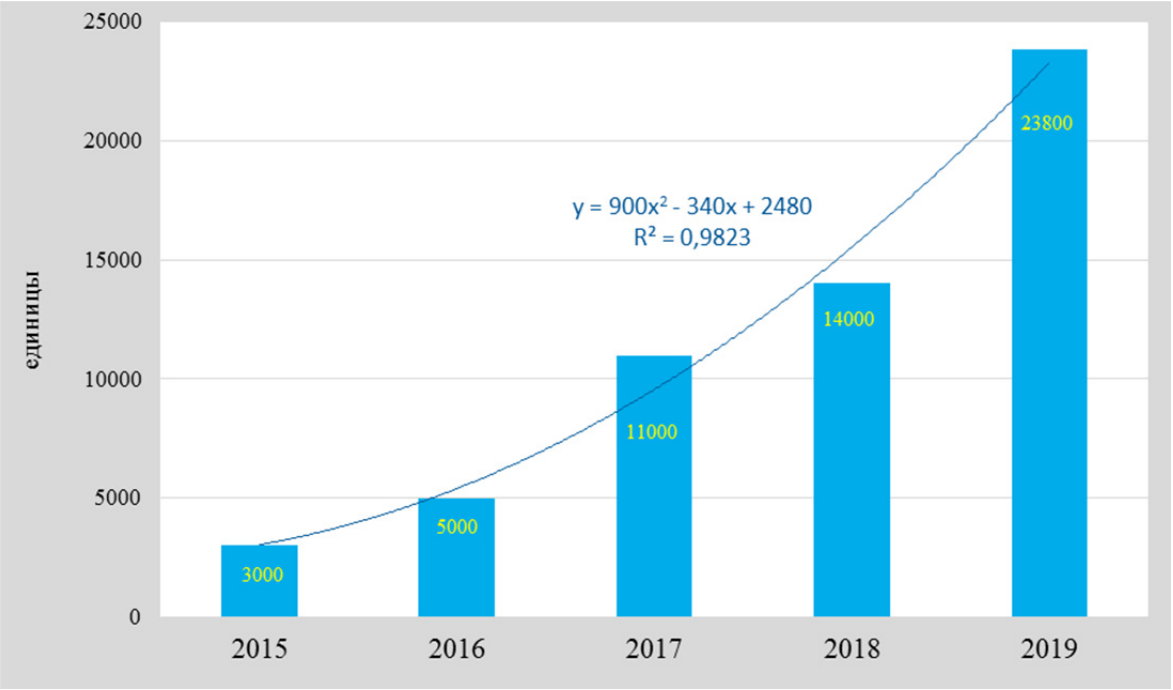


Рисунок 1 – Рост количества используемых коллаборативных роботов в 2015-2019 гг. по данным компании ABI Research (США) и IFR (источники: ABI Research; IFR WR 2019)

Компания Tomenson Machine Works для операций штамповки штифтов внедрила в производственную линию манипулятор OnRobot RG6 и кобот Universal Robots UR3. Помимо возможности обработки деталей различных размеров, роботы могут использоваться для удаления заусенцев, ухода за станками и упаковки.

Примеры других разработок [8]:

- ноябрь 2019 года – корпорация Omron запустила мобильный робот LD-250 для перемещения полезной нагрузки до 250 кг. Он интегрирован с коллаборативными роботами Omron для создания нового рынка мощных мобильных манипуляторов, которые могли бы осуществлять задачи манипуляции совместно с транспортировкой,
- март 2020 года – Universal Robots запустила прикладные наборы UR+ (сертифицированные периферийные устройства и пакеты приложений) для упрощения развертывания коботов, которые устраняют барьеры на пути промышленной автоматизации для различных малых, средних и крупных компаний, а также продемонстрировала новые решения использования коллаборативных роботов для автоматизации трудных для персонала задач паллетирования и поштучной комплектации на выставке MODEX 2020 (международная выставка по производству, дистрибуции и поставкам; проводилась с 9 по 12 марта 2020 года в Атланте США),
- апрель 2020 – ABB Ltd. запустила блочный программный интерфейс под названием «Wizard Easy Programming» для более интуитивно понятного программирования кобота YuMi. Как заявила компания, её целью является упрощение установки своих коллаборативных роботов для тех, кто не имеет опыта программирования, что поможет снизить барьер для входа на рынок.

В 2018 году на рынке кооперативных роботов лидировали европейские государства: их доля составляла порядка 37 %. Лидером европейского рынка до сих пор является Universal Robots (UR), Дания – стартап, ежегодно удваивающий выпуск коботов с начала своей деятельности в 2009 году. Политика существенного увеличения инвестиций UR (более, чем в три раза, из которых 50 % пошли на развитие кадрового ресурса компании) в R&D, позволили UR увеличить свой доход за два года (2016-2017 гг.) более, чем на 110 % и довести его в 2017 году до €134 млн. [10].

В условиях непрерывного развития современных технологий и ожиданий выхода на рынок других компаний, обладающих определёнными преимуществами в различных приложениях для кооперативных роботов, их рынок сильно фрагментирован и пока умеренно конкурентен. Ожидаются приобретения и сотрудничество крупных компаний со стартапами, ориентированными на создание инноваций.

Основными игроками рынка считаются ABB Group, DENSO Robotics, EPSON Robots, Energid Technologies Corporation, F&P Robotics AG, Fanuc Corporation, KUKA AG, MRK-Systeme GmbH, Precise Automation, Inc., Rethink Robotics, Inc., Robert Bosch GmbH, Universal Robots A/S, Yaskawa

Electric Corporation, MABI AG, Techman Robot by Quanta Storage, Inc., Franka Emika GmbH, AUBO Robotics Inc., and Comau S.p.A. [9].

В течение ближайших 5 лет самые высокие темпы роста оснащения коллаборативными роботами будет демонстрировать Азиатско-Тихоокеанский регион с абсолютным доминированием КНР. По прогнозам Universal Robots и Shenzhen Gaogong Industry Research Consulting Co. объём китайского рынка коботов в 2020 году должен вырасти до US$ 190 млн. (от US$ 54 млн. в 2017 году) или – до двенадцати тысяч коллаборативных систем.

Кроме того, Китай является «домашним» регионом для таких производителей, как Aubo Robotics, Elephant Robotics, Han's Robot, HIT Robot Group, Jaka Robot, Rokae and Siasus и различных стартапов, включающих Elibot, Jaka и Yteam.

Индийские малые и средние предприятия, деятельность которых вносит значительный вклад в ВВП страны, воспринимают внедрение коллаборативных роботов как решение своих проблем эффективности, качества и гибкости производства в условиях обилия неквалифицированной рабочей силы и ограниченности производственных площадей. Так, индийский производитель транспортных средств (мотороллеров/моторикш, мотоциклов, автомобилей) Bajaj Auto имеет на сборочной линии более 100 коботов, выполняющих разнообразные задачи.

Нельзя не учитывать и потенциал Североамериканского региона со своим лидером – США, обрабатывающая промышленность которых и роботизированная хирургия (500000 роботизированных процедур в год) являются драйверами внедрения коллаборативной робототехники. Инвестиции Национального научного фонда США (National Science Foundation – NSF) также способствуют росту регионального рынка коботов. Например, для поддержки новых технологий, в том числе и робототехники, NSF вложил от US$ 700 тыс. до US$ 1,0 млн. в каждый из 21 проекта сроком на три года. Данная Программа призвана расширить сотрудничество с отраслями промышленности для оценки «лабораторных» технологий.

Вспышка коронавируса привела мировую прогрессивную медицину к необходимости поиска и внедрения новых технологий, возможности которых включают и использование коботов. Ожидается, что основную долю рынка займут Force-Limited коботы, т.е. такие, которые смогут ограничивать своё силовое действие, используя встроенные датчики. Такие роботы, сочетающие ограничение скорости и мощности с хорошим интерактивным дизайном, отличаются повышенной безопасностью, что позволяет им работать рядом с людьми без ограждения.

В рамках вышеобозначенного направления нельзя не отметить факт формирования нового рынка – мягкой робототехники.

Несмотря на то, что мягкая робототехника всё ещё находится на ранних стадиях своего развития, благодаря разнообразию преимуществ, предлагаемых мягкими роботами по сравнению с традиционными, ожидается резкий рост их количества, прежде всего, в электронной и пищевой отраслях, а также в медицинских приложениях.

Малоинвазивная хирургия, имеющая перед традиционными хирургическими технологиями такие преимущества, как меньший размер разреза, меньшее количество осложнений, минимизация вероятности инфицирования и более короткие сроки восстановления в сочетании с ростом количества и функциональности роботизированных хирургических систем – одно из направлений с большим потенциалом внедрения мягкой робототехники. Помимо меньшей травматичности при манипулировании в процессе операции, мягкие роботы обладают тем преимуществом, что они, по своей сути, наиболее совместимы с естественными тканями человека и живых организмов.

Кроме того, рост рынка мягкой робототехники будут стимулировать такие факторы, как увеличение инвестиций/финансирования научных исследований и разработок, снижение стоимости датчиков и комплектующих, появление самообучающихся мягких роботов, обладающих элементами ИИ, необходимость обеспечения безопасности человека в производственных подразделениях. Так, например, только одно Управление по охране и гигиене труда США (The U.S. Occupational Safety and Health Administration – OSHA) отметило 39 крупных промышленных аварий под ключевым словом «робот», сопровождающихся травмами от расчленения до смерти [11]. Значительную роль в развитии пространства для обсуждаемого рынка начинает играть рост центров складирования и распределения, для которых возникает проблема эффективного управления.

В 2019 году рынок мягкой робототехники оценивался в US$ 645,45 млн. Ожидается, что к 2025 году он достигнет объёма в US$ 4,965 млрд., при 40,5 % (CAGR) росте в течение прогнозируемого периода 2020 – 2025 гг. [11].

На данный момент рынок мягкой робототехники является умеренно конкурентным в силу достаточно специфических разработок. С региональной точки зрения сейчас доминирует Северная Америка, за которой следуют Европа и страны Азиатско-Тихоокеанского региона и Японии

(APAC – Asia Pacific and Australasia Countries). Однако с появлением крупных игроков, рискнувших более активно заняться мягкими роботами, конкуренция будет усиливаться.

В 2016-2017 гг. годах около 73 %, а в 2018 г. – около 65 % промышленных автоматизированных комплексов было занято в трёх отраслях – автопроме, электронной промышленности и машиностроении. Коллаборативные роботы имеют гораздо более разнообразные сферы применения. Они используются в научных исследованиях, археологии (при очистке/обработке артефактов), пилотировании (второй пилот), при глажении тканей, приготовлении пищи, в ландшафтном дизайне, мойке фасадов зданий, в торговле, при утилизации (например, робот Liam в 2015 году при разборке старых гаджетов Apple извлёк свыше 1100 кг золота, принеся прибыль в размере US$ 45 млн.) и т. д.

Вышеприведённые примеры свидетельствуют о постепенном «размытии» разделения коллаборативных роботов на категории промышленных и сервисных, т. к. их основное функциональное назначение – быть ассистентами человека в промышленном или любом другом процессе.

С другой стороны, «приход» коллаборативных сервисных роботов в промышленность будет стимулировать тенденцию «слияния» продукта и услуги, т. е. способствовать реализации концепции PSS – главного тренда мирового промышленного развития.

Ещё одна сторона роста популярности кооперативных роботов – возникновение тенденции отказа некоторыми производственными компаниями от использования «полноценных» промышленных автоматизированных линий в пользу коботов [12]. Так, исследование учёных Массачусетского технологического института на заводе BMW обнаружило бо̀льшую эффективность работы у производственных коллективов, состоящих из роботов и людей, чем при использовании только работников или роботов: смешанные команды были на 85 % производительнее. В Mercedes-Benz было принято решение об обратной замене на некоторых производственных линиях роботов на людей. По мнению руководства компании, с удовлетворением растущего спроса на кастомизированную продукцию лучше справляются люди, способные «перепрограммировать» себя в доли секунды, на что автоматические линии пока не способны: «разнообразия слишком много, чтобы обойтись одними машинами». Отходя от максимизации автоматизации, компания планирует организацию сотрудничества между человеком и роботом, когда работник направляет действия кобота [12].

Так поможет ли развитие отечественной кооперативной робототехники хоть частично нейтрализовать негативные тенденции в экономике России?

Настоящая работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России 075-01195-20-02 от 17 августа 2020 года «Разработка предложений по совершенствованию государственной научно-технической и промышленной политики и популяризации достижений в области робототехники на основе анализа тенденций развития робототехники в России и за рубежом».

Литература

1. ЦБ более чем вдвое ухудшил прогноз по оттоку капитала из России в 2020 году // Ведомости. Финансы: [сайт]. – 23.10.2020. – URL: https://www.vedomosti.ru/finance/news/2020/10/23/844382-tsb-bolee-chem-vdvoe-uhudshil-prognozu-po-chistomu-ottoku-kapitala-iz-rossii-v-2020-godu (дата обращения: 26.10.2020). – Текст: электронный.

2. Кудрин допустил падение ВВП более чем на 5 % в 2020 году // Ведомости Экономика: [сайт]. – 23.10.2020. – URL: https://www.vedomosti.ru/economics/news/2020/10/12/842831-kudrin-dopustil-padenie-vvp-v-2020 (дата обращения: 26.10.2020). – Текст: электронный.

3. Маркелов Р. Голикова ответила на слова Кудрина об уровне бедности / Р. Маркелов // Российская Газета: [сайт]. – 28.09.2018. – URL: https://rg.ru/2018/09/28/golikova-otvetila-na-slova-kudrina-ob-urovne-bednosti.html?utm_source=yxnews&utm_medium=desktop (дата обращения: 26.10.2020). – Текст: электронный.

4. Прожиточный минимум в 2020 году: таблица по регионам России // Российский налоговый курьер: [сайт]. – 02.10.2020. – URL: https://www.rnk.ru/article/216998-projitochnyy-minimum-v-2020-godu-po-regionam-rossii (дата обращения: 26.10.2020). – Текст: электронный.

5. Цифровая экономика РФ // Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации: [сайт]. – 11.08.2020. – URL: https://digital.gov.ru/ru/activity/directions/858/ (дата обращения: 02.11.2020). – Текст: электронный.

6. Паспорт федерального проекта Цифровые технологии // Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации – URL: https://digital.gov.ru/uploaded/files/

pasport-federalnogo-proekta-tsifrovyie-tehnologii.pdf (дата обращения: 02.11.2020). – Текст: электронный.

7. Старостина Ю. Оптимизм российского бизнеса упал до минимума за 11 лет / Ю. Старостина // РБК Экономика: [сайт]. – 28.10.2020. – URL: https://www.rbc.ru/economics/10/11/2020/5fa92c369a7947d3d5ac34c2?utm_source=yxnews&utm_medium=desktop (дата обращения: 10.11.2020). – Текст: электронный.

8. Collaborative Robot Market – Growth, Trends, and Forecast (2020 – 2025) // Research and Markets: [site]. – October 2020. – URL: https://www.researchandmarkets.com/reports/5012432/collaborative-robot-market-growth-trends-and#rela4-4076494 (дата обращения: 10.11.2020). – Text: electronic.

9. Collaborative Robots Market Size, Share & Trends Analysis Report By Payload Capacity, By Application (Assembly, Handling, Packaging, Quality Testing), By Vertical, By Region, And Segment Forecasts, 2019 - 2025 // Research and Markets: [site]. – May 2019. – URL: https://www.researchandmarkets.com/reports/4076494/collaborative-robots-market-size-share-and?utm_source=GNOM&utm_medium=PressRelease&utm_code=5cxlnv&utm_campaign=1267115+-+Global+Collaborative+Robots+Market+2019-2025+-+Increasing+Demand+in+Logistics+to+Drive+the+Demand+in+Future&utm_exec=joca220prd (дата обращения: 10.11.2020). – Text: electronic.

10. Бойко А. Коллаборативные роботы / А. Бойко // RoboTrends: [сайт]. – URL: http://robotrends.ru/robopedia/katalog-kollaborativnyh-robotov (дата обращения: 11.11.2020). – Текст: электронный.

11. Soft Robotics Market - Growth, Trends, and Forecast (2020 – 2025) // Research and Markets: [site]. – May 2020. – URL: https://www.researchandmarkets.com/reports/4534396/soft-robotics-market-growth-trends-and#relb1-5012432 (дата обращения: 11.11.2020). – Text: electronic.

2. Meet the Cobots: Humans and Robots Together on the Factory Floor [Electronic resource] // National geographic [site]. – 06.05.2016. – URL: http://news.nationalgeographic.com/2016/05/financial-times-meet-the-cobots-humans-robots-factories/ (Дата обращения: 12.11.2020). – Text: electronic.

СИМПОЗИУМ «КОСМИЧЕСКАЯ РОБОТОТЕХНИКА. ОТ ЛУНОХОДА-1 ДО ЛУННЫХ БАЗ»

А.Б. Железняков

ЛУННЫЕ БАЗЫ: ИЗ ПРОШЛОГО – В БУДУЩЕЕ

ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург, zheleznyakov@rtc.ru

Аннотация

В статье описаны проекты лунных баз, разработка которых велась в СССР и США в 1960-х годах, сформулированы основные причины, которые заставляют человечество задумываться о строительстве долговременных сооружений на других небесных телах, рассмотрено состояние дел на сегодняшний день, дан осторожный прогноз на ближайшее будущее.

Ключевые слова: Космонавтика, Луна, лунная база, проект «Горизонт», «Барминград», Роскосмос.

A.B. Zheleznyakov

LUNAR BASES: FROM THE PAST – TO THE FUTURE

Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics Russian Federation, Saint-Petersburg, zheleznyakov@rtc.ru

Abstract

The paper describes the projects of lunar bases, development of which was carried out in the USSR and the United States in the 1960s; the main reasons that lead humanity to reflect on the building of long-term constructions on other celestial bodies are formulated; the present state of affairs is discussed; a cautious forecast for the near future is given.

Key words: Cosmonautics, (astronautics), the Moon, lunar base, project Horizon, Barmingrad, Roscosmos.

Самой природой в человека заложено постоянное стремление расширять ареал своего обитания. Сначала мы открывали новые земли, близкие и далёкие, потом осваивали воздушный океан, теперь покоряем космические просторы. Более или менее сносно освоили околоземную орбиту и уже замахиваемся на другие планеты. Правда, в активе человечества пока только один внеземной мир – лунный. Там мы, я имею в виду, конечно же, человечество в целом, побывали более 50 лет назад. Застолбили, образно говоря, новую территорию. Но только сегодня задумались о возвращении туда. И если во время первых высадок главной задачей была установка «колышка», то сейчас мы намерены вернуться туда с совершенно иной целью – чтобы жить и работать там, чтобы осваивать новую территорию. То есть, мы хотим вернуться на Луну всерьёз и надолго.

Вполне естественно, что для решения этой задачи, то есть «вернуться всерьез и надолго», там необходимо создать постоянно действующие базы. Почему мы обязательно должны пройти «этап лунных баз», я объясню чуть позже. А пока сделаю небольшой экскурс в историю и расскажу о проектах, которые были разработаны еще на заре космической эры, но, в силу определенных причин, не были тогда реализованы. Все футурологические концепты, которые во множестве появлялись в конце 1950-х – начале 1960 годов на страницах научно-популярных журналов, я опускаю. Кроме внешней величественности и определенной красоты они не были детально проработаны и не могли в будущем использоваться как основа для проектов лунных баз.

Известно всего два «реальных» проекта. То есть проекта, разработанного не фантастами, а инженерами. Это американский проект военной лунной базы «Горизонт» (Project Horizon) и советский проект лунной базы «Звезда», более известный как «Барминград». Вот о них я и расскажу.

Программа «Горизонт»

В самом начале 1960-х годов Пентагон сформулировал программу «Горизонт» – предтечу бу-

дущей программы «звездных войн». Этот проект предполагал полномасштабное использование естественного спутника Земли в военных целях. Общий замысел и план реализации программы был сформулирован Управлением баллистических ракет ВВС США на основе инициативных проектных разработок, выполненных специалистами ведущих американских авиационно-космических компаний, таких как «Боинг», «Норт Американ», «Даглас» и ряда других. Цель исследований была сформулирована следующим образом: *«…выявить экономичный и реалистичный подход к проблеме создания обитаемой разведывательной обсерватории на Луне»*.

Уже в водной части этого документа была четко изложена стратегическая задача лунной программы, естественно, с точки зрения военных: «По мере реализации исследований стало очевидным, что разрабатываемая программа не относится к «отдаленному будущему». Если из лунной программы предполагается извлечь максимальное военное преимущество, то работу над проблемами, требующими для своего решения продолжительного времени, необходимо начать немедленно. Если это будет сделано, то США смогут послать человека на Луну и вернуть его на Землю в последнем квартале 1967 г.».

Обратите внимание на эту дату. Она прозвучала за год до того, как первый человек отправился в космос, за год и один месяц до того, как отправка человека на Луну была провозглашена национальной целью Америки. Означает это одно – к началу 1960-х гг. человечество технически и технологически «созрело» для полетов на другие планеты. Кстати, на эту же дату – вторая половина 1967 г. – ориентировались и советские специалисты, тогда же (лето 1960 г.) составляя план освоения космического пространства на ближайшую «семилетку».

Но давайте вернемся к «Горизонту». Обозначив возможный срок отправки человека на Луну, авторы программы далее писали: «Окончательное решение относительно типов стратегических систем, которые будут размещены на Луне (например, система бомбардировки Земли), может быть без каких-либо осложнений отсрочено на три-четыре года. Однако планы создания лунной базы не следует откладывать на неопределенное время, а ее первоначальный проект должен отвечать военным требованиям».

Самым «ценным» в докладе были сроки, в которые предполагалось реализовать «Горизонт». Были определены пять этапов работ:

1. Первое возвращение на Землю образцов лунного грунта – ноябрь 1964 г.
2. Первая высадка человека на Луне и возвращение экипажа на Землю – август 1967 г.
3. Временная база на лунной поверхности (на 12 человек) – ноябрь 1967 г.
4. Завершение строительства лунной базы (на 21 человека) – декабрь 1968 г.
5. Действующая лунная база – июнь 1969 г.

Согласитесь, широкий размах: в августе 1967 г. – первая высадка человека на Луне; ноябрь 1967 г. – временная лунная база на 12 человек. Всего три месяца! Учитывая, что предполагалось использовать трехместные корабли типа «Аполлон» и двухместные лунные кабины, получается, что за этот срок необходимо было осуществить не менее шести только пилотируемых экспедиций. Плюс полеты кораблей снабжения. Плюс необходимый резерв («не всегда все свершается гладко»). И так далее, и тому подобное.

В качестве основного носителя авторы программы рассматривали ракеты «Сатурн-1» и «Сатурн-2» – проектанты считали, что первая ракета пойдет в серийное производство в октябре 1963 г., вторая – в течение 1964 г.

До конца 1964 г. (срок завершения первого этапа работ – доставка на Землю лунного грунта) планировалось осуществить не менее 72 запусков «Сатурнов», 40 из которых должны были состояться в рамках программы «Горизонт». В дальнейшем должны были состояться еще 61 запуск «Сатурна-1» и 88 – «Сатурна-2». В результате к ноябрю 1966 г. предполагалась «перебросить» на Луну 220 т грузов и развернуть базу. В течение первого эксплуатационного периода функционирования лунной базы предполагалось выполнить еще 64 пуска «Сатурнов» (каждые пять дней!).

Место для базы планировалось выбрать в одном из районов приэкваториальной зоны видимой стороны Луны. Таковы были требования военных, считавших такое местоположение оптимальным с точки зрения возможностей связи и управления.

Сначала на Луну предполагалось высадить двух астронавтов-квартильеров, которые должны были «забить колышки» и дожидаться прибытия «строительной партии» из девяти своих коллег. На строительство первой очереди базы отводилось шесть месяцев. Основным элементом базы должен был стать цилиндрический контейнер диаметром 3 м и длиной 6 м. Несколько таких контейнеров укладывались в ров глубиной 3,5 м и соединялись друг с другом герметичными тамбурами. Затем все элементы конструкции предполагалось засыпать лунным грунтом, таким образом, замаскировав и защитив базу. Наружу должны были «выглядывать» только антенны и навигаци-

онные системы, по которым следующие корабли должны были ориентироваться при посадке на Луну.

Темпы дальнейшего «развития» лунной базы должна была диктовать международная обстановка. Чем хуже были бы отношения с Советским Союзом (не надо забывать, что шла «холодная война» и сверхдержавы соперничали во всех сферах жизни, а не только в военной области), тем больше боевых систем предполагалось разместить на поверхности естественного спутника Земли.

Основой «устрашения» должны были стать ракеты, обеспечивающие возможность нанесения удара по противнику «огромной мощности». По мнению американских военных ракетные базы на Луне будет трудно поразить, даже если их расположение будет известно противнику. Даже если по ним будет намерение нанести удар, об этом станет известно загодя, так как время перелета с Земли на Луну составит не менее двух суток, а за это время можно было «хорошо подготовиться к встрече».

В итоге на Луне должно было быть размещено до 70 (вдумайтесь в эту цифру) американских военных баз, на каждой из которых должно было дислоцироваться по 10 ракет.

Несмотря на то, что в докладе допускалась отсрочка на три-четыре года при выборе систем вооружения, которые предполагалось разместить на Луне, его авторы приводили примерный перечень того военного оборудования, которое могло быть туда доставлено. Кроме системы бомбардировки Земли, проще говоря, ракет с ядерными боеголовками, на лунной базе предлагалось разместить средства наблюдения за родной планетой, средства стратегической связи, навигационные маяки, лаборатории по созданию новых материалов и для проведения научных исследований в области оборонных технологий, и многое другое.

Предлагалось также рассмотреть вопрос о возможности создания на Луне убежища, куда можно было бы эвакуировать высшее руководство США, а также часть землян, если бы термоядерный конфликт на Земле вышел бы из-под контроля, а сама планета на какое-то время стала бы непригодной для проживания. Обитателям этой лунной колонии пришлось бы спустя многие годы вновь возрождать на Земле цивилизацию. Но об этом в докладе писалось как о деле достаточно отдаленного будущего.

Правда, все эти планы не учитывали возможности противника, то есть Советского Союза, по созданию альтернативных систем. В том числе и собственных военных баз на лунной поверхности.

До реализации программы дело не дошло: даже у богатой Америки не нашлось таких ресурсов. Да и необходимость в столь масштабной экспансии на Луну как была эфемерной, таковой и осталась. И остается до сих пор, в том числе и с военной точки зрения. [1, 2]

Лунная база «Звезда»

Советский проект лунной базы «Звезда» нельзя рассматривать как «наш ответ американцам». Хотя по срокам разработки он и стоит вслед за американской программой. Во-первых, подход был иным, на первом месте стояли технические, а не военные аспекты. Во-вторых, проектанты реальнее оценивали свои возможности и закладывались на уже существующие технические средства доставки, а не на те, которые должны быть еще только созданы.

Инициатором работ по проекту, как и многих других космических разработок, стал С.П. Королев. В своих «Заметках по тяжелому межпланетному кораблю и тяжелой орбитальной станции» Сергей Павлович предполагал использовать Луну и окололунное пространство в качестве одного из уровней космической технологической инфраструктуры, которая позволила бы закрепиться в космосе, а затем «двинуться» к планетам и звездам.

Работа над проектом Королев поручил своему коллеге по Совету Главных Владимиру Павловичу Бармину, возглавлявшему «Спецмаш». Точнее, не поручил, а попросил заняться работой на достаточно отдаленную перспективу. В документах предприятия проект проходил под обозначением «ДЛБ» (Долговременная лунная база), в ОКБ-1, заказчике работ, его знали под названием «Звезда». Неофициально проект также известен под именем «Барминград», по имени главного конструктора.

Начать развертывание лунной базы мы намеревались уже во второй половине 1970-х гг., проделав перед этим много другой, не менее важной и масштабной, работы. А именно, облетев Луну и высадившись на ее поверхности. Сегодняшней космонавтике, как это ни печально, такие свершения не по силам.

Планировалось, что количество обитаемых модулей базы будет равно девяти с таким же количеством членов экипажа. Модули длиной 4,5 м каждый должны были доставляться на Луну по отдельности. Каждый из них должен был иметь собственное предназначение: командный пункт,

научная лаборатория, склад, мастерская, медпункт со спортзалом, камбуз со столовой и три жилых помещения.

Программа развертывания станции предусматривала проведение подготовительного беспилотного этапа. Выбор места развертывания станции планировалось осуществить после проведения картографирования лунной поверхности с помощью камер, установленных на искусственном спутнике Луны. Затем с предварительно выбранных участков должны были доставить грунт на Землю для проведения тщательного химического анализа. Потом этот участок должен был «вдоль и поперек» изъездить автоматический самоходный аппарат. И лишь после этого намечалось начать строительство базы.

Строительство базы предполагалось начать с запуска на Луну в беспилотном режиме основного модуля лунной базы. После этого на ночное светило должна была направиться экспедиция из четырех человек, которой предстояло принять еще один модуль и соединить его с основным модулем. Доставка всех модулей предполагалась в беспилотном режиме, а их «стыковка» с другими модулями возлагалась на участников лунных экспедиций, которые периодически планировалось отправлять на Луну.

В перспективе обитаемые модули лунной базы могли устанавливаться на колесные шасси, образуя своеобразный «лунный поезд», который предназначался для строительства временного городка, а по его завершении – для научных вояжей по окрестностям. В состав поезда входили: тягач, жилой вагончик, изотопная энергоустановка мощностью 10 кВт и буровая установка.

Ходовая часть у всех этих машин была, как у луноходов: каждое колесо имело свой электромотор, благодаря чему отказ одного или даже нескольких из 22 моторов не парализует общий ход. Для метеорной, тепловой и ультрафиолетовой защиты обитаемых помещений поезда был разработан трехслойный корпус: сверху и изнутри – стенки из специальных сплавов, между ними – подушка из вспененного наполнителя.

Полный вес «лунного поезда» составлял 8 т.

Главной задачей экипажа «лунного поезда» должны были стать геологические исследования: сначала – для подбора участков под городок и космодром, потом – для решения научных вопросов. Для удобства работы образцы грунта можно было собирать манипуляторами без выхода на поверхность в скафандрах.

В ходе развития проекта проступали черты будущей базы на 12 человек. Первоначально она должна была также состоять из девяти типовых блоков цилиндрической формы, но больших размеров, чем в первом варианте: длина – 8,6 м, диаметр – 3,3 м, полная масса – 18 т. На заводе блок должен был изготавливаться укороченным, в виде металлической гармошки длиной 4,5 м – под габариты транспортного корабля. На Луне, на строительной площадке, в гармошку под давлением подавался воздух, она разъезжалась, и блок подрастал до нужных 8,6 м.

В дальнейшем планировалось нарастить число модулей с сохранением «специализации» для каждого из них. В еще более поздних версиях проекта типовой блок базы снабжался собственным двигателем мягкой посадки и опорами, фактически превратившись в посадочный лунный модуль особой конструкции. Опытный образец одного из таких модулей был использован в 1967 г. во время экспериментов по длительному пребыванию в замкнутой среде, проводившихся в Институте медико-биологических проблем.

К 1971 г. эскизный проект лунной базы был завершен и успешно защищён. Работа Бармина получила одобрение и секретаря ЦК КПСС Дмитрия Фёдоровича Устинова, курировавшего работы по космосу. После беседы с Барминым (во встрече также участвовали молодые конструкторы «Спецмаша» Александр Егоров и Владимир Елисеев), длившейся 7,5 часов, Устинов согласился, что проект «Звезда» должен развиваться и дальше. Но попросил прикинуть стоимость проекта. Оказалось, что на строительство и обживание лунной базы потребуется около 50 миллиардов рублей (80 миллиардов долларов). Таких денег у государства не было и стало ясно, что «Барминград» так и останется проектом. Пусть красивым, но нереализуемым.

Тем не менее, в рамках проекта были разработаны детальные чертежи, а также изготовлены макеты обитаемых модулей и экспедиционных транспортных средств. Может быть, когда-нибудь это и пригодится [3].

Зачем нам нужны лунные базы?

Пока трудно спрогнозировать, когда, как, с помощью каких средств человечество вернется на Луну. Точно так же, как нельзя сказать, кто окажется победителем в новой «лунной гонке». Но одно ясно – после первых полетов человека на Луну остро встанет вопрос о создании лунных баз.

Поэтому давайте поговорим, зачем нам нужны лунные базы. Почему мы не можем ограничиться космическими кораблями с экипажами, которые будут прилетать на Луну, а потом улетать домой.

Причина первая: Лунные базы – уникальный испытательный полигон для новой космической техники. Естественно, начав экспансию в космосе, человечество не ограничится Луной. Пройдёт лет двадцать-тридцать (надеюсь, не больше) и мы полетим к Марсу, Венере, к другим планетам Солнечной системы. Эти экспедиции потребуют разработки новых технических средств, с помощью которых мы сможем покорить новые миры. Но прежде мы должны её испытать. А для этого необходимо создать подходящие условия. На Земле это сделать весьма сложно, на Луне – гораздо проще.

Причина вторая: Лунные базы – великолепная научно-исследовательская площадка.

Не смотря на последние достижения в науке, природа таит в себе ещё множество загадок. Познать тайны мироздания – вот к чему стремится пытливый ум человека. Исчерпав возможности для новых открытий в земных условиях, мы стали это делать с околоземной орбиты. А Луна может существенно расширить наши возможности. Одна астрофизическая обсерватория на обратной стороне нашего естественного спутника чего стоит. Оттуда мы смогли бы заглянуть в такую «глубь» Вселенной, о которой пока даже мечтать не можем. И это было бы очень полезно для науки и техники.

Причина третья: Луна – неисчерпаемый источник природных ресурсов.

Рано или поздно, но ресурсы Земли будут исчерпаны. Волей неволей нам придётся искать их космосе. Сегодня много говорят об астероидах, но до них еще долететь надо. А вот Луна совсем рядом, под боком. Поэтому, её и стоит, в первую очередь, рассматривать как один из возможных источников природных ресурсов. Что именно мы будем добывать на Луне – не рискну сказать. Нужно туда слетать, произвести геологические исследования, и лишь тогда решать, что мы там будем добывать и, что будем доставлять на Землю. По крайней мере, вряд ли мы начнем с гелия-3, который некоторые специалисты считают чуть ли не панацеей от всех наших «энергетических бед». Более вероятно, что мы будем искать те ресурсы, которые можно использовать для строительства лунных баз. И для жизнедеятельности человека на Луне.

Причина четвертая: Луна – «космодром подскока».

Практика космических исследований показала, что отправляться к дальним планетам непосредственно с Земли, вещь весьма затратная. В первую очередь, с точки зрения энергетики. Для преодоления притяжения нашей родной планеты требуется огромное количество топлива. На Луне притяжение в шесть раз меньше и, соответственно, усилий для выхода в дальний космос потребуется значительно меньше. Вероятнее всего, в будущем многотонные межпланетные корабли мы будем собирать именно там. А если ещё будет возможность использовать для этого лунные ресурсы, тогда точно на окраины Солнечной системы мы отправимся именно с Луны. Однако, есть и проблемы. Достаточно их просто перечислить, чтобы понять все те трудности, с которыми еще придется столкнуться при создании лунных баз:

1. Радиация.
2. Лунная пыль.
3. Низкая гравитация.
4. Коммерческая составляющая.

О строительстве в обозримом будущем баз на Луне декларативно говорят в России, США, Европе, Японии и Китае. Российский план предусматривает начало строительства после 2030 года. Но перед этим необходимо выполнить большой объем подготовительных работ, в том числе создать сверхтяжелую ракету. У меня нет уверенности, что все пройдет гладко и трехэтапная российская лунная программа будет выполнена в срок. Тем более, что сам термин «после 2030 года» дает очень большие допущения. Но Роскосмос много говорит о совместном проекте лунной базы с китайцами. Не лучше обстоят дела и у американцев. Но там большие надежды возлагают на частников и всячески пытаются заинтересовать их лунными базами. А пока работают над законодательством, которое позволит коммерсантом искать свои интересы на поверхности естественного спутника Земли.

В Европе хотели бы строить базу совместно с другими. Вероятнее всего, европейцы будут это делать вместе с американцами. Хотя много говорят и о том, что готовы делать это и с Россией.

В Японии существует проект (на уровне концепта) роботизированной лунной базы. Правда, сейчас японцы переместили свои интересы на участие в американской программе «Артемида». Поэтому 2022 год, который был обозначен, как время создания такой базы, уйдет далеко вправо.

Китай говорит о своей базе на Луне, как о деле отдаленного будущего. Даже общие взгляды китайских специалистов на такой проект нигде не фигурируют. Но от представителей Поднебесной можно многого ожидать и они могут преподнести немало сюрпризов.

Таким образом, можно констатировать, что в настоящее время не существует ни одного проекта лунных баз проработанных до уровня проекта «Горизонт» или «Бармингрaда». Концепции нашего долговременного пребывания на поверхности небесного светила носят весьма общий характер. Поэтому я не уделяю им много внимания. Давайте немного подождём, когда они станут приобретать реальные черты, тогда и поговорим. [4] Но мы обязательно вернемся на Луну и построим там свои базы. Луна должна стать и станет форпостом человечества в дальнейшей космической экспансии.

Литература

1. Железняков А. Секреты американской космонавтики. – М.: Эксмо, 2012.
2. Arthur G. Trudeau. Project Horizon. Volume I: Summary and Supporting Considerations. – United States Army, 1959.
3. Железняков А. «Царь-ракета» Н-1. «Лунная гонка» СССР. – М.: Яуза, Эксмо, 2016.
4. Космонавтика XXI века. Попытка прогноза развития до 2101 года / под ред. Б.Е. Чертока. – М.: РТСофт, 2010.

М.Э. Самородова, И.В. Шардыко, В.В. Титов

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРОМ С УПРУГИМИ ШАРНИРАМИ НА ОСНОВЕ РЕГУЛЯТОРА С АКТИВНЫМ ДЕМПФИРОВАНИЕМ

ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург, m.samorodova@rtc.ru

Аннотация

В данной статье рассматриваются особенности добавления упругости в механическую цепь робототехнической системы, связанные с функционированием и управлением. Благодаря повышенной ударопрочности такой робот способен продемонстрировать большую производительность в сравнении с классическим жёстким роботом. Это может быть полезно в экстремальных условиях, в том числе в космической среде. Однако наряду с положительными аспектами, добавление механической упругости приводит к усложнению манипуляционной системы как объекта управления, что необходимо учитывать при построении системы управления. В частности, система управления должна компенсировать главный недостаток – повышенную колебательность. Предложенная здесь система управления построена на основе регулятора с активным демпфированием по централизованной схеме, в соответствии с которой контроллер учитывает как твердотельную динамику, так и динамику привода, при этом учитывается упругость всего робота.

Ключевые слова: упругие шарниры, Matlab/Simulink, CoppeliaSim, демпфирование колебаний, централизованная система управления, гибкий манипулятор, податливый манипулятор, упругий манипулятор, активное демпфирование.

M.E. Samorodova, I.V. Shardyko, V.V. Titov

CONTROL SYSTEM OF MANIPULATOR WITH ELASTIC JOINTS BASED ON REGULATOR WITH ACTIVE DAMPING

Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics Russian Federation, Saint-Petersburg, m.samorodova@rtc.ru

Abstract

This article discusses the features of adding elasticity to the mechanical chain of a robotic system, related to the operation and control. Due to the increased impact resistance, such a robot is able to demonstrate greater performance in comparison with the classic rigid robot. This can be useful in extreme conditions, including in space environments. However, along with the positive aspects, the addition of mechanical elasticity leads to the complication of the manipulation system as a control object, which must be taken into account when building a control system. In particular, the control system must compensate for the main drawback - increased oscillation. The control system proposed here is based on a regulator with active damping according to a centralized scheme, in accordance with which the controller takes into account both solid-state dynamics and the dynamics of the drive, while taking into account the elasticity of the entire robot.

Key words: SEA-joint, Matlab/Simulink, CoppeliaSim, oscillation damping, centralized control, elastic robotic arm, active damping.

Основными причинами создания манипуляционных систем с введённой механической податливостью является недостаточное качество контактных взаимодействий классических жестких манипуляторов. Упругие шарниры обладают повышенной ударопрочностью и надёжностью, так как они способны поглощать энергию при взаимодействии. Это обусловлено тем, что упругие элементы с собственными демпфирующими свойствами любой физической системы приводят к динамическому поведению фильтра нижних частот при внешних нагрузках. Кроме того, появляется возможность более точного и устойчивого управления усилием, накопления энергии и исполнения движений взрывного характера [1].

Механическая упругость даёт значительные преимущества, однако она имеет свою цену. Увеличивая механическую прочность с одной стороны, упругие элементы также вносят дополнительную колебательную динамику в систему, что является нежелательным для точного отслеживания роботом заданной траектории, поэтому необходимо дополнительное демпфирование. Кроме того,

повышается общий порядок динамики системы, так как она имеет уже не две переменные состояния, а четыре. Всё это приводит к повышению сложности робота как объекта управления, так как в данном случае уже не применимы стандартные методы управления для достижения результатов позиционирования и быстродействия по входному сигналу, приближенных к жёстким манипуляторам.

На данный момент управление манипуляторами с упругими шарнирами реализуется большим количеством способов, среди которых можно выделить несколько основных направлений. Прежде всего, это частичная или полная линеаризация по обратной модели динамики [2-5]. Данный подход часто является прямым применением или расширением регуляторов для роботов с жесткими шарнирами. Основным преимуществом здесь является то, что имеются теоретические обоснования работоспособности регуляторов. Однако, как правило, данный метод не реализуется на практике из-за вычислительной сложности и минимальной робастности системы. Также распространены подходы с централизованным [6-7] и децентрализованным управлением [8-9]. Достоинства и недостатки данных подходов были более подробно рассмотрены ранее в статье [10]. Централизованное управление на практике применено в немецком роботе David [7], децентрализованное – в роботах Valkyrie [9], AnyPulator [11], биоморфном роботе ANYmal [12].

Поскольку упругость шарниров в задачах слежения затягивает переходные процессы и требует демпфирования, то потенциально централизованный подход более пригоден для управления упругими шарнирами, поскольку позволяет учитывать взаимосвязи, возникающие между шарнирами, особенно в части реализации демпфирования. Таким образом, в данной статье будет рассмотрен регулятор с активным демпфированием, построенный по централизованной схеме.

Регулятор с активным демпфированием

Динамика системы с учётом инерциальных сил и гравитации, и без учёта трения, записывается следующим образом:

$$\begin{cases} M\ddot{q} + C\dot{q} = -g + K(\theta - q) \\ B\ddot{\theta} + K(\theta - q) = \tau_m \end{cases} \quad (1)$$

где q и θ – положение выходного звена и двигателя соответственно, M – матрица инерции звена, C – матрица, описывающая инерциальные связи между ротором и предыдущими звеньями, $B = B'r^2$ – момент инерции привода относительно выхода редуктора, K – матрица жёсткости, $\tau = K(\theta - q)$ и τ_m – векторы упругих моментов на выходных валах шарниров (моменты шарниров) и моментов двигателя соответственно.

Идея, заложенная в реализацию системы управления, заключается во введении новых координат двигателя для преобразования объекта управления путём добавления фиктивного демпфирующего члена со стороны выходного вала звена [13]. Регулятор, предложенный в данной статье, является расширением позиционного регулятора шарнира [10] на случай управления целым манипулятором.

В данном случае динамика системы, записанная через новую координату – эквивалентный угол поворота двигателя η, имеет вид

$$\begin{cases} M\ddot{q} + C\dot{q} = -D\dot{q} + K(\eta - q) \\ B\ddot{\eta} + K(\eta - q) = u \end{cases}, \quad (2)$$

где u – управляющий сигнал для преобразованного объекта, расчёт которого может быть выполнен при помощи простого ПД-регулятора:

$$u = -K_p(\eta - \eta_D) - K_D\dot{\eta}. \quad (3)$$

С появлением фиктивного демпфирующего элемента D со стороны выходного вала звена, из (1) и (2) можно найти равенство вида

$$K(\theta - q) - g = K(\eta - q) - D\dot{q}, \quad (4)$$

Далее из (4) выражается координата двигателя θ:

$$\theta = \eta + K^{-1}(g - D\dot{q}), \quad (5)$$

Подстановка (5) во второе уравнение системы (1) приводит к уравнению вида

$$B\ddot{\eta} + BK^{-1}(\ddot{g} - D\ddot{q}) + g + K(\eta - q) - D\dot{q} = \tau_m, \quad (6)$$

Таким образом, полный задающий момент на двигателе определяется как

$$\tau_m = u + BK^{-1}(\ddot{g} - D\ddot{q}) + g - D\dot{q} \quad (7)$$

Подстановка новой координаты двигателя η в (3) позволяет переписать управление u через исходную координату двигателя θ, то есть в расчёте на использование только имеющихся датчиков – датчиков положения (угла поворота) двигателя и выходного вала:

$$u = -K_P(\eta_D - \theta) + K_p K^{-1} g - K_P K^{-1} D\dot{q} - K_D\dot{\theta} - K_D K^{-1} D\ddot{q} + K_D K^{-1}\dot{g} \quad (8)$$

Таким образом, для выполнения желаемой команды необходимо обеспечить следующий крутящий момент двигателя

$$\tau_m = -K_P(\eta_D - \theta) + K_p K^{-1} g - K_P K^{-1} D\dot{q} - K_D\dot{\theta} - K_D K^{-1} D\ddot{q} + K_D K^{-1}\dot{g} - \\ -BK^{-1} D\ddot{q} + BK^{-1}\ddot{g} + g - D\dot{q} \quad (9)$$

Анализ статической ошибки

Для определения статической ошибки в установившемся режиме необходимо обнулить все производные и решить оставшуюся систему, найдя зависимость q от η_D. Из системы (2) следует

$$\eta = q, u = 0. \quad (11)$$

С учётом равенства нулю производных, для управляющего сигнала u и положения двигателя θ будут верны зависимости

$$u = K_P(\eta_D - \theta) + K_P K^{-1} g, \quad (12)$$

$$\theta = \eta - K^{-1} g. \quad (13)$$

Учитывая (11)-(13), можно записать

$$K_P(\eta_D - q - K^{-1} g) + K_P K^{-1} g = 0, \quad (15)$$

Откуда следует, что

$$q = \eta_D. \quad (16)$$

В установившемся режиме наблюдается нулевая статическая ошибка, так как реальное значение угла поворота выходного звена равно заданному. Кроме того, это обосновывает использование в качестве задания η_D величины q_D.

Характеристика компьютерного моделирования

Для предварительного исследования предложенного подхода было проведено компьютерное моделирование, в качестве среды разработки был выбран пакет Matlab/Simulink [14] совместно с пакетом моделирования CoppeliaSim [15] (ранее V-REP) [16]. В качестве твердотельной модели объекта моделирования выбрана модель робота Franka Emika Panda [17], имеющаяся во встроенной библиотеке CoppeliaSim. Робот обладает семистепенной схемой, при общем весе 18 кг и грузоподъёмности до 3 кг.

Модели упругих шарниров были разработаны на основе статьи [18], а не оригинальной механики робота Panda, что не противоречит целям исследования. Таким образом, каждый шарнир идентичен и включает в себя: бесколлекторный двигатель Robodrive ILM70x18, волновую передачу Harmonic Drive CobaltLine-32-CPM и упругий элемент (торсионная пружина) с жёсткостью в диапазоне от 500 Н·м/рад до 5000 Н·м/рад. Поскольку упругие свойства гармонического редуктора менее выражены, чем у торсионной пружины, то гармонический редуктор моделируется как идеальное передаточное число.

Ведущая программа моделирования -пакет Matlab/Simulink, где реализованы непосредственно система управления, модели шарниров и фильтры для сигналов о положении ротора и выходного звена. Для визуализации и реализации твердотельной динамики процесса применяется CoppeliaSim. По твердотельной модели также определяются значения динамических параметров робота, таких как масса, моменты инерции и центр масс шарниров, для инициализации робота в Matlab/Simulink.

Для получения гладкого сигнала на выходе реализованы соответствующие фильтры. Это линейные фильтры третьего и пятого порядка для положения двигателя и шарнира соответственно, которые настраиваются путём задания частоты среза. Фильтры также обеспечивают получение производных положения. При этом фильтрация сигнала вносит свои ограничения, так как появляется фазовое запаздывание, из-за чего может быть потеряна устойчивость системы.

В первую очередь, проводится анализ регулятора с точки зрения его реализации. Поскольку реализация полного регулятора со старшими производными сигнала положения выходного звена и производными моментов силы тяжести затруднена в реальных условиях в силу вычислительной сложности, а также зашумлённости сигнала, то необходимо оценить величину соответствующих составляющих управляющего сигнала относительно полного сигнала с точки зрения полезного вклада. Анализ проводится на идеальной модели, соответствующей системе (2)-(3), при ступенчатом входном сигнале.

Для выявления общих закономерностей влияния механической жёсткости рассматривается три варианта условно «упругого» манипулятора при жёсткости, заданной векторами значений: K_1=[500 500 500 500 500 500] Н·м/рад, K_2=[2000 2000 2000 2000 2000 1000] Н·м/рад и K_3=[5000 5000 5000 5000 5000 2000] Н·м/рад соответственно для каждого из шарниров манипулятора. Для краткости ниже введены следующие условные наименования: малая, средняя и повышенная жёсткость манипулятора соответственно для трёх векторов значений жёсткости. Анализ регулятора проводится для первых четырёх шарниров, как наиболее нагруженных.

Матрицы демпфирования D и K_d определяются по следующим формулам [10]:

$$D = 2\gamma_D\sqrt{MK}, \tag{17}$$

$$K_d = 2\gamma_{K_d}\sqrt{K_pB}, \tag{18}$$

где γ_D, γ_{K_d} – коэффициенты сверхдемпфирования.В рамках работы γ_D, γ_{K_d} задаются матрицами, равными diag([1 1 1 1 1 1]).

Анализ идеальной системы

Управляющий сигнал (9) содержит слагаемые со старшими производными сигнала положения и производными моментов силы тяжести по времени:

$$u_6 = K_DK^{-1}\dot{g} \tag{19}$$

$$u_7 = BK^{-1}D\ddot{q} \tag{20}$$

$$u_8 = BK^{-1}\ddot{g} \tag{21}$$

Первым шагом анализа является сопоставление постоянных коэффициентов при каждом слагаемом управляющего сигнала. Если коэффициенты при слагаемых (19)-(21) много меньше остальных, то это даёт обоснование к дальнейшему их анализу и возможности отбрасывания для упрощения построения управляющего сигнала. Сопоставление коэффициентов осуществляется расчётом евклидовой нормы, максимумы которой на всём времени моделирования представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Евклидова норма коэффициентов при слагаемых полного сигнала управления

Евклидова норма							
K		500		2000		5000	
Kp		1000	5000	1000	5000	1000	5000
k_1	K_P	10^3	$5\cdot10^3$	10^3	$5\cdot10^3$	10^3	$5\cdot10^3$
k_2	K_pK^{-1}	2	10	1	5	$5\cdot10^{-1}$	$0{,}25\cdot10^{-1}$
k_3	$K_PK^{-1}D$	8·10	$4\cdot10^2$	4·10	$2\cdot10^2$	2,5·10	$1{,}27\cdot10^2$
k_4	K_D	5,9·10	$1{,}32\cdot10^2$	5,9·10	$1{,}32\cdot10^2$	5,9·10	$1{,}32\cdot10^2$
k_5	$K_DK^{-1}D$	4,5	10	2,2	5	1,4	3,2
k_6	K_DK^{-1}	$1{,}18\cdot10^{-1}$	$2{,}6\cdot10^{-1}$	$3{,}7\cdot10^{-2}$	$8\cdot10^{-2}$	$1{,}8\cdot10^{-2}$	$4\cdot10^{-2}$
k_7	$BK^{-1}D$	$6\cdot10^{-2}$	$6\cdot10^{-2}$	$3{,}2\cdot10^{-2}$	ф$3{,}2\cdot10^{-2}$	$2\cdot10^{-2}$	$2\cdot10^{-2}$
k_8	BK^{-1}	$1{,}7\cdot10^{-3}$	$1{,}7\cdot10^{-3}$	$4{,}35\cdot10^{-4}$	$4{,}35\cdot10^{-4}$	$1{,}74\cdot10^{-4}$	$1{,}74\cdot10^{-4}$
k_9	D	4·10	4·10	8·10	8·10	$1{,}27\cdot10^2$	$1{,}27\cdot10^2$

Как видно из данных таблицы, порядок коэффициентов k_6, k_7 и k_8 минимум в 10 раз меньше порядка остальных коэффициентов. Далее следует сопоставить отдельные составляющие управляющего сигнала. Производные моментов силы тяжести и третью производную положения выходного звена можно получить с помощью численного дифференцирования на основе записанных данных о

движении шарниров в ходе экспериментов. Аппроксимация значений проводится многочленом четвёртой степени методом наименьших квадратов с помощью встроенных функций Matlab.

Для исследования влияния отдельных составляющих управляющего сигнала был проведён эксперимент для малой и повышенной механической жёсткости, а также двух значений виртуальной жёсткости, которая задаётся коэффициентом K_p (1000 и 5000). Графики, отражающие вклад отдельных составляющих в управляющий сигнал, представлены на рис. 1-4. Составляющие u_6, u_7 и u_8 для наглядности представления также выведены на отдельный график. График отклонения от полного сигнала на рис. 5 соответствует разности между полным сигналом (9) и управляющим сигналом без учёта слагаемых (19)-(21). Отклонение управляющего сигнала на всём интервале моделирования для различной механической и виртуальной жёсткости не превышает 10% без учёта интервалов, где сигнал принимает значения близкие к нулю.

Таким образом, в рамках переходного процесса слагаемые u_6, u_7, u_8 не оказывают значительного влияния на управляющий сигнал, из чего можно сделать вывод о том, что данными слагаемыми в целях упрощения реализации регулятора можно пренебречь. Стоит отметить, что обе части анализа зависят от параметров манипулятора, а вторая часть – также и от параметров движения. Однако выбранный манипулятор относится к широкому классу манипуляторов, сопоставимых по массо-габаритным характеристикам, в то время как скорость движения упругих манипуляторов традиционно близка к скорости естественного движения рук человека, так что максимальные значения не превышают значительно рассмотренные в эксперименте. Таким образом, результаты эксперимента можно считать в значительной степени репрезентативными.

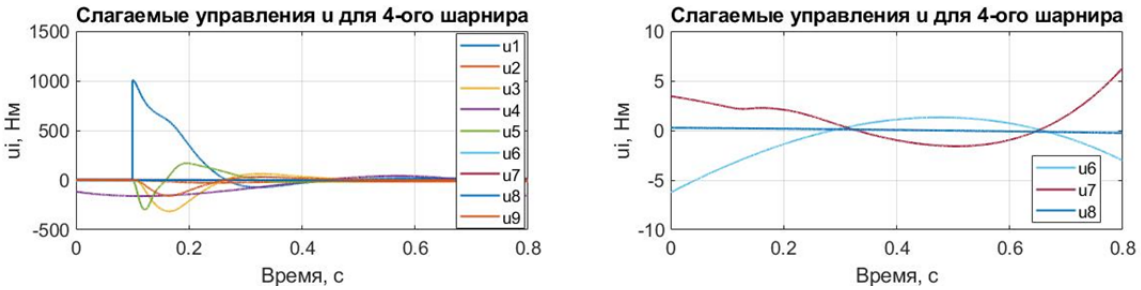


Рисунок 1 – Влияние старших производных на управляющий сигнал при малой механической жёсткости и K_p =1000

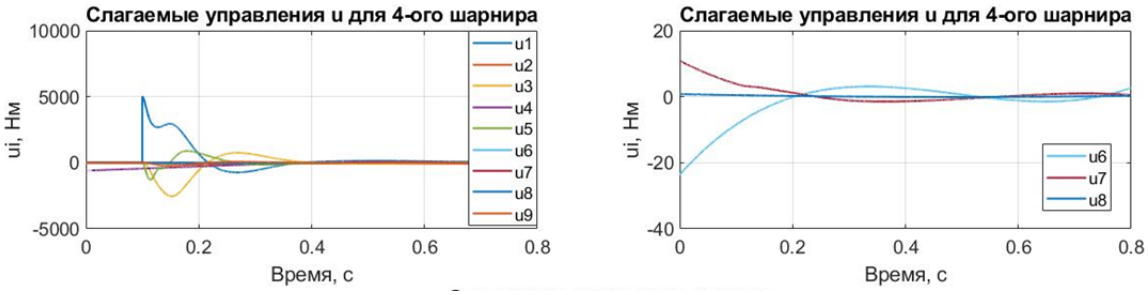


Рисунок 2 – Влияние старших производных на управляющий сигнал при малой механической жёсткости и K_p =5000

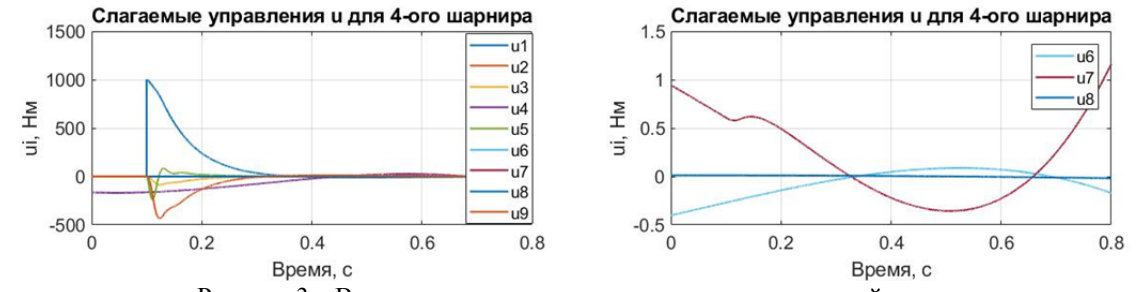


Рисунок 3 – Влияние старших производных на управляющий сигнал при повышенной механической жёсткости и K_p =1000

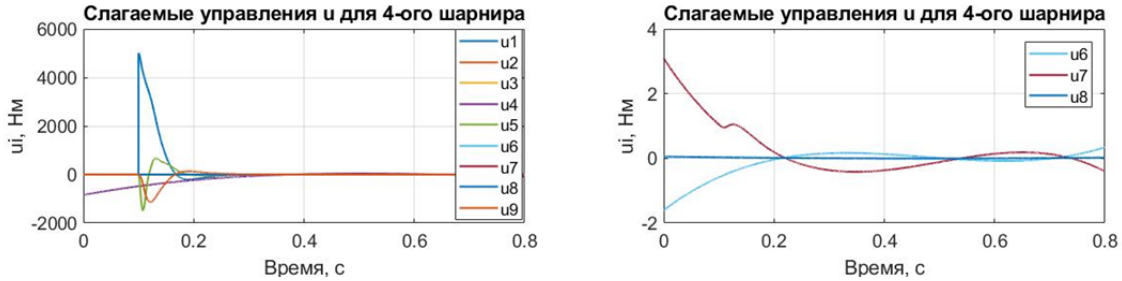


Рисунок 4 – Влияние старших производных на управляющий сигнал при повышенной механической жёсткости и K_p =5000

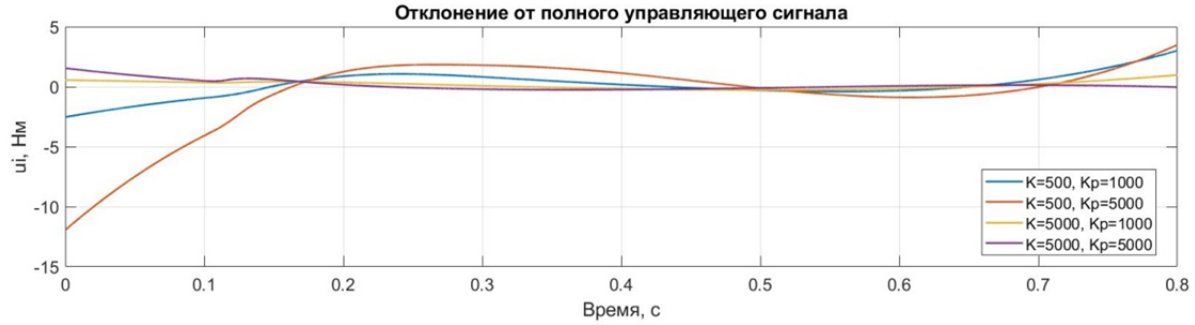


Рисунок 5 – Отклонение управляющего сигнала без учёта u_6, u_7 и u_8 для различной механической и виртуальной жёсткости

Стабилизация положения манипулятора

Управление манипулятором в задаче стабилизации исследуется с учётом принятых выше допущений, рассмотренных на идеальной модели (2)-(3). Для анализа стабилизации манипулятора в качестве управляющего сигнала взят ступенчатый сигнал, поданный в момент времени 0,2 с на все шарниры одновременно. Положение шарниров при различной механической и виртуальной жёсткости представлено на рис. 7 и 9. Развиваемая шарнирами скорость представлена на рис. 8 и 10. По данным графикам видно, что с повышением K_p реальная траектория приближается к желаемой, другими словами, повышается быстродействие системы. Однако дальнейшее увеличение K_p может привести к повышению колебательности и выходу системы из устойчивого положения. С точки зрения статической ошибки, известно, что K_p играет роль коэффициента упругости между внешней силой и вызванным ею отклонением, то есть является коэффициентом так называемой виртуальной упругости.

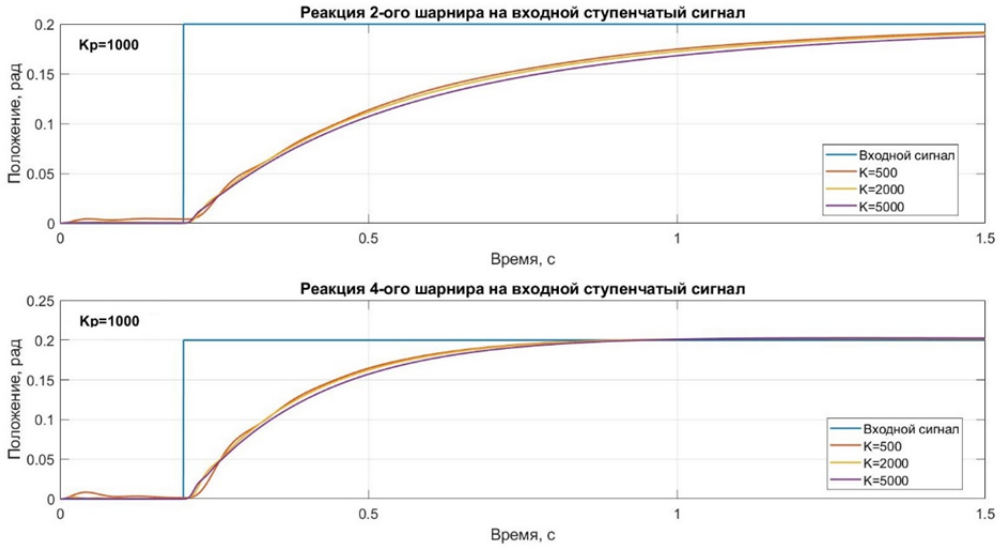


Рисунок 7 – Реакция 2-ого и 4-ого шарнира на входной ступенчатый сигнал при различной механической жёсткости и K_p =1000

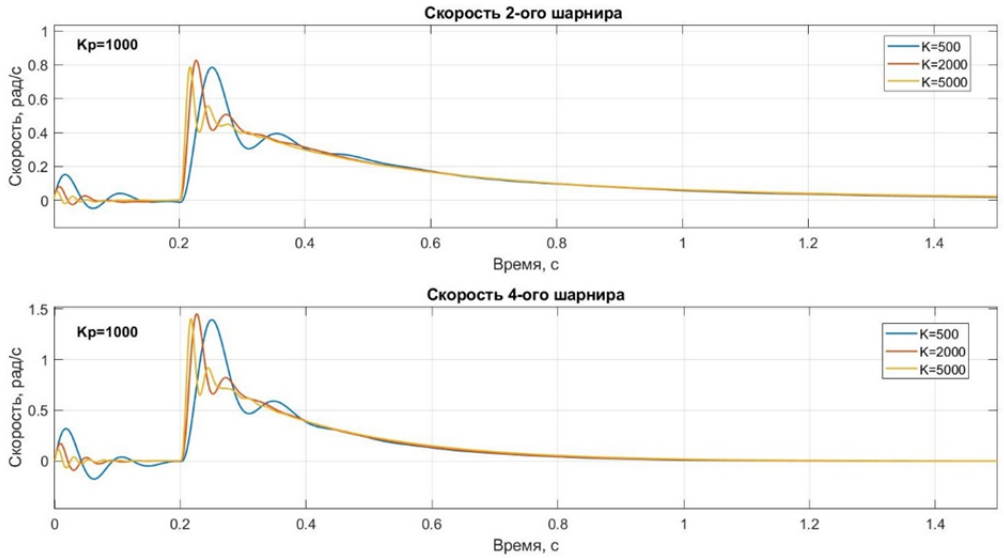


Рисунок 8 – Скорость 2-ого и 4-ого шарнира при входном ступенчатом сигнале и различной механической жёсткости, K_p =1000

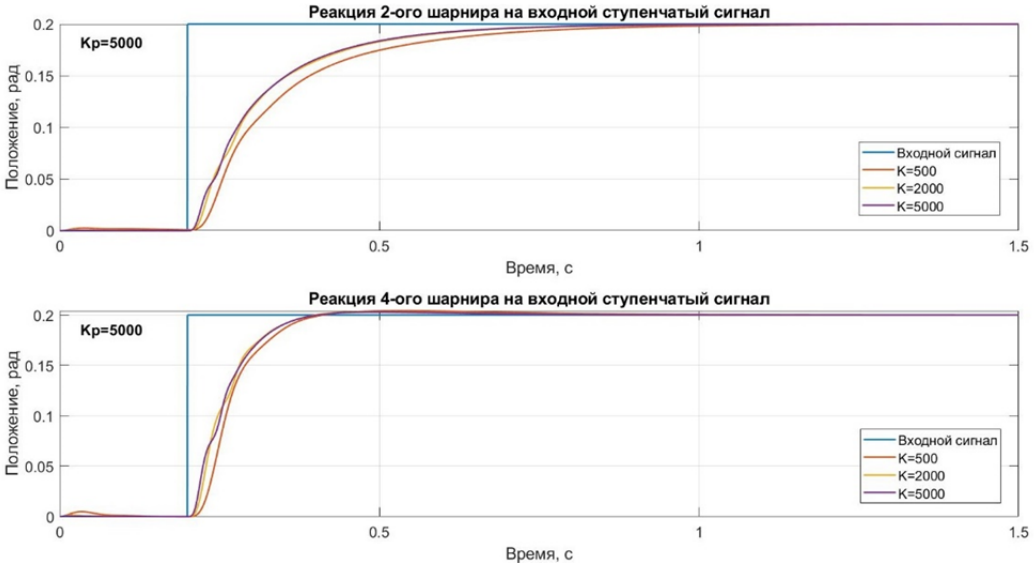


Рисунок 9 – Реакция 2-ого и 4-ого шарнира на входной ступенчатый сигнал при различной механической жёсткости и K_p =5000

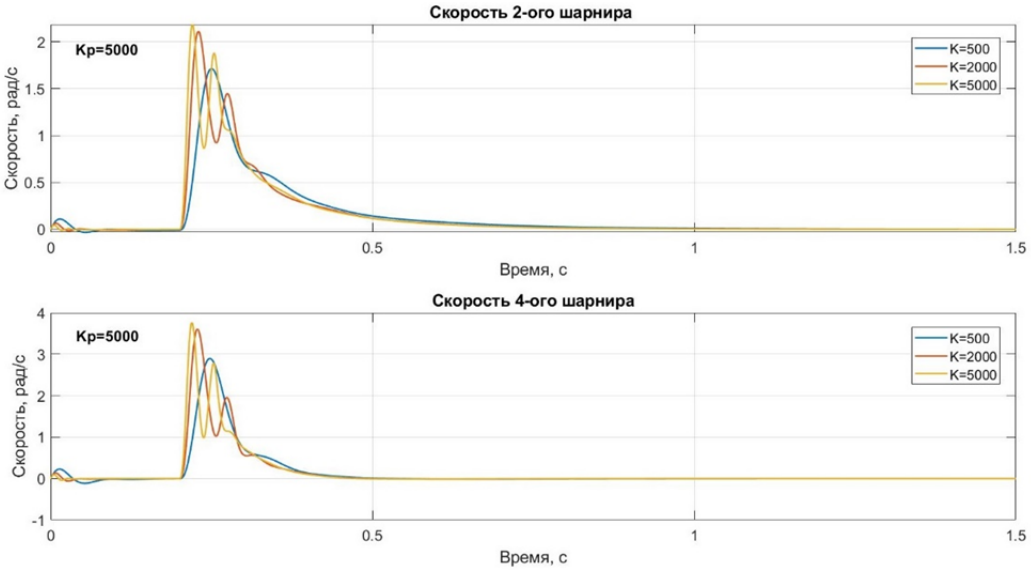


Рисунок 10 – Скорость 2-ого и 4-ого шарнира при входном ступенчатом сигнале и различной механической жёсткости, K_p =5000

Графики на рис. 11 показывают отклонение траектории, рассчитанной при малой и средней жёсткости, от траектории самого жёсткого исполнения при K_p =5000. По графикам видно, что разница в значении угла поворота при малой жёсткости не превышает 0,045 рад, что примерно равно 2,5°, при этом задающим воздействием является поворот на 0,2 рад, что соответствует 11,5°. Из этого следует, что желаемое повышение надёжности системы через понижение жёсткости достигается при допустимом незначительном ухудшении отработки заданной траектории. В то же время, по-прежнему обеспечиваются устойчивость и нулевая статическая ошибка.

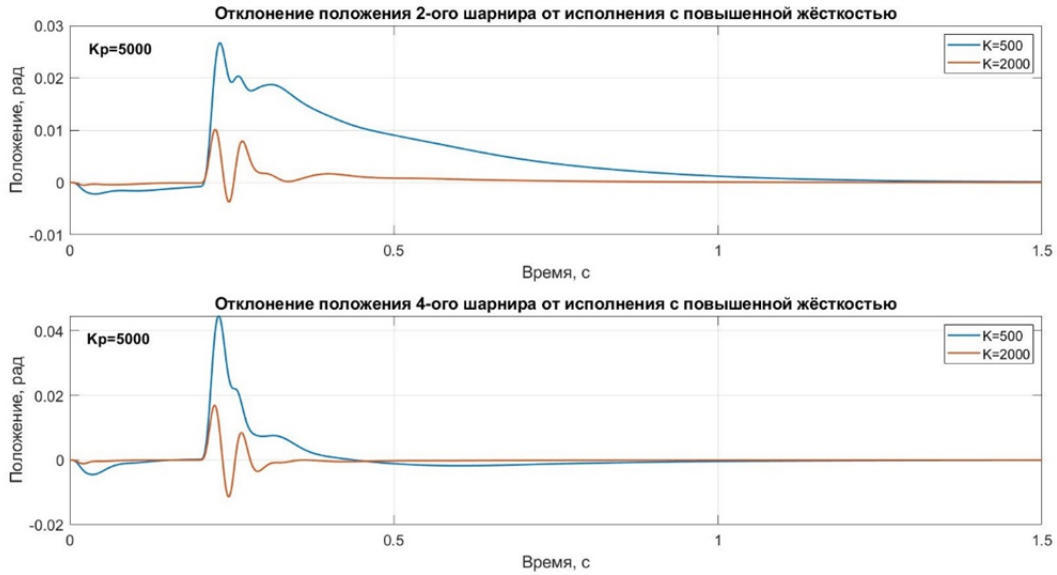


Рисунок 11 – Отклонение траектории при малой и средней жёсткости 2-ого и 4-ого шарнира от траектории, рассчитанной при самом жёстком исполнении и K_p =5000

Централизованный регулятор более сложен в реализации, чем децентрализованный, так как в нём на едином, верхнем, уровне учитываются возникающие взаимосвязи между шарнирами. В рамках данной работы было предложено построение централизованного регулятора на основе активного демпфирования. По сравнению с децентрализованным регулятором, в данном случае обеспечивается совместное демпфирование, что позволяет применять его для шарниров меньшей жёсткости, характеризующихся более долгими переходными процессами по моменту и повышенным влиянием колебаний одних шарниров на динамику других. Было разработано две модификации регулятора: полная и упрощённая, при этом в последней часть составляющих были приравнены к нулю, что позволило сократить вычисления при минимальных отклонениях в работе регулятора, не являющихся критичными. Подтверждена возможность данного регулятора обеспечивать устойчивую работу в диапазоне жёсткости основных шарниров манипулятора (1-4) от 500 до 5000 Н·м/рад. Дальнейшее уменьшение механической жёсткости не рассмотрено, так как сложно осуществимо по конструктивным соображениям. При этом с повышением виртуальной податливости K_p растёт быстродействие системы при различных значениях жёсткости.

Таким образом, была решена задача стабилизации манипулятором с упругими шарнирами. Полученные результаты (алгоритмы управления) могут быть применены при разработке роботов с упругими шарнирами, предназначенных, в частности, для экстремальных условий. Ближайшие планы на будущее включают решение задачи отслеживания траектории для подобных манипуляторов, а также исследование регуляторов на физических макетах.

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 075-01195-20-02.

Литература

1. Pratt G., Williamson M. Series elastic actuators // IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems. Augest 1995. pp. 399–406 vol.1.

2. Petit F., Alin Albu-Schaffer. State Feedback Damping Control For A Multi DOF Variable Stiffness Robot Arm // Proceedings – IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2011.

3. Palli G., Melchiorri C., De Luca A. A. On the feedback linearization of robots with variable joint stiffness // IEEE international conference on robotics and automation. 2008. pp. 1753–1759.

4. Spong M.W. Modeling and Control of Elastic Joint Robots // Journal of dynamic systems, measurement and control. 1987.

5. De Luca A. A., Lucibello P. General algorithm for dynamic feedback linearization of robots with elastic joints // Proceedings IEEE international conference on robotics and automation. 1998. vol. 1, pp. 504–510.

6. Gain scheduling control for a class of variable stiffness actuators based on lever mechanisms/ I. Sardellitti, N. Tsagarakis, A. Jafari, and D. Caldwell // Proceedings IEEE international conference on robotics and automation. June 2013. vol. 29, no. 3, pp. 791–798.

7. Grebenstein M. The DLR hand arm system // IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2011.

8. Albu-Schaffer A., Ott C., Petit F. Constructive energy shaping control for a class of euler-lagrange systems // Proceedings 10th Int. IFAC Symp.Robot Control. 2012. vol. 45, no. 22, pp. 567–575.

9. Paine N. Actuator Control for the NASA-JSC Valkyrie Humanoid Robot: A Decoupled Dynamics Approach for Torque Control of Series Elastic Robots // Journal of Field Robotics. 32(3), May 2015.

10. Shardyko I., Samorodova M., Titov V. Development of Control System for a SEA-Joint Based on Active Damping Injection // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). May 2020.

11. Bodie K., Bellicose C.D., Hutter M. ANYpulator: Design and Control of a Safe Robotic Arm // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2016.

12. Hutter, M. ANYmal - a highly mobile and dynamic quadrupedal robot // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2016.

13. A Passivity-Based Approach for Trajectory Tracking and Link-Side Damping of Compliantly Actuated Robots / M. Keppler, D. Lakatos, C. Ott, A. Albu-Schäffer // International Conference on Robotics and Automation. 16-21 May 2016.

14. MathWorks [Электронный ресурс]. URL: https://www.mathworks.com/ products/ matlab.html/ (дата доступа: 22.09.2020)

15. CoppeliaSim [Электронный ресурс] URL: https://www.coppeliarobotics.com/ (дата доступа: 22.09.2020)

16. Rohmer E., Singh S. P. N., Freese M., V-REP: A versatile and scalable robot simulation framework // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2013. pp. 1321–1326.

17. Dynamic identification of the frankaemika panda robot with retrieval of feasible parameters using penalty-based optimization / C. R. Gaz, M. Cognetti, A. A. Oliva, and P. R. Giordano // IEEE Robotics and Automation Letters. July 2019. vol. 4. no. 4. pp. 4147–4154.

18. Development of mechatronic unit with modular design and increased torque measurement reliability / V. Kopylov, I. Shardyko, A. Truts, K. Volnyakov // 30th International Science and Technology Conference Extreme robotics. 2019.

Е.В. Власенков

АНАЛИЗ ИОНИЗАЦИОННЫХ И НЕИОНИЗАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ В БОРТОВОЙ АППАРАТУРЕ ЛУНОХОДА С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ БОРТОВЫХ РАДИОИЗОТОПНЫХ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛА

АО «НПО им. С.А. Лавочкина», г. Химки, veb@laspace.ru

Аннотация

В статье рассматривается ионизационное дозовое воздействие и эффекты смещения (неионизационное дозовое воздействие) на бортовую аппаратуру перспективного лунохода от ионизирующего излучения космического пространства и радиоизотопных источников, предназначенных для обеспечения теплового режима бортовой аппаратуры в условиях лунной ночи. Расчеты дозового воздействия на бортовую аппаратуру от ионизирующего излучения космического пространства проводились с использованием разработанного в АО «НПО Лавочкина» программного комплекса «LocalDose&SEE», модернизированного для расчета вклада в ионизационную дозу от радиоизотопных источников и расчета эффектов смещения от всех источников излучения. В статье показана методология и приведены результаты расчетов радиационного воздействия, а также определены требования к минимальным уровням стойкости бортовой аппаратуры, что позволит определить возможность использования технического задела существующих лунных миссий.

Ключевые слова: луноход, ионизационная доза, эффекты смещения, неионизационная доза, радиоизотопный источник.

E.V. Vlasenkov

ANALYSIS OF IONIZING AND NON-IONIZING EFFECTS IN ON-BOARD EQUIPMENT OF THE MOON ROVER TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF ON-BOARD RADIOISOTOPE HEAT UNITS

Lavochkin Association, Khimki, Moscow region, Russia, veb@laspace.ru

Annotation

The article discusses the ionizing dose exposure and displacement damage effects (non-ionization dose exposure) on the on-board equipment of the promising lunar rover from space radiation and radioisotope sources designed to ensure the thermal regime of the on-board equipment in a moonlight night. Calculations of the dose effect on on-board equipment from space radiation were carried out using the «LocalDose & SEE» software complex developed by Lavochkin Association , modernized for calculating the contribution to the ionizing dose from radioisotope sources and calculating the displacement damage effects from all radiation sources. The article shows the methodology and presents the results of calculations of the radiation impact, and also defines the requirements for the minimum levels of resistance of on-board equipment, which will determine the possibility of using the technical reserve of existing lunar missions.

Key words: moon rover, ionizing dose, displacement damage effects, non-ionization dose, radioisotope sources.

Миссии по исследованию Луны, указанные в проекте Федеральной космической программы, в ближайшие несколько лет будут сосредоточены на южной полярной области естественного спутника. В настоящее время приоритетными местами посадки будущих миссий являются места, с относительно ровным рельефом поверхности, обогащенные водородом. Данные перспективные районы исследований характеризуются полным отсутствием прямого солнечного света – лунной ночью, наступающей один раз в синодический месяц и длящейся немногим более 14 суток. По данным, полученным с китайского лунохода «Юйту-2», в условиях лунной ночи температура поверхности может опускаться до температуры минус 190 °С. В таких условиях важной инженерной задачей является обеспечение бортовой аппаратуры (БА) тепловой и электрической энергией.

Решение этой задачи определяет состав и конфигурацию системы обеспечения теплового режима (СОТР) лунохода, а именно определяет необходимость использования радиоизотопные источники тепла (РИТ).

Мощные потоки различных видов излучений от бортовых радиоизотопных источников вносят вклад в радиационную нагрузку БА и создают дозовые ионизационные эффекты, случайные одиночные эффекты, структурные повреждения – эффекты смещения, которые являются результатом упругого и неупругого взаимодействия энергетических частиц КП и бортовых радиоактивных источников с ядрами атомов полупроводников и некоторых оптических материалов [5].

1. Рассматриваемая конфигурация лунохода

Одним из возможных вариантов реализации выполнения приоритетных фундаментальных научных задач является использование луноходов-разведчиков, функционирующих в лунных кратерах в окрестностях Южного полюса Луны. Рассмотренный в работе [1] проект лунохода имеет на борту 13 РИТ для обеспечения теплового режима в условиях лунной ночи, длительность которой может составлять 354 часа. В настоящей конфигурации лунохода прохождение периода лунной ночи выполняется в режиме «сна» (гибернации), при котором вся аппаратура, за исключением БА, обеспечивающей выход из этого режима, отключена от шины питания. Проектный облик поисково-разведочного лунохода представлен на рис. 1.

12 РИТ размещаются на трехслойных сотовых панелей (ТСП) и один РИТ размещается на штанге технического зрения что вызвано необходимостью поддержания температурного режима БА, входящей в состав системы автономного технического зрения (САТЗ).

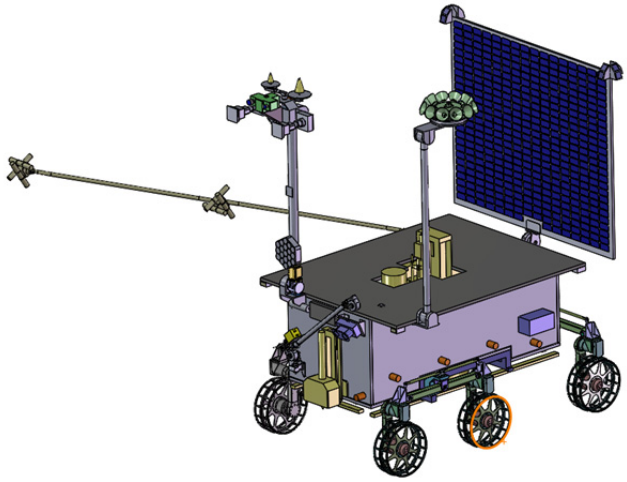


Рисунок 1 – Общий вид лунохода

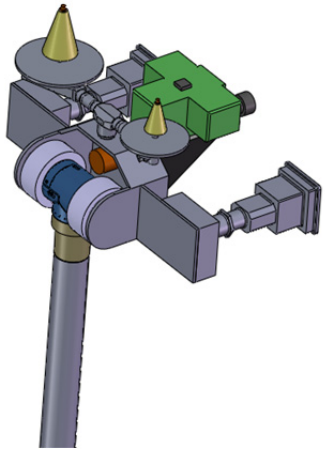


Рисунок 2 – Расположение РИТ на штанге технического зрения

Рассматриваемый поисково-разведочный луноход можно отнести к легкому классу роверов массой до 300 кг, что влечет за собой ограниченный объем для размещения БА и, как следствие, высокую плотность компоновки лунохода. Расположение БА в приборном контейнере лунохода показано на рис. 3.

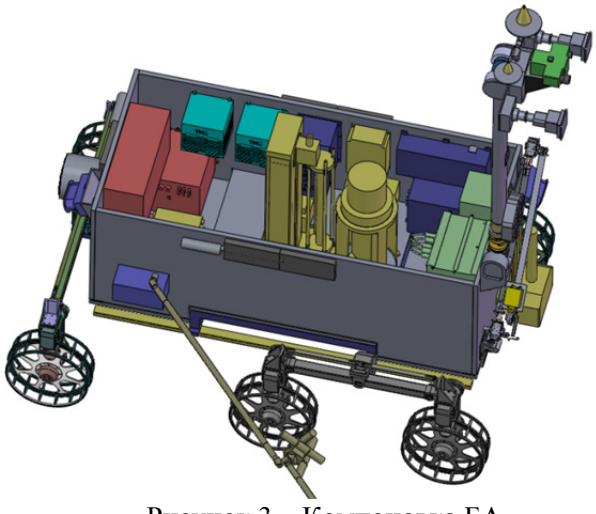


Рисунок 3 – Компоновка БА

2. Радиационные условия функционирования лунохода

Радиационные условия функционирования, прежде всего, зависят от длительности миссии лунохода. В современной мировой космонавтике срок активного существования (САС) роверов, как правило, ограничивается одним годом, таким образом, в статье при формировании исходных данных, длительность функционирования перспективного лунохода принята за один земной год.

При формировании исходных данных по дозовым неионизационным эффектам (эффектам смещения) следует разделять их по источнику воздействующих энергетических частиц, а именно по протонам и нейтронам космического пространства и нейтронам радиоизотопных источников.

Также, для оценки неионизационной дозы в БА, необходимо определить характеристики энерговыделения нейтронов от радиоизотопных источников, а также нейтронов и протонов КП при образовании структурных повреждений.

2.1. Космическое пространство

2.1.1. Ионизационные эффекты

Расчеты параметров воздействия ИИ КП проводились, в соответствии с [6], с помощью программного комплекса «COSRAD» [4], основанного на динамической модели галактических космических лучей, ГКЛ [2] и вероятностной модели солнечных космических лучей, СКЛ [3]. Воздействие радиационных поясов Земли, РПЗ кратковременно: заряженные частицы РПЗ вносят вклад в дозу только на коротком участке выведения КА на межпланетную траекторию.

Результаты расчетов поглощенных доз (в Si) за сферическими защитными экранами (из Al) различной толщины от СКЛ и ГКЛ за 1 год САС, протонов и электронов РПЗ на кратковременном этапе выведения на межпланетную траекторию, представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Поглощенные дозы, рад

Толщина защиты (Al), г/см^2	**СКЛ**	**ГКЛ**	**Электроны РПЗ**	**Протоны РПЗ**	**Суммарная поглощенная доза**
1,00E-02	$1{,}49\times10^{5}$	$1{,}19\times10^{2}$	$6{,}10\times10^{3}$	$4{,}40\times10^{4}$	$1{,}99\times10^{5}$
1,00E-01	$3{,}33\times10^{4}$	$1{,}91\times10^{1}$	$4{,}84\times10^{2}$	$4{,}98\times10^{1}$	$3{,}39\times10^{4}$
1,00E+00	$2{,}77\times10^{3}$	9,83	$1{,}18\times10^{1}$	$6{,}29\times10^{-2}$	$2{,}79\times10^{3}$
3,00E+00	$5{,}79\times10^{2}$	9,01	$5{,}55\times10^{-2}$	$3{,}62\times10^{-3}$	$5{,}88\times10^{2}$
1,00E+01	$9{,}49\times10^{1}$	8,40	$2{,}20\times10^{-2}$	0,00	$1{,}03\times10^{2}$
3,16E+01	$1{,}33\times10^{1}$	6,83	0,00	0,00	$2{,}01\times10^{1}$
1,00E+02	1,16	6,44	0,00	0,00	7,60

2.1.2 Эффекты смещения (неионизационные эффекты)

Структурные повреждения вызывают следующие частицы излучений космического пространства: потоки протонов и нейтронов солнечных и галактических космических лучей (СКЛ и ГКЛ, соответственно), а также вторичные частицы, порождаемые при взаимодействии первичного космического излучения с материалами КА и с лунным грунтом.

Для предварительной оценки неионизационной дозы от КП можно использовать [6], зная значения поглощенных доз. С применением программного комплекса COSRAD был выполнен расчет спектров потоков протонов и нейтронов СКЛ и ГКЛ (с учетом рожденных ими вторичных протонов и нейтронов при взаимодействии с материалом защиты) в зависимости от толщины сферической защиты за срок активного существования (САС) один земной год [8]. Результат расчета данных спектров потоков, приведены на рис. 4 - 7.

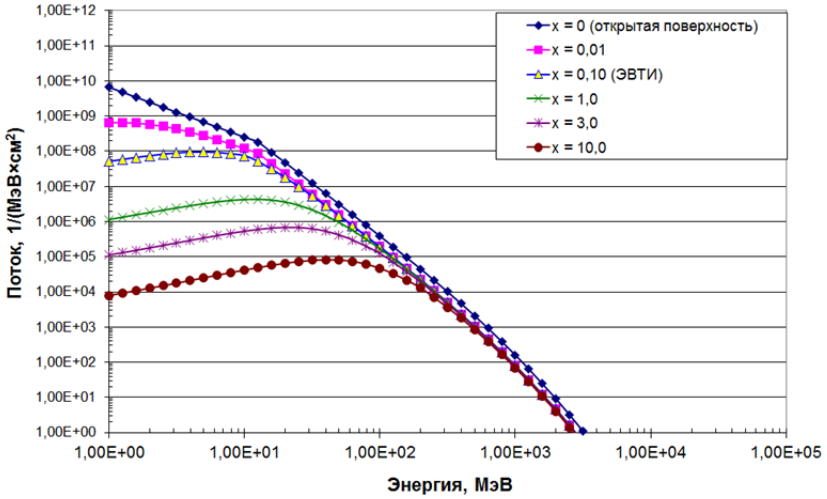


Рисунок 4 – Дифференциальные энергетические спектры потоков протонов СКЛ при вероятности 0,01 для различных значений толщины защиты X в массовых единицах (г/см^2) с учетом вторичных протонов

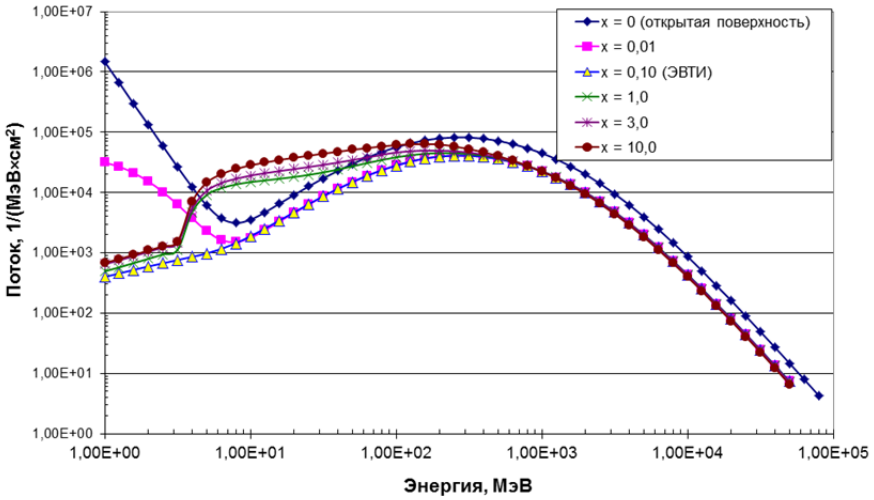


Рисунок 5 – Дифференциальные энергетические спектры потоков протонов ГКЛ для различных значений толщины защиты X в массовых единицах (г/см^2) с учетом вторичных протонов

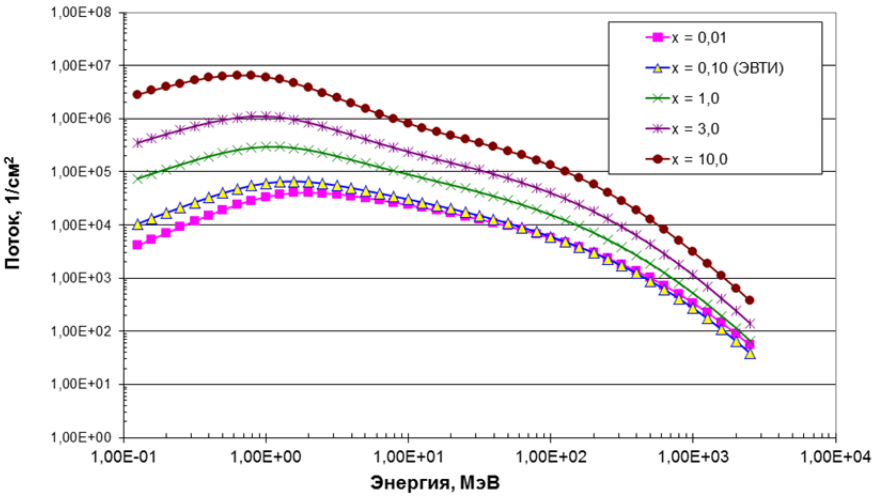


Рисунок 6 – Дифференциальные энергетические спектры потоков нейтронов ГКЛ для различных значений толщины сферической защиты X в массовых единицах (г/см^2) с учетом вторичных нейтронов, рожденных при взаимодействии с материалом защиты

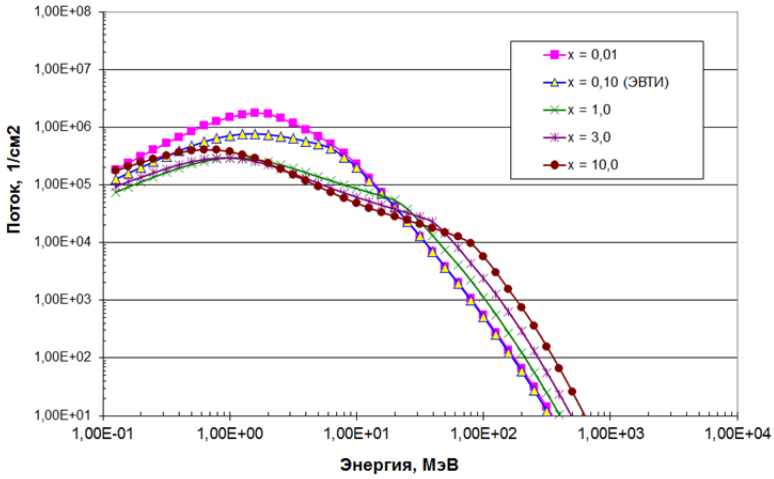


Рисунок 7 – Дифференциальные энергетические спектры потоков нейтронов СКЛ при вероятности 0,01 для различных значений толщины защиты X в массовых единицах (г/см^2) с учетом вторичных нейтронов, рожденных при взаимодействии с материалом защиты

2.1. Радиоизотопные источники

2.2.1 Ионизационные эффекты

РИТ вносит вклад в дозу в соответствии с представленными разработчиком расчетными данными о значениях мощности поглощенной дозы излучения в зависимости от расстояния до источника (табл. 2, рис. 8).

Таблица 2 – Мощность поглощенной дозы (Гр/с) и поглощенная доза (рад) в Si от РИТ за 1 год САС в зависимости от расстояния до источника

Расстояние до ТБ, см	**Мощность дозы от гамма-излучения и рентгеновского излучения, (Гр/с)**	**Мощность дозы от потока нейтронов, (Гр/с)**	**Суммарная мощность дозы от гамма-излучения и рентгеновского излучения и нейтронов, (Гр/с)**	**Суммарная поглощенная доза за 1 год САС (рад)**
10	$1{,}62\times10^{-7}$	$1{,}10\times10^{-8}$	$1{,}73\times10^{-7}$	$5{,}46\times10^{2}$
50	$6{,}30\times10^{-9}$	$4{,}40\times10^{-10}$	$6{,}74\times10^{-9}$	$2{,}11\times10^{1}$
100	$1{,}60\times10^{-9}$	$1{,}10\times10^{-10}$	$1{,}71\times10^{-9}$	5,36
200	$4{,}00\times10^{-9}$	$2{,}80\times10^{-11}$	$4{,}28\times10^{-10}$	1,36

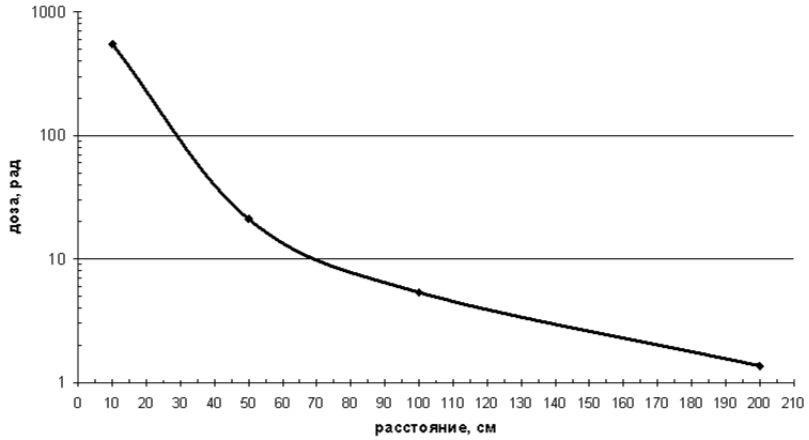


Рисунок 8 – Зависимость суммарной (от всех видов излучений) поглощенной дозы от расстояния до одного РИТ за 1 год САС КА

2.2.2 Эффекты смещения (неионизационные эффекты)

В качестве исходных данных для потока нейтронов РИТ используется величина интенсивности потока нейтронов от одного грамма изотопа диоксида плутония-238, которая не превышает $2{,}5\times10^{4}$ нейтронов/с.

Учитывая значения массы изотопа в одном РИТ, получаем следующие максимальные значения интенсивности потока нейтронов (так наз. мощность источника или выход нейтронов):

- от одного РИТ:

$$F_n \leq 2{,}4\times10^5 \text{ нейтронов/с.} \quad (1)$$

Используя зависимость потока от расстояния до точечного источника, а именно,

$$F_n(R) = F_n / 4\pi R^2, \quad (2)$$

получаем таблицу 3:

Таблица 3 – Зависимость максимальной плотности потока нейтронов ТБ от расстояния до источников

Расстояние до источника R (см)	Плотность потока нейтронов ($см^{-2}\times с^{-1}$)
5	$7{,}62\times10^2$
10	$1{,}91\times10^2$
50	7,62
100	1,91
150	0,86
200	0,48
250	0,31

Основная доля потока нейтронов приходится на интервал энергий от 2 до 3 МэВ, дифференциальный спектр нейтронов от Pu-238 (в условных единицах) представлен на рис. 9.

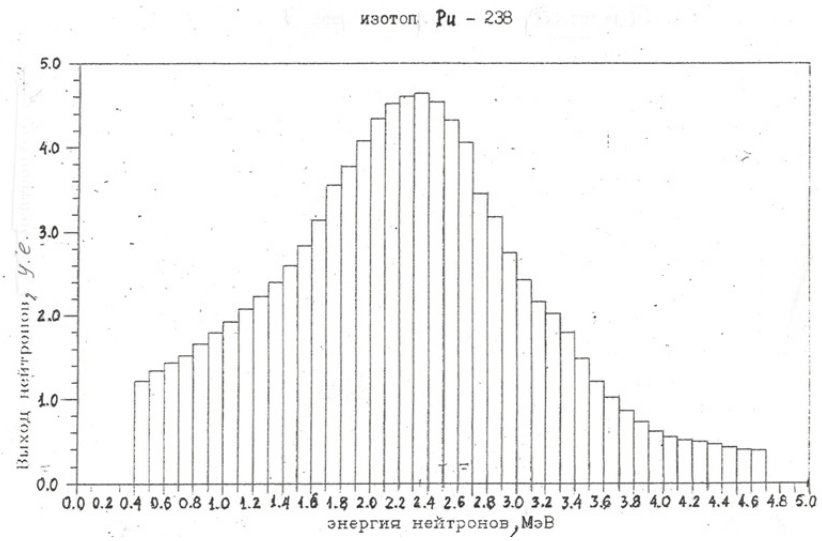


Рисунок 9 – Спектр нейтронов от изотопа плутоний-238

2.2.2.1. Характеристики эффектов смещения

Эффекты смещения описывают при помощи следующих величин [10].

- эквивалентный поток (флюенс) протонов, электронов или нейтронов, нормированный на 50 МэВ, 10 МэВ или 1 МэВ (нормировка зависит от сравнения смещений, созданными спектром частиц, со смещениями, вызванными при испытаниях моноэнергетическим пучком частиц),
- неионизационная линейная передача энергии, *NIEL(E)*:

$$NIEL(E) = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{смещения}, \quad (3)$$

- суммарная неионизационная доза (total non-ionizing dose, *TNID*):

$$TNID = \int F(E)\cdot NIEL(E)\cdot dE, \quad (4)$$

где *F(E)* – дифференциальный энергетический спектр потока частиц, $см^{-2}\cdot МэВ^{-1}$.

Расчётная формула эквивалентного флюенса нейтронов, нормированного на поток протонов с энергией в 50 МэВ, $F_{эквив.\ для\ р\ 50\ МэВ}$, имеет вид ($NIEL_p(50\ МэВ)$ = 0,00349 $МэВ\cdot см^2\cdot г^{-1}$):

$$F_{эквив.\ для\ p\ 50МэВ} = \frac{1}{NIELp(50\ МэВ)} \int F(E) \cdot NIEL(E) \cdot dE \qquad (5)$$

Как следует из (3), для оценки неионизационной дозы в бортовой аппаратуре, необходимо привести характеристики энерговыделения, *NIEL(E),* нейтронов от радиоизотопных источников, а также нейтронов и протонов космического пространства при образовании структурных повреждений. На рис. 10 представлены энергетические зависимости *NIEL(E)* для нейтронов и протонов [10].

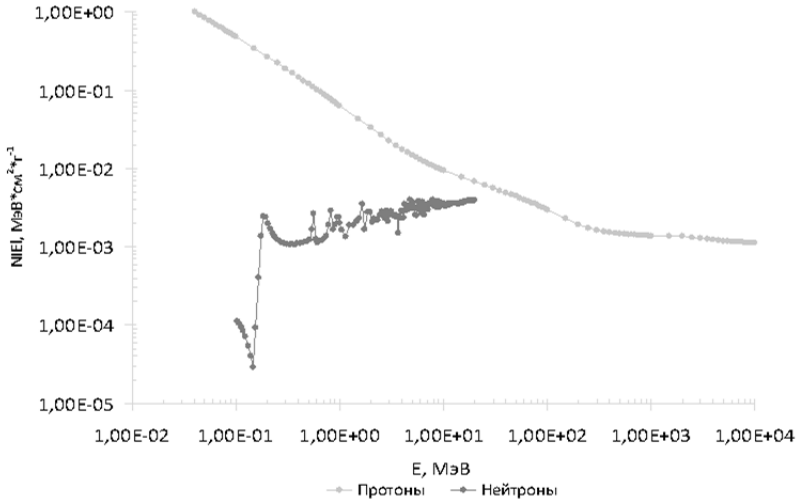


Рисунок 10 – Энергетические зависимости неионизационной линейной передачи энергии *NIEL(E)* для нейтронов и протоно

3. Краткое описание ПМО

3.1 Расчет локальных поглощенных доз от ИИ КП

Применяемое в настоящей работе ПМО «LocalDose&SEE» рассчитывает значения локальной поглощенной дозы методом пространственного интегрирования с использованием трехмерной модели лунохода, функции зависимости величины поглощенной дозы от толщины сферически симметричной защиты, так называемый метод секторирования.

При этом расчет локальной поглощенной дозы от данного вида излучения в точке с координатами (X, Y, Z) проводится по формуле

$$ЛПД(X,Y,Z) = 1/4\pi \sum_{i}^{N} D(x_i)\Delta\Omega_i \qquad (6)$$

где: суммирование производится по всем *N* направлениям (количество точек на сфере интегрирования, окружающей выбранную точку на изделии), $\Delta\Omega_i$ – величина телесного угла в *i*-том направлении (зависит от точности вычислений, т.е. от числа точек на сфере интегрирования), x_i – суммарная толщина защиты всех элементов конструкции изделия в *i*-том направлении (в массовых единицах, г/см^2), x_i - суммарная массовая толщина защиты [г/см^2] всех элементов конструкции КА в *i*–том направлении, $D(x_i)$ – значение поглощенной дозы за сферическим защитным экраном толщиной x_i.

3.2. Расчет локальных поглощенных доз от радиоизотопных источников

Поглощенная доза, создаваемая одним радиоизотопным источником, зависит от расстояния до него и может быть описана следующей зависимостью:

$$D(рад) = D_o/R^2, \qquad (7)$$

где D_o – коэффициент, определяемый из таблиц 2 для РИТ , соответственно; R расстояние от расчетной точки до радиоизотопного источника.

Задавая в ПМО «LocalDose&SEE» координаты расположения всех радиоизотопных источников на луноходе определяем суммарную ЛПД от них.

3.3. Расчет эффектов смещения (неионизационной дозы)

Для расчета дозы неионизационного взаимодействия разработан специальный программный модуль, работающий во взаимодействии с ПК «LocalDose&SEE» [7]. Модернизированный ПК

позволяет рассчитывать как ионизационную дозу, так и неионизационную дозу от радиоизотопных источников и космического пространства, при этом в части учета вклада протонов и нейтронов космической радиации учитываются экранирующие свойства конструкций лунохода и самой БА. Учитывая слабое взаимодействие нейтронов бортовых радиоизотопных источников с материалами лунохода, на настоящем этапе при расчете их вклада в дозовую нагрузку на БА не учитывалось ослабление потока нейтронов, и, соответственно, в статье представлены максимальные значения неионизационных доз РИТ.

4. Расчетные точки (локации)

ПК «LocalDose&SEE» и включенный в него разработанный программный модуль для расчета вклада РИТ позволяют рассчитывать радиационные характеристики в любых местах КА. С учетом того факта, что ЛПД от ИИ КП зависят от массовой защиты, а ЛПД и неионизационная доза от радиоизотопных источников, в основном, зависят от расстояния до них, в настоящей работе рассмотрены характерные локации на луноходе, а именно,

– приборы с минимальной массовой защищенностью от космической радиации, т.е. расположенные на внешней поверхности приборного контейнера (рис. 11-15);

– БА с наибольшей массовой защитой конструкцией лунохода, т.е. внутри приборного контейнера (рисунок 16-17).

Рассматриваемые характерные локации позволяют оценить эффекты смещения для приборов в непосредственной близости от радиоизотопного источника, так и на максимально возможном удалении от него.

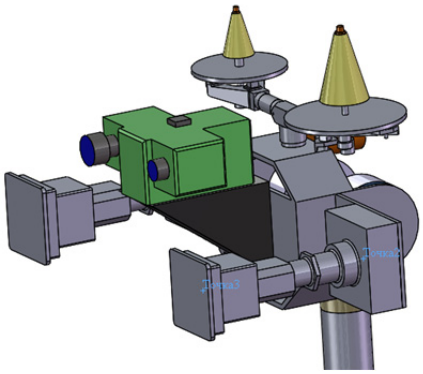


Рисунок 11 – ТВ-спектрометр

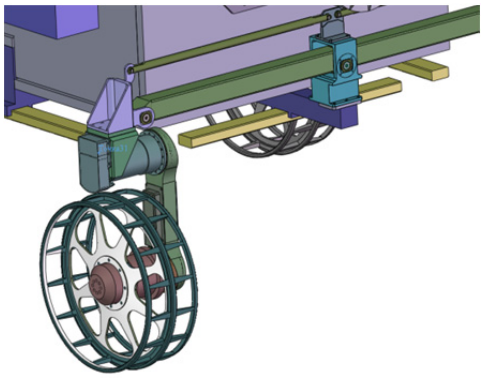


Рисунок 12 – Контроллер мотор-колеса

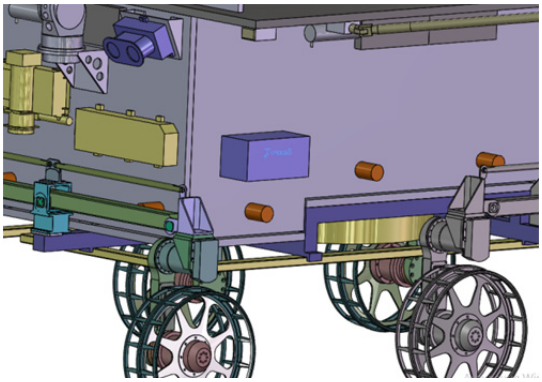


Рисунок 13 – Блок управления (БУ) шасси

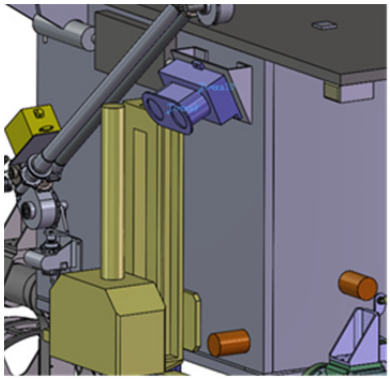


Рисунок 14 – Стереокамера

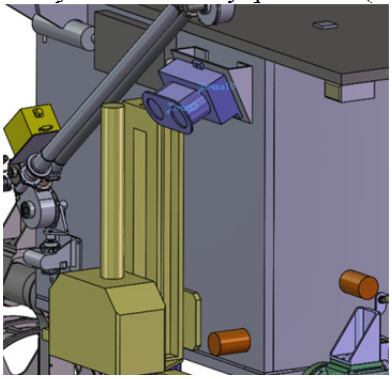


Рисунок 15 – Стереокамера

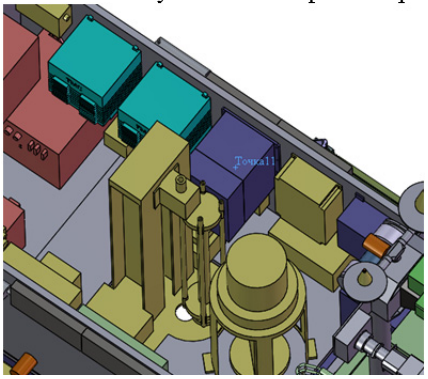


Рисунок 16 – Центральная вычислительная машина (ЦВМ)

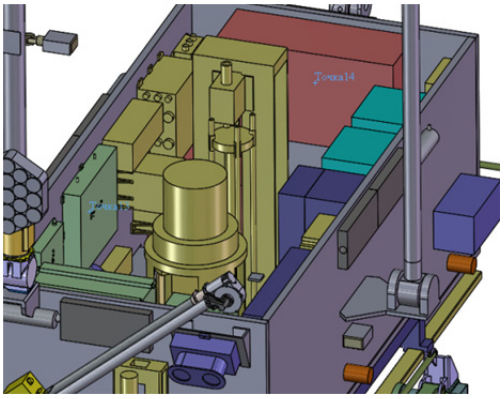


Рисунок 17 – Комплекс автоматики и стабилизации (КАС) и бортовой радиокомплекс (БРК)

5. Результаты расчета локальных поглощенных доз

Модифицированный программный комплекс «LocalDose&SEE» позволяет рассчитывать значения ЛПД от КП и радиоизотопных источников как в геометрическом центра прибора (с учетом массовой защиты самого прибора), так и в месте расположения прибора (без учета).

Рассчитанные значения ЛПД в расчетных точках от всех действующих на луноход видов ионизирующего излучения представлены в табл. 4.

Таблица 4 – Результаты расчета ЛПД, рад

Наименование локации	**Суммарная поглощенная доза ИИ КП**		**Доза от РИТ в геометрическом центре прибора**	**Суммарная накопленная доза в геометрическом центре прибора от всех видов излучения**
	В месте расположения (без учета самого прибора)	**В геометрическом центре прибора**		
Блок электроники ТВ-спектрометра	$1{,}82 \times 10^{4}$	$4{,}34 \times 10^{2}$	$1{,}55 \times 10^{2}$	$5{,}89 \times 10^{2}$
Контроллер мотор-колеса	$9{,}21 \times 10^{3}$	$3{,}21 \times 10^{2}$	$1{,}90 \times 10^{2}$	$5{,}11 \times 10^{2}$
Блок управления шасси	$1{,}59 \times 10^{4}$	$2{,}97 \times 10^{2}$	$4{,}16 \times 10^{2}$	$7{,}13 \times 10^{2}$
Блок электроники стереокамеры	$1{,}49 \times 10^{4}$	$1{,}73 \times 10^{2}$	$1{,}23 \times 10^{2}$	$2{,}96 \times 10^{2}$
ЦВМ	$3{,}00 \times 10^{3}$	$8{,}78 \times 10^{1}$	$1{,}87 \times 10^{2}$	$2{,}75 \times 10^{2}$
Блок электроники ШБУ	$1{,}09 \times 10^{4}$	$1{,}55 \times 10^{2}$	$9{,}04 \times 10^{1}$	$2{,}45 \times 10^{2}$
БРК	$5{,}28 \times 10^{3}$	$6{,}47 \times 10^{2}$	$1{,}90 \times 10^{2}$	$8{,}37 \times 10^{2}$
КАС	$4{,}75 \times 10^{3}$	$1{,}76 \times 10^{2}$	$1{,}36 \times 10^{2}$	$3{,}12 \times 10^{2}$
Примечание: суммарная ЛПД в приборе от всех видов излучения рассчитана для точки в геометрическом центре, при этом использовалось следующее приближение: прибор рассматривался, как «монолитный» блок со средней плотностью, определяемой по формуле $\rho = m/V$, где m – масса прибора, V – его объем.				

Суммарная доза в расчетной точке включает ЛПД в геометрическом центре прибора от ИИ КП и ЛПД в этой точке от РИТ.

Процентный вклад дозы от радиоизотопных источников в суммарную ЛПД представлен в табл. 5.

Таблица 5 – Процентный вклад дозы от РИТ в суммарную ЛПД

Наименование прибора	**Процент вклада накопленной дозы от РИТ в суммарную локальную дозу**
Блок электроники ТВ-спектрометра	26,3%
Контроллер мотор-колеса	37,2%
Блок управления шасси	58,3%
Блок электроники стереокамеры	41,6%

Наименование прибора	Процент вклада накопленной дозы от РИТ в суммарную локальную дозу
ЦВМ	68,0%
Блок электроники ШБУ	36,9%
БРК	22,7%
КАС	43,5%

Как видно из табл. 5, для приборов, наиболее близко расположенных к РИТ, дозовая нагрузка, в большей степени, определяется его воздействием, так для прибора ЦВМ вклад в ЛПД от радиоизотопных источников доходит до 68%.

Данные таблицы 4 позволяют определить требования к радиационной стойкости ЭРИ: достаточно применять ЭРИ с РС от 1,3 крад (в случае проведения испытаний) и до 4 крад (в случае подтверждения РС справочными данными и, тем самым, использования трехкратного запаса по дозе). Как видно, радиационная стойкость БА лунохода для САС 1 год обеспечивается применением ЭРИ уровня «Industrial».

6. Результаты расчета неионизационной дозы

В настоящей работе оценивается доза в месте расположения приборов БА (без учета ослабления дозы внутри прибора), т.е. учитывается компоновка лунохода и расстояние до источников нейтронов. Этот подход целесообразен на ранних этапах проектирования для предварительного определения уровня стойкости используемых ЭРИ без детализации конструкции прибора. Более того, в отличие от космических излучений (протонов, прежде всего), доза от нейтронов при учете конструктивных особенностей прибора уменьшится примерно на 10-20%.

Рассчитанные значения неионизационной дозы в расчетных точках от всех действующих видов ионизирующего излучения представлены в табл. 6.

Таблица 6 –Результаты расчета неионизационной дозы, рад

Наименование локации	Суммарная накопленная неионизационная доза, рад		Суммарная неионизационная доза в геометрическом центре прибора, рад
	ИИ КП	РИТ	
Блок электроники ТВ-спектрометра	0,162277	0,202849	0,365126
Контроллер мотор-колеса	0,048307	0,001758	0,050065
Блок управления шасси	0,145091	0,001754	0,146845
Блок электроники стереокамеры	0,139148	0,004346	0,143494
ЦВМ	0,029769	0,002651	0,03242
Блок электроники ШБУ	0,106536	0,00406	0,110596
БРК	0,036504	0,003086	0,03959
КАС	0,034698	0,001846	0,036544

Как и следовало ожидать, наибольшее значение неионизационной дозы имеет блок электроники ТВ-спектрометра, расположенный в непосредственной близости от РИТ на штанге технического зрения (рисунок11). Стоит заметить, что расчетные точки в геометрическом центре, рассматриваемые в настоящей статье, являются демонстрационными локациями. При расчетах реальных дозовых нагрузок на ЭРИ задаются расчетные точки в реальном месте расположения их в приборе, т.е. учитывается конструкция прибора.

Результаты расчета показывают, что в конфигурации СОТР с локальным расположением РИТ на ТСП неионизационная доза составляет менее 1 рад. Однако в случае конфигурации СОТР с РИТ, объединенными в группу из 6 или 8 штук необходимо обстоятельно подходить к выбору расчетных точек в приборах, близко расположенных к таким сборкам РИТ.

В работе рассмотрена конфигурация лунохода, в которой для обеспечения функционирования в условиях приполярных областей Луны состав и конфигурация СОТР предполагают использование РИТ.

Рассчитанные значения ЛПД могут быть использованы для формирования требований к стойкости БА по дозовому эффекту на ранних этапах проектирования [9], а также для определения необходимости проведения испытаний отдельных ЭРИ (или аппаратуры в целом). Как показывает расчет

ЛПД, радиационная стойкость БА лунохода для САС 1 год обеспечивается применением ЭРИ уровня «Industrial».

С другой стороны, зная радиационную стойкость приборов, можно на этапе компоновки КА или планетохода размещать БА таким образом, чтобы максимально обеспечить его защиту другими приборами и конструкциями КА, а также оптимально расположить относительно радиоизотопных источников для выполнения требований по радиационной стойкости.

Расчетные значения дозовой неионизационной нагрузки необходимы для определения стойкости к структурным повреждениям ЭРИ, чувствительной к данным эффектам смещения. К ним, в первую очередь, относятся биполярные аналоговые ИМС и оптоэлектронные приборы. В каждом конкретном случае необходимо тщательно анализировать перечень используемых в приборе ЭРИ с выявлением наиболее подверженных структурным повреждениям и корректно определить их стойкость к эффектам смещения (испытания или использование надежных справочных данных).

В рассматриваемой конфигурации перспективного лунохода, разработанного на основании создаваемого задела по текущим лунным проектам [1], приборный состав, в основном, не подвержен эффектам смещения, даже для БА, расположенной в непосредственной близости к РИТ, поскольку, по литературным данным, минимальная стойкость к эффектам смещений составляет 25-30 рад [5].

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. ГОСТ 25645.150-90. Галактические космические лучи. Модель изменения потоков частиц. М.: Госстандарт, 1991.

3. ГОСТ Р 25645.165-2001. Лучи космические солнечные. Вероятностная модель потоков протонов. М.: Госстандарт, 2001.

4. 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.

5. Ионизирующие излучения космического пространства и их воздействие на бортовую аппаратуру космических аппаратов / Под науч. ред. докт. техн. наук, проф. Г.Г. Райкунова. – М.: ФИЗМАТЛИТ. 2013. – 256 с.

6. ОСТ 134-1034-2012. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование космических аппаратов. Методы испытаний и оценки стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов к воздействию электронного и протонного излучений космического пространства по дозовым эффектам. – 34 с.

7. Пичхадзе К.М., Хамидуллина Н.М., Зефиров И.В. Расчет локальных поглощенных доз с учетом реальной конфигурации космического аппарата / Космические исследования, т. 44, № 2, 2006, с. 179 - 182.

8. Хамидуллина Н.М., Артемов М.Е., Зефиров И.В. Компьютерные методики расчета параметров радиационных условий в космическом пространстве и на борту космических аппаратов // Научное издание «Проектирование автоматических космических аппаратов для фундаментальных научных исследований», под ред. В.В. Хартова, В.В. Ефанова: в 3-х т. Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2014 г. Т. 2. С. 864 – 947.

9. Хамидуллина Н.М. Влияние радиационных условий полета космических аппаратов на радиационную стойкость электрорадиоизделий бортовой радиоэлектронной аппаратуры // Проектирование автоматических космических аппаратов для фундаментальных научных исследований / Под ред. В.В. Хартова, В.В. Ефанова: в 3-х т. Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2014. Т. 2. С. 948-961.

10.Space engineering. Calculation of radiation and its effects and margin policy handbook, ECSS, ECSS-E-HB-10-12A, 17 December 2010, pp. 50 – 68.

А.И. Быков, А.В. Артемьев

ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ НАТУРНО-ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ХОДОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАНЕТОХОДА

Филиал АО «НПО Лавочкина» в г. Калуга, Калуга, bykovartem1994@yandex.ru, arav@laspace.ru

Аннотация

Представлено обоснование применения методики натурно-имитационного моделирования для оценки ходовых характеристик планетохода. Описан подход, комбинирующий компьютерное моделирование и испытания с использованием макетного образца колесного движителя планетохода, который является основным инструментом натурно-имитационного моделирования. Рассмотрены ключевые подходы к моделированию ходовых характеристик планетоходов. Проведен анализ специализированных стендов по оценке тягово-сцепных свойств колесных движителей. Обоснована область применения натурно-имитационного моделирования в части отработки системы управления движением планетохода. Исследованы критерии подобия для масштабного моделирования колесного движителя планетохода. Сформированы и проанализированы графики зависимостей массовых и инерционных коэффициентов от коэффициента линейного масштаба. Графически подтверждено значение масштабного коэффициента, обеспечивающее имитацию лунного гравитационного воздействия на колесный движитель планетохода. Определена область применения натурно-имитационного моделирования в части наземной экспериментальной отработки планетоходов.

Ключевые слова: планетоход, колесные шасси, натурно-имитационное моделирование, масштабное моделирование, ходовые характеристики планетохода, Луноход-1, Луноход-2, наземная экспериментальная отработка планетоходов.

A.I. Bykov, A.V. Artemev

SUBSTANTIATION OF NATURAL-IMITATION MODELING METHODS APPLICATION FOR ESTIMATION OF A PLANETARY ROVERS' DRIVING CHARACTERISTICS

Affiliate of Lavochkin Association, Kaluga, bykovartem1994@yandex.ru, arav@laspace.ru

Annotation

The substantiation of the natural-imitation modeling method application to assess a planetary rovers' running characteristics is presented. An approach is described that combines computer modeling and testing using a prototype of a rover wheel, which is the main tool for natural-imitation modeling. The key approaches to modeling the planetary rovers' running characteristics are considered. The analysis of specialized stands for assessing the traction-coupling properties of wheel is carried out. The field of application of natural-imitation modeling is substantiated in terms of development of the planetary rover's motion control system. Similarity criteria for large-scale modeling of a rover wheel are investigated. The graphs of the dependences of mass and inertial coefficients on the linear scale coefficient were formed and analyzed. The value of the scale factor, which provides an imitation of the lunar gravitational effect on the planetary rover's wheel, has been graphically confirmed. The field of application of natural-imitation modeling in terms of ground-based experimental development of planetary rovers is determined.

Key words: rover, wheeled chassis, full-scale simulation, natural-imitation modeling, rover running characteristics, Lunokhod-1, Lunokhod-2, ground experimental testing of rovers.

Одним из наиболее важных этапов жизненного цикла космического аппарата (КА) является наземная экспериментальная отработка (НЭО) [1] [2]. Наземные испытания в первую очередь направлены на оценку корректности конструкторских решений и подтверждение надежности функционирования систем и всего КА в целом. Кроме того, в рамках проведения НЭО могут быть обнаружены конструктивные дефекты, сформированы предложения по доработке элементов КА и проведена оценка эффективности систем управления.

Полнота и достоверность НЭО напрямую влияет на успех научно-исследовательской миссии. Подтверждением этого является результаты эксплуатации «Лунохода-1, -2», разработанного НПО Лавочкина совместно с ВНИИТрансмаш [3] [4]. В процессе разработки «Лунохода-1, -2» [5] [6] был сформирован научно-методический подход к проведению НЭО планетоходов, который опи-

сан в [7]. Несмотря на то, что с технологической точки зрения известные подходы к проведению испытаний ходовой части планетоходов более совершенны [8], наиболее полную и достоверную оценку ходовых характеристик могут обеспечить только испытания, которые применялись для «Лунохода-1, -2». Недостаточный объем НЭО ходовой части планетохода может привести к частичной или полной потери подвижности планетохода [9].

Однако стоит обратить внимание на то, что в методиках испытаний советских луноходов в основном использовались ходовые макеты [7], а в современных подходах к испытаниям планетоходов большая роль уделяется компьютерному моделированию [8]. Достоинством натурного моделирования, которое применялось для «Лунохода-1, -2», является полнота и достоверность результатов экспериментальной отработки, а компьютерного моделирования или другими словами имитационного в возможности получении результатов без изготовления ходовых макетов. Комбинирование данных подходов позволит сформировать методику, которая будет обеспечивать наиболее полную и достоверную оценку ходовых характеристик планетохода на ранних этапах проектирования.

Целью данной работы является обоснование применения методики натурно-имитационного моделирования для оценки ходовых характеристик планетохода.

Обоснование подходов к оценке ходовых характеристик планетоходов

Рассмотрим основные ходовые характеристики, подтверждение которых требует НЭО планетоходов.

Испытания «Лунохода-1,-2» включали в себя оценку следующих параметров [7]:

- тягово-сцепные свойства колесного движителя;
- тягово-сцепные свойства макетного образца лунохода;
- разгонные и тормозные характеристики шасси;
- устойчивость лунохода.

Так же испытания лунохода включали в себя отработку системы управления движением.

При исследовании тягово-сцепных свойств колесных движителей используются следующие безразмерные параметры [10]:

- коэффициент тяги k_T;
- коэффициент сцепления φ;
- коэффициент буксования $s_Б$;
- коэффициент сопротивления движению f.

Определение значений данных параметров для колесного движителя «Лунохода-1,-2» проводилось на специальном стендовом оборудовании, представленном на рис. 1 [7]. Для имитации лунного гравитационного притяжения экспериментальные исследования проводились на борту летающей лаборатории, оборудованной на базе самолета Ту-104.

В процессе движения колеса измерялись токи тягового и тормозного двигателей, крутящий момент, свободная тяга, обороты и скорость перемещения колеса, а также величина его погружения в грунт. Одновременно определялись механические свойства грунта с помощью конусно-лопастных штампов.

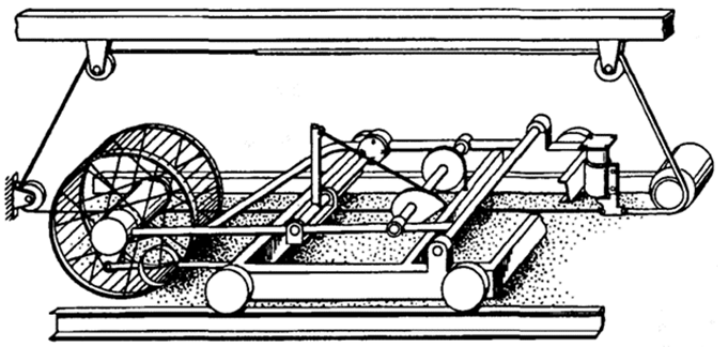
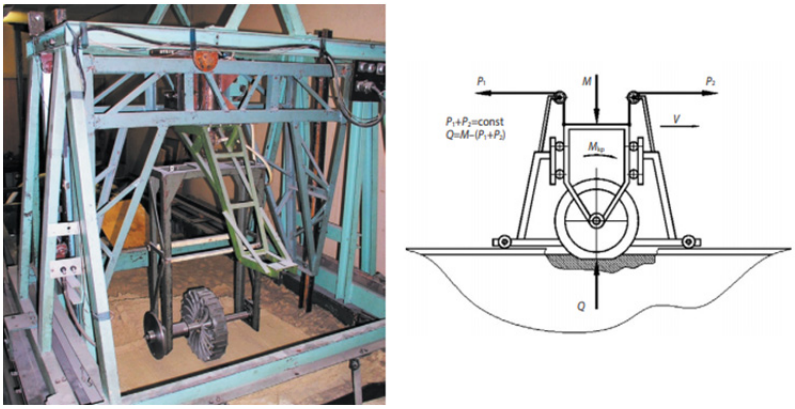


Рисунок 1 – Схема устройства стенда для исследования тягово-сцепных свойств колесного движителя

С развитием технологий появились более совершенные стенды для оценки тягово-сцепных свойств колес наземных транспортных средств [11-13]. Однако для исследования тягово-сцепных свойств колесных движителей планетоходов дополнительно требуется моделирование гравитаци-

онного воздействия космического объекта, на поверхности которого планируется проведение научно-исследовательской миссии. Поэтому НПО Лавочкина совместно с МГТУ им. Н. Э. Баумана был разработан специальный стенд для отработки колес планетоходов (рис. 2) [14]. На базе данного стенда были протестированы более 50 прототипов колесных движителей [15].

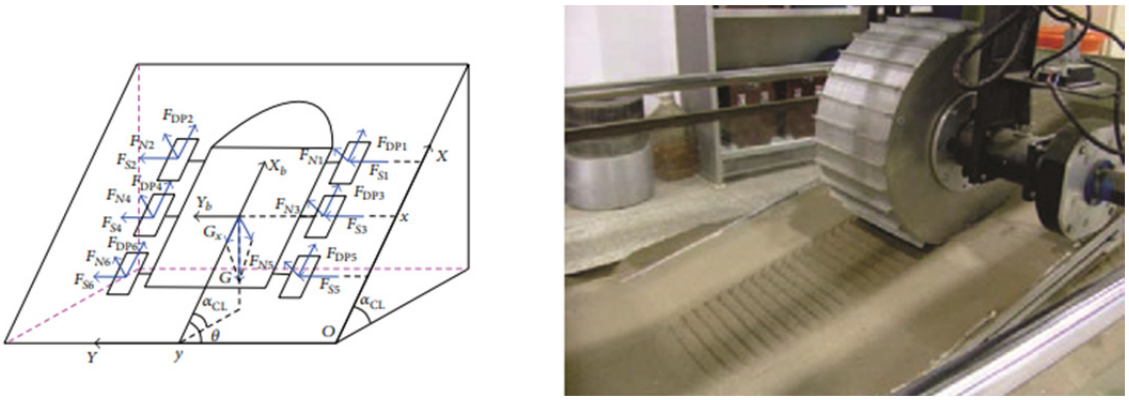


а) б)

Рисунок 2 – Стенд исследования тягово-сцепных свойств колесных движителей планетоходов: а) общий вид стенда; б) схема приложения нагрузок

Выделим главное: для полноты оценки тягово-сцепных свойств колесного движителя планетохода требуется не только учитывать физические свойства грунта, конструктивные параметры колеса и нагрузку на него, но и условия гравитационного воздействия. Достоверность полученных результатов обеспечивается специальным технологическим оборудованием.

При исследовании тягово-сцепных свойств макетного образца «Лунохода-1,-2» определяющими факторами являлись вес и распределение нагрузок между колесами [7]. Как показано в работе [16] современные технологические возможности могут позволить произвести моделирование движения планетохода с целью исследования тягово-сцепных свойств. Причем при исследовании использовалось стендовое оборудование имитирующее движение колесного движителя планетохода по склону со слабосвязанным грунтом (рис. 3).



а) б)

Рисунок 3 – Моделирование тягово-сцепных свойств планетоход: а) схема распределения сил между колесными движителями при моделировании; б) стендовое оборудование, имитирующее движение колесного движителя по склону

Математические модели для оценки устойчивости и динамических параметров шасси сформированы как в теории наземных транспортных средств [10], так и для планетоходов [17]. Исходя из этого, возможность моделирования движения транспортного средства, с целью оценки ходовых характеристик шасси, является очевидной. Примером работы, в которой проводится моделирование динамики транспортного средства, в том числе разгонных и тормозных характеристик, является [18]. Но стоит обратить внимание на то, что одними из наиболее важных составляющих исходных данных для таких моделей являются тягово-сцепные свойства шасси.

Одним из наиболее важных и сложных этапов НЭО является отработка системы управления движением планетохода. Как и большинство робототехнических систем, планетоходы обладают иерархической структурой управления [7] [19]. Наиболее успешным космическим экспериментом

по отработке управления мобильными робототехническими системами на данный момент является «Контур-2» [20]. Планируемый эксперимент «Контур-3» будет направлен на отработку системы управления луноходом [21]. Однако как показано в работе [16] наиболее полную и достоверную оценку системы управления движением на тактическом уровне можно получить, используя специальное стендовое оборудование в совокупности с моделированием движения планетохода на компьютере.

Проведенный анализ демонстрирует, что оценку большинства ключевых критериев в части ходовых характеристик планетохода можно провести с использованием компьютерного моделирования при условии получения данных по тягово-сцепным свойствам колесных движителей на специальном стендовом оборудовании. Так же можно отметить целесообразность комбинирования подходов компьютерного моделирования и экспериментальных стендовых испытаний для отработки системы управления движением планетохода на тактическом уровне.

Кроме того отметим, что систему обезвешивания можно исключить из специального стендового оборудования по оценке тягово-сцепных свойств колесных движителей планетоходов. Для имитации взаимодействия колеса с грунтом при гравитации, отличной Земной, возможно применить подход масштабного моделирования колесного движителя, описанного в работе [7].

Теоретическое обоснование применения подхода масштабного моделирования для натурно-имитационного моделирования

При проведении НЭО «Лунохода-1,-2» были сформированы 3 основных подхода к проведению испытаний по оценке ходовых характеристик шасси [22]:

- масштабное моделирование;
- моделирование с использованием динамически подобных макетов;
- моделирование с использованием частично подобных макетов.

Суть масштабного моделирования состоит в том, что за счет соответствующего выбора масштаба статических и динамических параметров модели обеспечивалось равенство безразмерных критериев подобия, сформированных на основе π-теоремы. Так же при оценке тягово-сцепных свойств колесного движителя «Лунохода-1, -2» было отмечено, что результаты испытаний с обезвешенным макетным образцом колеса совпадают с результатами испытаний, в которых использовался масштабный макет, при условии значения линейного масштаба равного отношению Лунного и Земного ускорений свободного падения [7].

Моделирование с использованием динамически подобных макетов можно рассматривать как частный случай масштабного моделирования. При данном подходе линейные масштабы макетного образца соответствуют штатному аппарату. Однако остальные ключевые параметры изменяются согласно безразмерных критериев подобия для масштабного моделирования.

В работе [7] отмечается, что данные два подхода эффективны, но накладывали ограничения на испытания с использованием макетных образцов луноходов, в частности равенство подрессоренных (корпус) и неподрессоренных (движитель) частей, т.е. должно было моделироваться соотношение веса этих частей. Поэтому для реализации программы НЭО луноходов в полном объеме был сформирован подход моделирования с использованием частично подобных макетов. Сущность такого подхода заключалась в том, что при решении конкретных задач ходовых испытаний выявлялись параметры и критерии подобия, наиболее существенные для моделирования изучаемого процесса. Остальные параметры и соответствующие критерии подобия могли быть исключены из рассмотрения с учетом оценки вносимой погрешности [22].

Так как методика натурно-имитационного моделирования включает в себя оценку тягово-сцепных свойств с использованием макетного образца колесного движителя, то использование в данной методике подхода масштабного моделирования обеспечит полноту и достоверность оценки ходовых характеристик планетохода.

Проведем анализ критериев подобия, приведенных в книге [7], с целью обоснования значения линейного коэффициента $k_l = 1/6$ как наиболее подходящего для имитации взаимодействия колесного движителя планетохода с лунным грунтом при масштабном моделировании.

При проведении НЭО «Лунохода-1, -2» были сформированы критерии подобия на основании π-теоремы, которые приведены в системе (1):

$$\begin{cases} \pi_1' = \dfrac{ql^2}{G} \\ \pi_2' = \dfrac{\tau l^2}{G} \\ \pi_3 = \dfrac{l^2}{aG} \\ \pi_4 = \psi \\ \pi_5 = \mu \\ \pi_6 = \dfrac{gl}{\upsilon^2} \\ \pi_7 = \dfrac{Gt^2}{ml} \\ \pi_8 = \dfrac{F}{G} \\ \pi_9 = \alpha \end{cases} \quad (1)$$

где к параметрам, которые используются в механике грунтов, относятся a – коэффициент сжимаемости, ψ – коэффициент внутреннего трения, μ – коэффициент бокового расширения; обобщенные параметры определенные с помощью конусно-лопастного штампа q – несущая способность, τ – сопротивление вращательному срезу; параметры характеризующие макетный образец l – характерный линейный размер; α – характерный угловой размер; G – сцепной вес; υ – скорость движения; m – масса; F – сила взаимодействия с грунтом; g – ускорение свободного падения.

Допуская то, что масштаб параметров a, ψ, μ, q, τ и α не измены, то на основании системы критериев подобия (1) можно сформировать определяющую систему равенств для масштабного моделирования:

$$\begin{cases} \dfrac{l_З^2}{G_З} = \dfrac{l_Л^2}{G_Л} \\ \dfrac{g_З l_З}{\upsilon_З^2} = \dfrac{g_Л l_Л}{\upsilon_Л^2} \\ \dfrac{G_З t_З^2}{m_З l_З} = \dfrac{G_Л t_Л^2}{m_Л l_Л} \\ \dfrac{F_З}{G_З} = \dfrac{F_Л}{G_Л} \end{cases} \quad (2)$$

где параметры с буквой «З» в обозначении определяют критерий подобия для земной гравитации, а с буквой «Л» в обозначении – для лунной гравитации.

Введем масштабные коэффициенты для основных параметров системы (2):

$$k_l = \frac{l_Л}{l_З}, \quad (3)$$

$$k_g = \frac{g_Л}{g_З}, \quad (4)$$

$$k_m = \frac{m_Л}{m_З}, \quad (5)$$

$$k_\upsilon = \frac{\upsilon_Л}{\upsilon_З}, \quad (6)$$

$$k_F = \frac{F_Л}{F_З}, \tag{7}$$

$$k_t = \frac{t_Л}{t_З}, \tag{8}$$

где k_l – коэффициент линейного масштаба; k_g – коэффициент масштаба ускорений свободного падения; k_m – коэффициент масштаба массы; k_υ – коэффициент масштаба скорости; k_F – коэффициент масштаба силы; k_t – коэффициент масштаба времени.

Данные коэффициенты определяют во сколько раз надо изменить значение параметра физической модели, чтобы соблюсти равенство системы (2). Поэтому, исходя из выражений (3)-(8) систему (2) можно записать следующим образом:

$$\begin{cases} \dfrac{l_З^2}{m_З g_З} = \dfrac{(k_l l_З)^2}{k_m m_З k_g g_З} \\ \dfrac{g_З l_З}{\upsilon_З^2} = \dfrac{k_g g_З k_l l_З}{(k_\upsilon \upsilon_З)^2} \\ \dfrac{g_З t_З^2}{l_З} = \dfrac{k_g g_З (k_t t_З)^2}{k_l l_З} \\ \dfrac{F_З}{m_З g_З} = \dfrac{k_F F_З}{k_m m_З k_g g_З} \end{cases} \tag{9}$$

В рамках данной работы будем задавать значение коэффициента линейного масштаба в следующих пределах $0 < k_l \le 1$. Формулы, определяющие остальные коэффициенты можно вывести из системы (9). Далее в статье будут использоваться следующие коэффициенты:

$$k_m = \frac{k_l^2}{k_g}, \tag{10}$$

$$k_F = k_m k_g. \tag{11}$$

Значение коэффициента масштаба ускорений свободного падения для лунного притяжения будет оставаться неизменным и примет значение $k_g = 1/6$.

Теперь рассмотрим изменение значения массы при равномерном уменьшении линейных размеров для колесного движителя планетохода. Введем еще один коэффициент масштаба массы:

$$k_{m1} = \frac{m_i}{m_0}, \tag{12}$$

где m_0 значение массы колесного движителя при $k_l = 1$, а m_i значение массы колесного движителя соответствующее значению коэффициента линейного масштаба в следующих пределах $0 < k_l \le 1$.

Часто конструкция колесных движителей имеет сложную форму и определить функционально зависимость массы от линейных размеров бывает достаточно сложно. Однако, современные системы автоматизированного проектирования позволяют задавать материал детали, рассчитывать её массу и моменты инерции, а так же проводить равномерное масштабирование линейных размеров.

Поэтому для определения зависимости коэффициента (12) от коэффициента (3) была разработана 3D модель колесного движителя лунохода (рисунок 4), конструкция которого описана в работе [15].

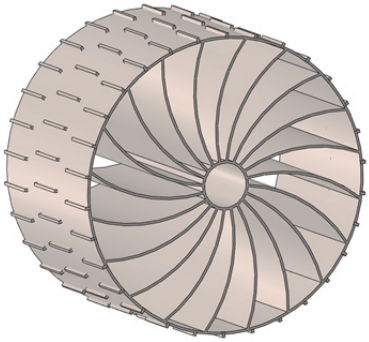


Рисунок 4 – 3D модель колеса лунохода

Для сравнения задавались следующие материалы: ВТ5-1, Сталь 20 и А6. После выбора материала была произведена оценка массовых и инерционных характеристик колесного движителя в зависимости от масштаба. На основе данной оценки были сформированы таблицы соответствия между коэффициентами массы (12) и масштаба (3) для каждого из материалов. На рис. 5 графически представим зависимость коэффициентов (5) и (12) от коэффициента (3).

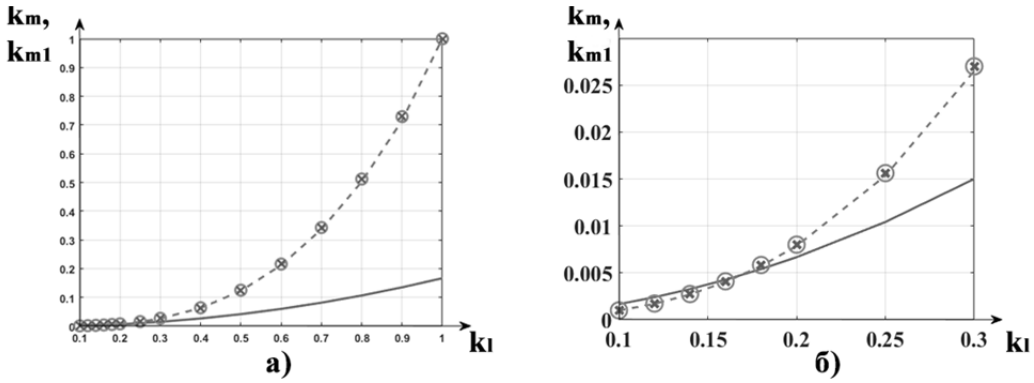


Рисунок 5 – Графики зависимости коэффициентов k_m и k_{m1} от k_l

– зависимость коэффициента k_m от k_l; – зависимость коэффициента k_{m1} от k_l для колеса из материала ВТ5-1; о – зависимость коэффициента k_{m1} от k_l для колеса из материала Сталь 20; х – зависимость коэффициента k_{m1} от k_l для колеса из материала А6; а) графики зависимости коэффициентов k_m и k_{m1} от k_l при $0 < k_l \le 1$; б) графики зависимости коэффициентов k_m и k_{m1} от k_l при $0 < k_l \le 0,3$.

Проведем аналогичный анализ зависимости коэффициентов инерции от коэффициента линейного масштаба. В работе [7] функциональная зависимость коэффициента момента инерции от коэффициентов (3), (4) и (7) представлена следующим образом:

$$k_I = \frac{k_F k_l^2}{k_g}. \tag{13}$$

Аналогично соотношению (12) введем коэффициент инерции для разработанной 3D модели:

$$k_{I1} = \frac{I_i}{I_0}, \tag{14}$$

где I_0 значение момента инерции колесного движителя при $k_l = 1$, а I_i значение момента инерции колесного движителя соответствующее значению коэффициента линейного масштаба в следующих пределах $0 < k_l \le 1$.

Аналогично рисунку 5 построим зависимость коэффициентов (13) и (14) от коэффициента (3) (рис. 6).

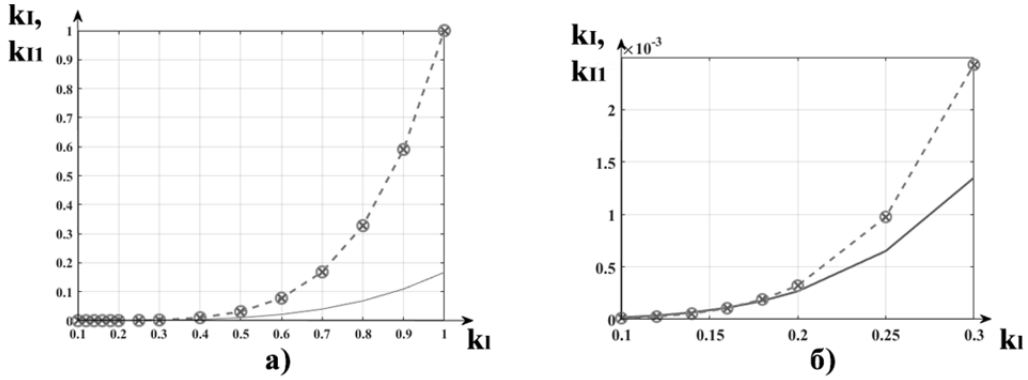


Рисунок 6 – Графики зависимости коэффициентов k_I и k_{I1} от k_l
– зависимость коэффициента k_I от k_l; – зависимость коэффициента k_{I1} от k_l для колеса из материала ВТ5-1; o – зависимость коэффициента k_{I1} от k_l для колеса из материала Сталь 20; x – зависимость коэффициента k_{I1} от k_l для колеса из материала А6; а) графики зависимости коэффициентов k_I и k_{I1} от k_l при $0 < k_l \le 1$; б) графики зависимости коэффициентов k_I и k_{I1} при $0 < k_l \le 0{,}3$.

Как видно из рисунков 5 и 6 графики зависимости коэффициентов массы (5) и (12), а так же коэффициентов моментов инерции (13) и (14) пересекаются в одной и той же точке, соответствующей значению коэффициента линейного масштаба 0,16≈1/6. Данное значение коэффициента линейного масштаба соответствует значению коэффициента масштаба ускорения свободного падения.

На рис. 5 и 6 графически определено значение коэффициента линейного масштаба, обеспечивающее значение коэффициентов масштаба массы и инерции, которые удовлетворят системе (9). Следовательно, данное значение коэффициента (3), позволяет провести имитацию лунного гравитационного воздействия на колесный движитель планетохода, что обеспечивает аналогичные тягово-сцепные свойства при масштабном моделировании.

Так же из рассмотренных графиков становится очевидным отсутствие влияния материала колеса зависимости параметров (12) и (14) от коэффициента (3). Значение остальных коэффициентов масштаба рассмотренных в данной работе можно определить из системы (9).

Исходя из проведенного анализа очевидна значимость научно-методического подхода к проведению НЭО планетоходов сформированного при разработке «Лунохода-1,-2». Совокупность теоретических подходов к методикам оценки ходовых характеристик луноходов и современных технологических возможностей позволяют обеспечить полноту и достоверность результатов исследования движения планетохода по космическому объекту.

Как показано в статье, для проведения исследований ходовых характеристик перспективных планетоходов современные подходы к моделированию движения транспортных средств предоставляют обширный пакет программ для оценки устойчивости и динамических характеристик вновь разрабатываемых шасси. Однако данные исследования могут формировать точные результаты исследований при наличии экспериментальных результатов по оценке тягово-сцепных свойств. Стоит отметить что, применение масштабного моделирования дает возможность провести унификацию специального стендового оборудования по оценке тягово-сцепных свойств колесных движителей планетоходов для космической и автомобильной промышленности.

Предложенный способ оценки ходовых характеристик не является универсальным, потому что ряд испытаний планетоходов потребуют изготовление ходовых макетов. Кроме того конструктивные ограничения могут не позволить применить подход масштабного моделирования.

Однако при возможности использования данного подхода уже на ранних этапах проектирования планетохода можно обеспечить полноту и достоверность оценки ходовых характеристик, сформировать предложения по конструктивным улучшениям, а так же провести разработку и апробацию алгоритмов управления движением.

Литература

1. Шевченко С.Н. Метод обоснования объёмов экспериментальной отработки и количества запусков по программе выведения полезной нагрузки в космическое пространство при переоборудовании межконтинентальных баллистических ракет в ракеты космического назначения // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина №1 (39). 2018. С. 51-54.

2. Богданов Ю.В., Шаргин Ю.Г., Лут М.А. Методический подход к определению оптимальной структуры процесса наземной экспериментальной отработки перспективных космических аппаратов длительного функционирования и их составных частей. // Двойные технологии № 4 (33). 2005. С. 5-9.

3. Виноградов А.П. (ред.) Передвижная лаборатория на Луне Луноход-1. М.: Наука, 1971, 128 с.

4. Громов В.В., Забавников Н.А., Кемурджиан А.Л., Кажукало И.Ф. и др. Передвижение по грунтам Луны и планет. М.: Машиностроение, 1986, 272 с.

5. Маленков М.И. Создание «Лунохода-1» - выдающееся научно-техническое достижение XX века // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина №1 (7). 2011. С. 13-21.

6. Сологуб П.С., Ивановский О.Г. Создание ходовой части первого в мире планетохода «Луноход-1» // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина №4 (6). 2010. С. 43-52.

7. Кемурджиан А.Л., Громов В.В., Кажукало И.Ф. и др. Планетоходы. М.: Машиностроение , 1993. 400 с.

8. Bykov A. I., Artemev A.V., Sova A. N. Results of analysis of experimental ground testing methods of planetary rovers // EXTREME ROBOTICS.2019. №1. P.391-397.

9. Маленков М.И., Волов В.А., Гусева Н.К., Лазарев Е.А. Анализ подвижности марсоходов для разработки систем передвижения и алгоритмов управления планетоходами нового поколения // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. №1 (162). С. 82-95.

10. Вахламов В.К. Автомобили : эксплуатационные свойства : учебник для студ. высш. учеб. заведений / В.К. Вахламов. – 2-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. 240 с.

11. А. с. 1658009 СССР, МПК G01M 17/02, G01M 17/013. Стенд для исследования взаимодействия колеса с деформируемым телом / В.Л. Строков, П.В. Строков, А.А. Карсаков, В.М. Герасун, А.Л. Конюшков (СССР). – № 4687839; заявл. 06.02.89; опубл. 23.06.91, Бюл. № 23. – 4 с.

12. А. с. 1735732 СССР, МПК G01M 17/007, G01M 17/00. Стенд для исследования взаимодействия колеса с грунтом / В.А. Терзян, М.И. Ляско, Н.А. Базикян, В.Р. Никогосян, К.Ю. Ростомян, К.А. Кочарян (СССР). – № 4826184; заявл. 04.09.90; опубл. 23.05.92, Бюл. № 19. – 3 с.

13. Пат. 98812 Российская Федерация, МПК G01M 17/013. Стенд «Грунтовой канал» / Ширяев К.Н., Вольская Н.С., Жариков В.В., Макашев Т.К., Агейкин Я.С., Мирянов М.А., Чичекин И.В., Левников Я.Ю., Бабийчук А.Э.; заявитель и патентообладатель Москва. Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московский государственный индустриальный университет. – № 2010129318/11; заявл. 16.07.2010; опубл. 27.10.2010. – 4 с.

14. Наумов В.Н., Горелов В.А. Совместный опыт МГТУ им. Н.Э. Баумана и НПО имени С.А. Лавочкина в области создания планетоходов. Вестник НПО имени С.А. Лавочкина, 2017, № 36(2), с. 144–146.

15. Наумов В.Н., Козлов О.Е., Машков К.Ю., Бяков К.Е. Обзор и анализ конструкций движителей для перспективных российских луноходов // Известия вузов. Машиностроение. 2017. №7 (688), с. 41-50.

16. L. Zhengca, W. Yang Robust Adaptive Fuzzy Control for Planetary Rovers While Climbing up Deformable Slopes with Longitudinal Slip // Hindawi Publishing Corporation Advances in Aerospace Engineering Volume 2014, Article ID 620890, 10 pages.

17. Авотин Е.В., Болховитинов И.С., Кемурджиан А.Л., Маленков М.И., Шпак Ф.П. Динамика планетохода. М: Наука, 1979 г. 440 с.

18. Егоров О.В., Мазлумян Г.С., Сова А.Н., Шадрин С.С. Метод и результаты моделирования динамики экспериментального двухзвенного активного автопоезда с применением вентильно-индукторных электрических машин // Двойные технологии. №3(84). 2018г. С. 47-58.

19. Петров В. Ф. Структура системы дистанционного управления роботами // Известия ЮФУ. Технические науки. 2004. №9. С. 168-173.

20. Мулюха В. А., Заборовский В. С., Гук М. Ю., Силиненко А. В. Результаты космического эксперимента «Контур-2» по отработке технологий удаленного управления напланетными робототехническими объектами // Известия ЮФУ. Технические науки. 2017. №9 (194). С. 153-169.

21. A.V. Vasilev, A.V. Sergeev Development of requirements for a ground testbed for modeling and research of remote control technologies for a sma // EXTREME ROBOTICS.2019. №1. P.382-390.

22. Быков А.И. Результаты анализа научно-методологического подхода к оценке ходовых характеристик и методов испытаний шасси «Лунохода-1,-2»/ Двойные технологии № 2(91), 2020. – С. 62-66.

М.В. Михайлюк[1], Б.И. Крючков[2], В.М. Усов[2], А.А. Алтунин[2], П.П. Долгов[2]

ВИРТУАЛЬНОЕ ПРОТОТИПИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ МОБИЛЬНОСТИ КОСМОНАВТОВ ПРИ ВЫХОДЕ В ОТКРЫТЫЙ КОСМОС

[1]ФГУ ФГЦ «НИИСИ РАН», Москва, [2]ФГБУ «НИИ ЦПК им. Ю.А. Гагарина, Звездный городок, Московская обл., mix@niisi.ras.ru, V.Usov@gctc.ru

Аннотация

В работе обсуждается метод виртуального прототипирования (МВПТ), реализованный на основе имитационного комплекса, включающего систему виртуального окружения (СВО) со встроенными модулями создания виртуальных моделей и трехмерной визуализации.

Рассматривается приложение СВО для МВПТ различных режимов управления космонавтом индивидуальным транспортным устройством (ИТУ), которое должно предоставить возможность перемещения при выходе в открытый космос (ОК) без страховочного фала.

Отдельное направление представлено сценариями участия в интерактивном эксперименте в виртуальном окружении нескольких космонавтов в составе экипажа. Результатом сценарного подхода должно быть формирование профессиональных компетенций космонавта в отношении готовности к испытаниям виртуальных моделей ИТУ.

Ключевые слова: орбитальные станции (ОС), открытое космическое пространство (ОК), выход в открытый, внекорабельная деятельность (ВнеКД), реактивный ранец космонавта (РРК), индивидуальное транспортное устройство (ИТУ), метод виртуального прототипирования (МВПТ), системы виртуального окружения (СВО).

M.V. Mikhailyuk[1], B.I. Kryuchkov[2], V.M. Usov[2], A.A. Altunin[2], P.P. Dolgov[2]

VIRTUAL PROTOTYPING OF DEVICES FOR INCREASING THE MOBILITY OF COSMONAUTS DURING SPACEWALKS

[1]Federal State Institution «Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences» - SRISA, Moscow, [2]Federal State Budgetary Organization «Gagarin Research&Test Cosmonaut Training Center», Star city of the Moscow region, mix@niisi.ras.ru, V.Usov@gctc.ru

Abstract

The paper discusses the virtual prototyping method (VPM), implemented on the basis of a simulation complex, which includes a virtual environment system (VES) with built-in modules for creating virtual models and 3D visualization.

We consider the application of the VES for modeling of various modes of control by the cosmonaut a personal transport vehicle (PTU), which should provide the ability to move during a spacewalk (SW) without a safety halyard. A separate direction represented by scenarios of participation in an interactive experiment in a virtual environment of several cosmonauts in the crew.

The result of the scenario approach should be the formation of professional competencies of the cosmonaut in relation to the readiness for testing of PTV virtual models.

Key words: orbital stations (OS), outer-space environment (OSE), spacewalk (SW), extra-vehicular activity (EVA), cosmonaut's jetpack (CJP), personal transport unit (PTU), method of virtual prototyping (MVP), virtual environment system (VES).

Одним из значимых направлений применения робототехники в пилотируемых космических полетах является повышение мобильности одетого в скафандр космонавта. Исследования в этой области особенно актуальны применительно к внекорабельной деятельности (ВнеКД) экипажа, как одной из наиболее сложных и опасных полетных операций. К настоящему времени накоплен большой опыт выполнения ВнеКД на орбитальных станциях (ОС) «МИР» и МКС, а ранее – эта операция отрабатывалась в миссиях по программе Аполлон.

Однако до настоящего времени, исходя из требований безопасности, перемещения космонавта при выходах в открытый космос (ОК) выполняются с применением страховочного фала и/или транспортных манипуляторов. В этом варианте космонавт перемещение осуществляет по трассам поручней на внешней поверхности ОС и на удалении от шлюзовой камеры, не превышающей дли-

ну страховочного фала. Для многих практических ситуаций в орбитальных полетах такой подход достаточен для выполнения инспекционных, монтажных, ремонтных и пуско-наладочных работ, а также операций технического обслуживания (ОТО).

Качественно иная ситуация возникает в перспективных проектах, в которых предполагается усложнение операций, возлагаемых на экипаж при выходах в ОК, например, при восстановлении искусственных спутников (ИС) после их выхода из строя, при запуске и съеме с орбиты малых ИС, а также в контексте возможных новых задач при полетах к околоземным астероидам (ОЗА).

Расширение поддержки экипажа для таких миссий связывают с созданием индивидуального транспортного устройства (ИТУ), которое должно предоставить космонавтам возможность перемещения в ОК без страховочного фала и обеспечить:

1. безопасное возвращение на борт ОС;
2. проведение визуальных наблюдений с различных ракурсов обзора;
3. ведение пространственной ориентировки для целей навигации;
4. управление сближением с другими объектами в ОК и др.

С учетом ограничений подвижности в суставах рук и ног у работающего в скафандре космонавта потребуется решать вопросы построения многомодального человеко-машинного интерфейса при пилотировании ИТУ.

В качестве начальной версии – упрощенного прототипа для проектирования ИТУ – рассматривается реактивный ранец космонавта (РРК), варианты которого можно проследить, начиная с миссий программы Аполлон, и далее для миссий на ОС «МИР» и МКС. Но, чтобы реализовать отмеченные выше перспективные проекты, такому изделию необходимо придать улучшенные характеристики по управлению и навигации. Сегодня даже на концептуальном уровне остается много нерешенных вопросов разработки ИТУ, требующих прототипирования на наземных стендах и проведения эргономических испытаний с участием человека.

По совокупности требований такое ИТУ правомерно рассматривать как реактивный аппарат для перемещения человека в ОК, имеющий определенное сходство с мобильными роботами.

Поэтому при разработке вариантов спасения космонавта в ОК в непрогнозируемой осложненной ситуации (например, при потере работоспособности космонавта при выходе в ОК) может быть рассмотрен дополнительный вариант исполнения ИТУ в виде автономного мобильного беспилотного робота, оснащенного манипулятором «двурукого» захвата объектов в ОК и контролируемого дистанционно другим членом экипажа с рабочего места на ОС.

Для преодоления указанных трудностей выбора и конкретизации функционала ИТУ и дальнейшего уточнения его характеристик необходимо уточнить место и роль имитационного эксперимента с использованием метода виртуального прототипирования (МВПТ).

Этап прототипирования при эргономическом проектировании ИТУ

При разработке перспективных образцов ИТУ для перемещения в ОК, имеющего прототипами РРК, необходимо принимать во внимание тот факт, что проведение натурных испытаний такого изделия может оказаться не только дорогостоящим и трудоемким мероприятием, но также потребовать исключительных мер обеспечения безопасности испытателей [1,2]. Этим мотивируется необходимость этапов виртуального прототипирования на моделирующем стенде для отработки концепции применения и дальнейших эргономических испытаний предлагаемых вариантов построения и эксплуатации ИТУ.

Что касается истории вопроса, то первоначально всплеск активности исследований РРК относится к периоду миссий программы Аполлон и ОС «МИР», когда появились первые американские и отечественные РРК для выхода в ОК без страховочного фала.

Проведённые натуральные испытания с выходом в ОК, по мнению зарубежных специалистов, не дали убедительных результатов по уровню безопасности этих режимов ВнеКД, хотя задачу повышения мобильности космонавта, одетого в скафандр, удалось решить на значительном удалении от ОС. Показательный пример успешности действий экипажа по этой схеме в одной из экспедиций программы Аполлон продемонстрировало возвращение в строй неисправного ИС после выполненных экипажем операций технического обслуживания (ОТО).

Тем не менее, проведенные натурные испытания показали необходимость улучшения человеко-машинного интерфейса в режиме ручного управления пилотированием РРК, то есть необходимость эргономической проработки вопросов юзабилити.

Современное состояние вопроса разработки ИТУ можно кратко охарактеризовать следующим образом.

На МКС прежние разработки РРК странами-участниками в полной мере не тиражировались. Основное назначение существующей версии РРК на американском сегменте (АС) МКС как «упрощенного устройства помощи для спасения во время ВнеКД» (*англ.*: Simplified Aid For EVA Rescue – SAFER) состоит в безопасном возвращении космонавта из ОК на борт МКС. Изделие находится в режиме готовности, а астронавты имеют возможность отрабатывать на борту американского сегмента МКС пилотирование SAFER с помощью бортового виртуального имитатора-тренажера.

Следует принимать во внимание прогнозные оценки, что в дальнейшем технологии перемещения и навигации роботов в ОК составят одно из ключевых направлений совершенствования эксплуатационных характеристик ИТУ с учетом разнообразных объектов инспекции и наблюдения (включая астероиды, искусственные спутники Земли и др.). Данное направление привлекает внимание исследователей в русле долгосрочных целей исследования космоса с ассистивной поддержкой экипажа роботами в ходе ВнеКД [1].

В настоящее время вопросы выбора вариантов построения ИТУ изучены недостаточно.

Это определяет актуальность данного направления работ.

Предполагается, что в зависимости от целевого назначения должны разрабатываться:

- пилотируемое ИТУ для управления космонавтом в ручном режиме;
- управляемое дистанционно ИТУ в варианте беспилотного аппарата (автономного мобильного робота), если потребуется с его помощью транспортировать космонавта, потерявшего работоспособность в ОК.

Для получения ответов на эти вопросы в работе рассматривается реализация МВПТ с помощью разработанной в ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН системы виртуального окружения (СВО) VirSim. Для отработки управления ИТУ необходимо было предусмотреть в составе СВО наличие подсистем, программных модулей, виртуальных объектов и компонентов отображения визуальных сцен, спецификация и взаимодействие которых раскрывается в работе в аспектах новизны этой задачи для космических приложений.

С учетом перспектив использования ИТУ сформулированы новые требования к взаимодействию в системе «космонавт-робот» на основе многомодальных интерфейсов [3,4]. Бесконтактный метод управления ИТУ должен помочь преодолеть трудности выполнения космонавтом во время ВнеКД тонких манипуляций в перчатках при ношении скафандра.

Проблемы задания функционала ИТУ и моделирования его функционирования в ОК

При определении функционала ИТУ можно отметить некоторые общие взгляды на особенности конструкции, которые прослеживаются с самого начала разработок и испытаний РРК:

1. ИТУ должен быть интегрирован со скафандром космонавта для выхода в ОК.
2. Двигатели ИТУ должны обеспечивать 6 степеней подвижности для того, чтобы космонавт мог, используя ИТУ, выполнять развороты, стабилизировать положение и перемещаться в пространстве в требуемом направлении.
3. Человек-оператор (ЧО) позиционирует себя в ИТУ и ведёт пространственную ориентировку в системе координат, связанной со схемой человеческого тела. Авионика должна строиться таким образом, чтобы было реализовано управление движением центра масс и различные эволюции вокруг центра масс.
4. ЧО, пользуясь средствами бортовых измерений, должен иметь возможность выполнять поиск навигационных ориентиров и не терять из виду ОС.
5. Конечные устройства управления типа джойстика должны обеспечить контроль шести степеней свободы во время ВнеКД.

Улучшение функционала ИТУ может быть достигнуто разными способами, часть из которых планируется внести в разрабатываемую модель для проведения эргономических испытаний.

В работе [5] отмечается, что в настоящее время управление ориентацией РРК ведётся с помощью стационарных двигателей. Добавление гироскопов малого управляющего момента (CMGs) к системе ориентации ИТУ могло бы улучшить устойчивость платформы перемещения космонавта для ВнеКД, сэкономить бортовое топливо ИТУ и увеличить продолжительность полетов ИТУ [5].

Улучшить функциональность ИТУ в отношении человеко-машинного взаимодействия может внедрение метода управления громкой связью на основе распознаваемых голосовых команд многомодального интерфейса (для расширения возможностей или даже замены существующего ручного контура, использующие оконечные управляющие устройства типа многостепенного джойстика – многостепенной ручки управления) [4]. Предполагается, что этот метод управления без помощи рук может позволить космонавтам управлять движением ИТУ голосовыми командами

во время транспортировки полезных грузов и выполнения задач с применением манипулятора, если такой манипулятор будет предусмотрен конструкцией ИТУ.

Модальность голосового управления потребует включить в состав носимую гарнитуру с беспроводной связью, настраиваемый экран дисплея оператора, а также систему распознавания голосовых команд [3].

В работе [6] показана возможность моделирование SAFER с использованием технологии построения виртуального прототипа.

Возможности ознакомительного обучения использования SAFER для перемещения в ОК показаны в работе [7], в которой описано применение для этих целей ВР.

Анализ особенностей применения компьютерного моделирования при подготовке космонавтов к ВНЕКД выполнен в работе [8].

Следует особо выделить то обстоятельство, что сегодня технологии ВР применяются не только в обучении, но и для эргономического проектирования на базе МВПТ разрабатываемых перспективных космических комплексов.

Особенности построения СВО для моделирования ИТУ и сценариев его применения

Для того чтобы промоделировать характеристики ИТУ в работе выбран метод построения виртуального окружения на моделирующем стенде. Системы виртуального окружения (СВО) широко применяются в отечественном космическом тренажеростроении. В этом направлении ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН совместно с НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина разработала и экспериментально апробировала ряд инновационных решений. На сегодняшний день удалось достичь интеграции ряда ранее разработанных модулей в многофункциональный программный комплекс – СВО VirSim.

Для прототипирования ИТУ для выхода в ОК в разработанной СВО VirSim потребовалось предусмотреть ряд новых возможностей.

Общая схема применения СВО выглядит следующим образом. Предполагается, что в СВО оператор видит виртуальную сцену на экране монитора или в очках виртуальной реальности и осуществляет управление выбранным виртуальным объектом с помощью одного из средств управления (виртуального или реального пульта, голосовых команд, устройств захвата движения и т.д.). В составе СВО имеется конструктор, который на этапе подготовки виртуальных прототипов комплектующих визуальной сцены поддерживает динамические объекты разного типа: электрический и ракетный двигатели, шарниры, специальные системы частиц и т.д.

Также в СВО реализованы датчики: положения, ориентации, сило-моментные, расстояния, линейных и угловых скоростей, радиоактивного излучения и др. На этапе прототипирования составляющих сложной визуальной сцены создаются виртуальные камеры (с ортографической или перспективной проекцией) и источники освещения различных типов.

В VirSim предусмотрено подключение программ, реализующих различные математические модели для динамических режимов перемещения ИТУ.

В СВО смоделирован набор различных типов датчиков, отвечающих требованиям ведения навигации и контроля положения ИТУ в пространстве.

Реализация того иного режима управления виртуальной моделью ИТУ определяется сценарием эксперимента и/или тренировки. Вопрос построения сценариев и их реализации на основе СВО является одним из самых сложных не только в аспектах погружения операторов в ВР, но и в плане достижения высокого психологического подобия содержания совместной работы в составе экипажа на удалении космонавтов друг от друга. Существо проблемы заключается в поиске путей рационального опосредованного взаимодействия участников малой группы по каналам коммуникации через доступ к единому информационному пространству. В составе моделирующего стенда должна быть представлена в многопортовом режиме отображения участникам коммуникации инструментальная информация с борта ОС и с бортовых систем ИТУ, моделируемая в разных ракурсах и на разном удалении визуальная картина внешней обстановки.

В отношении выполнения режима пилотирования ИТУ космонавтом на выходе в ОК можно отметить необходимость учета опыта наработок, которые получены при моделировании управления пилотируемым ровером в различных наземных (изоляционных) экспериментах и при моделировании работы с беспилотным аппаратом в космических экспериментах серии «Контур-2».

Эти исследования проведены в течение ряда последних лет в организациях Роскосмоса совместно с отечественными вузами и НИИ, в частности, по управлению моделью мобильного робота в виртуальной среде: НИИ ЦПК им. Ю.А.Гагарина совместно с ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН; ИМБП РАН и МГУ им. М.В. Ломоносова совместно с НИИ ЦПК им. Ю.А.Гагарина; НИИ ЦПК им. Ю.А.Гагарина совместно с ЦНИИ РТК и др. В этих экспериментах имитировались операции пе-

ремещения пилотируемых лунных роверов и беспилотных мобильных роботов и задавались различные виды человеко-машинных интерфейсов в зависимости от режимов управления космическими роботами. В ближайших планах проведение исследований возможностей СВО VirSim для отработки в экспериментах как индивидуального, так и группового применения ИТУ при ВнеКД.

В ряде работ, посвящённых вопросам психологического подобия деятельности, моделируемой на стендах и тренажёрах той, которая наблюдается в реальной рабочей среде, отмечается необходимость учета фактора профессиональных компетенций [8].

Компетенция – это определённая характеристика личности, необходимая для выполнения определённых работ и позволяющая её обладателю получать необходимые результаты работы. В общем случае, чем шире профессиональный опыт работника опасной профессии, особенно успешного выполнения ответственных заданий в экстремальной обстановке, тем больше оснований говорить о наличии у него должного уровня компетенций.

Не случайно, в тех случаях, когда даётся характеристика выполнявшего полеты космонавта, всегда отмечается опыт реальной ВнеКД. Этот вид деятельности требует не только владения навыками безопасного выполнения большого числа предметных действий, но и умений ведения коммуникаций, контроля правильности своих действий и действий партнёров, адекватными реакциями на изменение условий и осложнение обстановки. Но наряду с опытом выхода в ОК часто принимается во внимание и тот перечень модельных ситуаций, которые освоил специалист при работе на наземных стендах и тренажерах, с которыми ознакомлен и которые умеет распознать и правильно интерпретировать.

В этом смысле моделирующие стенды имеют несомненное преимущество по отношению к реальным условиям выхода в ОК, поскольку в процессе подготовки космонавт может освоить огромное количество самых разных ситуаций, что, безусловно, способствует в дальнейшем поддержанию ситуационной осведомленности, в то время как реальный опыт обычно насчитывает до десятка выходов в ОК. Но для того, чтобы на моделирующих стендах с помощью СВО формировались компетенции, необходимо предусмотреть групповые занятия с заданием ролевых позиций и сфер ответственности за принятия решений при таком распределении функций, которые задаются регламентами ВнеКД. Это означает, что наряду со штатным порядком выполнения выходов в ОК для экипажа необходимы демонстрационные режимы потенциально опасных или даже катастрофических исходов при непреднамеренных ошибках или несчастных случаях, в том числе, при отказах техники или ее неправильной эксплуатации, поломках, ресурсных ограничениях и т.п.

В этой связи одним из направлений развития VirSim рассматривается создание архива правдоподобных вводных заданий, которые требуют идентификации ситуации со стороны контролирующего процесс ВнеКД руководителя и принятия решений на спасение и эвакуацию космонавта, работающего в ОК с использованием ИТУ.

В настоящее время в ряде работ НИИ ЦПК имени Ю.А.Гагарина отработаны базовые требования к построению сценариев для формирования профессиональных компетенций космонавта при отработке практических ситуаций выхода в ОК.

При создании технических средств подготовки космонавтов большое значение имеет правильный выбор задач, которые могут отрабатываться на данном средстве. Поэтому обоснование задач внекорабельной деятельности (ВНЕКД), которые могут быть смоделированы с помощью средств виртуальной реальности, имеет практическое значение.

На основе анализа задач профессиональной подготовки космонавтов к ВнеКД и деятельности космонавтов в процессе ВНЕКД определены следующие классы задач, которые могут быть решены с помощью виртуальной реальности: аварийные ситуации, управление перспективными техническими средствами, информационное обеспечение процесса подготовки космонавтов. В числе типовых, отрабатываемых в составе экипажа, задач необходимо перечислить следующие варианты, вытекающие из сценариев визуализации динамично развивающейся обстановки [8]:

1) Демонстрация ошибки фиксации или обрыва страховочного фала скафандра.

При нарушении связи страховочного фала с поручнями возможен отлет космонавта от ОС на недопустимо большое расстояние, в том числе, с потерей видимости ОС через остекление гермошлема скафандра, что чревато катастрофическими последствиями.

Для демонстрации негативных последствий данного инцидента необходимо осуществить моделирование вида через остекление гермошлема скафандра части поверхности модуля станции, имитацию перемещения космонавта относительно ОС, изменение положения космонавта относительно осей ОС из-за движения его рук и ног, что меняет ориентацию в пространстве.

Возможный сценарий этого сюжета:

– космонавт, одетый в скафандр, находится на внешней поверхности ОС, он передвигается по поверхности станции с небольшой скоростью, последовательно выполняет фиксацию карабинов страховочного фала за поручни, но в одной из фаз этого процесса не закрепляет фал за поручень, при этом начатое движение космонавта продолжается, космонавт предпринимает попытки справиться с этой нештатной ситуацией (НшС), а именно, космонавт пытается руками достать до поручней, движением частей тела изменить свое пространственное положение, но в итоге космонавт отдаляется от ОС, что демонстрирует тяжесть такого рода ошибки по причине неучета человеческого фактора.

2) Демонстрация последствий ошибок при выполнении операций «отброса оборудования» и «запуска малых ИС».

Для демонстрации последствий ошибок при выполнении операций «отброса оборудования» и «запуска малых ИС» необходимо осуществлять моделирование вида через остекление скафандра части поверхности ОС, имитацию перемещения космонавта относительно ОС, движение (полёт) оборудования, малых ИС, а также разлет обломков поврежденного оборудования.

Возможный сценарий данного сюжета:

– космонавт, одетый в скафандр, находится на внешней поверхности ОС, закрепляется в определенном месте, выполняет отброс оборудования или запуск малых ИС.

Космонавту отображается визуальная картина возможных негативных последствий неправильно выполненной операции, например, когда оборудование или спутник попадает в солнечные батареи, антенны или другие элементы, расположенных на внешней поверхности станции, разлёт обломков оборудования в реальном масштабе времени после физического соударения.

3) Демонстрация ограничений на работу в опасных зонах.

Для демонстрации космонавтам существующих опасностей, возникающих при нарушении требований по безопасности, целесообразно моделировать возможные воздействия опасных факторов в этих зонах на космонавта, одетого в скафандр.

Предлагаемый сценарий сюжета:

– космонавт, одетый в скафандр, находится на внешней поверхности станции, выполняет монтаж оборудования, срабатывает двигатель ориентации, струя газов воздействует на скафандр, моделируются результаты воздействия, развитие во времени результатов воздействия. При развороте антенны или солнечной батареи происходит механическое воздействие на скафандр, моделирование изменения параметров движения и внешнего вида в поле зрения космонавта через остекление гермошлема.

4) Демонстрация проблем, связанных с остеклением гермошлема скафандра.

В процессе ВнеКД обзор внешней обстановки космонавт осуществляет через остекление гермошлема скафандра.

Гермошлем скафандра оборудован наружным светофильтром для защиты от солнечного излучения.

Для демонстрации космонавтам различных ситуаций, связанные с остеклением гермошлема скафандра, целесообразно показать космонавту влияние освещенности в гермошлеме на «видимость» внешних объектов и ориентиров.

5) Демонстрация проблем, связанных с попаданием воды в гермошлем.

Необходимо продемонстрировать появление и перемещение мелких капель воды, образование крупного водяного пузыря на поверхности остекления гермошлема скафандра.

6) Демонстрация ситуаций при пропуске аварийного сигнала на пульте скафандра.

Для демонстрации таких ситуаций необходимо создание виртуальной модели с многопортовым выводом визуальной информации: вида из гермошлема скафандра, вида на пульт для второго космонавта, вида «со стороны внешнего наблюдателя» на космонавта в скафандре, изменение изображения в зависимости от влияния опасного фактора на организм человека и нарушений восприятия внешней обстановки.

7) Демонстрация ситуаций при моделировании движения на поверхности ОК в различных режимах управления.

Сценарий сюжета: космонавт находится на внешней поверхности станции, происходит аварийная ситуация отделения космонавта от станции, космонавт используя ИТУ управляет своим положением и ориентацией и движется относительно ОС к месту возможной фиксации на внешней поверхности, изображение соответствует направлению взгляда космонавта, после подлета к станции космонавт выполняет операции ориентации для фиксации, при этом изображение в поле зрения космонавта изменяется в соответствие с параметрами его ориентации и движения.

При моделировании аварийных ситуаций необходимо также моделировать движение ИТУ при различных отказах его двигателей, условия столкновения космонавта со станцией (коллизии при потере управления ИТУ), движение после столкновения с различными деталями поверхности ОС.

Один из принципиально важных вопросов визуализации трехмерных виртуальных сцен в реальном режиме времени при ознакомительных тренировках космонавтов на видеотренажерах к НшС состоит в создании реалистичных изображений, наблюдаемых космонавтами в процессе ВнеКД. При этом важно иметь возможность «синхронизации» наблюдаемых картин внешней визуальной обстановки разными членами экипажа, которые находятся в разных рабочих средах и разном окружении – внутри модулей орбитальной станции, снаружи на ее поверхности и на удалении от поверхности станции в ОК.

Значимая роль в построении ознакомительных сценариев отводится визуализация вида Земли из космоса в реальном режиме времени, включая облачный покров, ночную и дневную стороны, линию терминатора, освещение Солнцем и Луной и др., а также визуализация искусственных объектов в ОК. На рис. 1-3 приведен дизайн объектов, наблюдаемых космонавтом при выходе в открытый космос, для которых разработаны 3D-модели для наблюдения извне станции при использовании ИТУ.

Рисунок 1 – Пример (A) визуализации вида ОС со стороны внешнего наблюдателя при выходе космонавта в открытый космос и ведения им наблюдения через остекление шлема скафандра

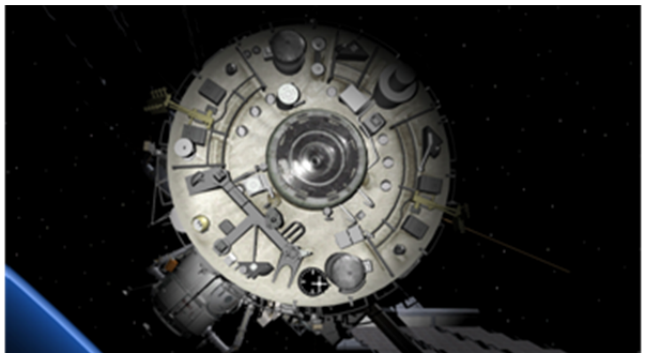


Рисунок 2 – Пример (B) визуализации вида ОС со стороны со стороны внешнего наблюдателя при выходе космонавта в открытый космос и ведения им наблюдения через остекление шлема скафандра

В процессе имитации выхода в ОК на тренировках контролирующих ВнеКД космонавт с рабочего места в орбитальной станции может наблюдать в многопортовом режиме эти объекты в тех же ракурсах, что и космонавт «на выходе» в ОК через остекление скафандра.

Существенно, что эти режимы могут использовать специалисты, ответственные за подготовку космонавтов к выходу в ОК и выполнению операции ВнеКД для контроля отрабатываемых сценариев с рабочих мест инструкторского состава.

Современные системы виртуального окружения (СВО) могут быть использованы при разработке космических имитационно-моделирующих комплексов для проектируемых новых видов деятельности экипажа с поддержкой ВнеКД со стороны роботов, в том числе, в случае применения новых ИТУ для повышения мобильности одетого в скафандр космонавта в ОК. В статье рассматриваются основные возможности разработанной в ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН СВО VirSim для этих целей и направления ее использования в имитационных стендах на этапах виртуального прототипирования и проведения эргономических экспериментов и испытаний с участием человека-оператора.

В свете перспективных проектов полетов к астероидам и все более сложных задач ОТО в орбитальных полетах создание СВО с расширенными возможностями моделирования выполняемых в миссии операций является актуальным, и, более того, отработанность основных модулей и зрелость методологии позволяют в дальнейшем перейти в практическом плане к созданию технических средств подготовки космонавтов не только в интересах моделирования новых видов опера-

торской деятельности и специфических условий, влияющих на взаимодействие в системе «человек – техника», но и для формирования компетенций у космонавтов в области мониторинга таких сложных видов деятельности как ВнеКД. Расширение профессиональных компетенций космонавтов необходимо, чтобы они могли своевременно реагировать и предотвращать негативные исходы при отказах техники и непреднамеренных ошибочных действиях операторов при выходах в ОК.

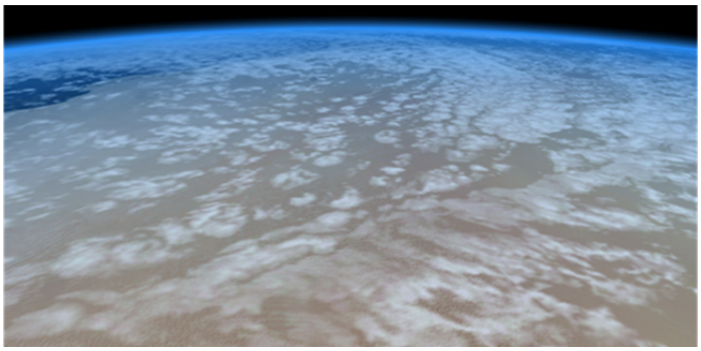


Рисунок 3 – Пример (С) визуализации вида орбитальной станции и подстилающей поверхности Земли при выходе космонавта в открытый космос и ведения им наблюдения через остекление шлема скафандра

В работе описан инновационный, расширенный по сравнению с предшествующие разработками ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, комплекс программ в составе СВО, показано назначение отдельных подсистем и модулей и схема их взаимодействия при разработке интерактивного приложения по технологии ВР.

При разработке виртуального прототипа ИТУ анализировались отечественные и зарубежные разработки-аналоги РРК. На этой основе выполнен дизайн и проектирование 3D моделей МКС, скафандра и ИТУ, модель тела человека в скафандре, системы управления реактивными двигателями от задающих реальных и виртуальных оконечных устройств управления, расчётные алгоритмы и программы реализации динамики полета ИТУ и др. Для применения при управлении ИТУ отработаны модели построения многомодальных интерфейсов «космонавт-робот». При использовании носимых устройств ВР оператор может задавать управление движением ИТУ с помощью джойстика или дистанционным способом (на основе речевых команд).

Литература

1. Malik Sadath, Lin Jun, Goldenberg A. A.Virtual Prototyping for Conceptual Design of a Tracked Mobile Robot. // Conference: Electrical and Computer Engineering, 2006. CCECE '06. Canadian Conference. DOI: 10.1109/CCECE.2006.277740.

2. Kim BaekGyu, Kashiba Yusuke, Dai Siyuan, Shiraishi Shinichi. Testing Autonomous Vehicle Software in the Virtual Prototyping Environment. // IEEE Embedded Systems Letters. 2016. PP.1-1. Doi:10.1109/LES.2016.2644619.

3. Zumbado, J.R., Curiel, P.H., Schreiner, Samuel. Hands-Free Control Interfaces for an Extra Vehicular Jetpack. // IEEE Aerospace Conference Proceedings. 2013. pp.1-11. Doi:10.1109/AERO.2013.6497138.

4. Kryuchkov B.I., Karpov A.A., Usov V.M. (2014). Promising Approaches for the Use of Service Robots in the Domain of Manned Space Exploration. // SPIIRAS Proceedings. No 1(32). pp.125–151. Doi:10.15622/sp.32.9.

5. Sheerin, Todd & Carpenter, Michele & Hoffman, Jeffrey. (2015). Actuator Sizing and Utility Assessment of Control Moment Gyroscopes for an Astronaut EVA Jetpack. // 45th International Conference on Environmental Systems ICES-2015-285 12-16 July 2015, Bellevue, Washington.

6. Wen, Jian, Zhang Junguo, Gao Lin, Li,Xinlei. (2014). Modeling and Simulation of Simplified Aid for EVA Rescue Using Virtual Prototype Technology. // The Open Automation and Control Systems Journal. 6. 1532-1540. 10.2174/1874444301406011532.

7. MEET DOUG, THE NASA VIRTUAL REALITY TECH PREPPING ASTRONAUTS FOR SPACEWALKS. URL: https://www.inverse.com/article/13911-meet-doug-the-nasa-virtual-reality-tech-prepping-astronauts-for-spacewalks (exceeded 2020.02.24)

8. Направления применения компьютерного моделирования при подготовке космонавтов к ВКД. Онуфриенко Ю.И., Алтунин А.А., Долгов П.П., Иродов Е.Ю., Жамалетдинов Н.Р., Коренной В.С. // В кн.: Пилотируемые полеты в космос. Материалы XII Международной научно-практической конференции. Научно-исследовательский испытательный центр подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина. Звездный городок, 2017. С.219–221.

С.А. Матвеев, Е.Б. Коротков, Ю.А. Жуков, М.И. Надежин

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ЗАДАЧАХ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, mikhailn131@gmail.com

Аннотация

Рассмотрен подход к диагностике электрической части синхронного двигателя с постоянными магнитами на основе методов искусственного интеллекта. Был применен один классический метод машинного обучения, один нейросетевой и один метод глубокого обучения. Статистические данные, необходимые для обучения были получены со стендовых испытаний реального образца электродвигателя. Проведена оптимизация обучающей выборки с целью улучшить качество работы модели классификации. По результатам исследования наилучшей эффективностью обладает трехслойная нейронная сеть прямого распространения.

Ключевые слова: Искусственный интеллект, электродвигатель, диагностика, нейронная сеть, оптимизация.

S.A. Matveev, E.B. Korotkov, Yu.A. Zhukov, M.I. Nadezhin

COMPARISON OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS IN TASKS OF ELECTRIC DRIVE DIAGNOSTICS

Baltic State Technical University «VOENMEH», Saint-Petersburg, mikhailn131@gmail.com

Abstract

An approach to diagnostics of the electrical part of a permanent magnet synchronous motor based on artificial intelligence methods is considered. One classical machine learning method, one neural network and one deep learning method was applied. The statistics required for training were obtained from bench tests of a real electric motor. The optimization of the training sample is carried out in order to improve the quality of the classification model. According to the research results, the best efficiency has a three-layer feedforward neural network.

Key words: Artificial intelligence, electric motor, diagnostics, neural network, optimization.

Робототехнические и мехатронные комплексы, приводы наземных, подводных и космических аппаратов представляют собой сложные технические изделия, содержат исполнительные и измерительные электромеханические подсистемы. В связи с возрастающими требованиями к энергоэффективности, производительности, надежности исполнительных устройств, наряду с их возросшей технической и технологической сложностью, остро встают задачи оперативного и достоверного определения технического состояния исполнительных элементов мехатронных и робототехнических систем.

В данной работе рассматриваются методы диагностики технического состояния маломощного синхронного двигателя с постоянными магнитами, который рассчитан на длительную непрерывную работу при высокой скорости вращения. Такой тип двигателя имеет широкое применение в качестве исполнительного элемента во многих мехатронных системах, например, в качестве привода насосного оборудования.

Диагностика двигателя заключается в постоянной оценке технического состояния его узлов и элементов либо непосредственно во время его работы путем оперативной обработки поступающей с телеметрии информации, либо путем постобработки после специальных испытаний.

Среди существующих методов диагностики электрических двигателей есть сравнительно простые, такие как мониторинг среднеквадратичного значения (СКЗ) виброскорости или соотношения пик/фон вибросигнала, однако они позволяют идентифицировать неисправность только на поздней стадии ее развития и способствуют достоверному определению только механических дефектов.

Для диагностики электрической части машин переменного тока хорошо подходят токовые методы диагностики:

- метод спектрального анализа потребляемого тока;

- метод спектрального анализа токов в фазах;
- метод вихретокового контроля;
- метод интегрирования потребляемого тока;
- метод анализа вектора Парка тока [1];
- метод анализа эквивалентного тока [2];
- метод построения годографа токов [3].

Анализ эквивалентного тока (далее - I_q) является наиболее предпочтительным для диагностики неисправностей электромагнитного характера, т.к. один этот параметр содержит в себе информацию, отражающую поведение всей электромагнитной части рассматриваемой системы и является наиболее информативным показателем. Спектральная характеристика I_q несет большое количество информации, которое отражается в пиках на характерных частотах рассматриваемой системы.

В настоящее время в задачах кластеризации, классификации и регрессии широко применяются методы искусственного интеллекта (ИИ), включающие в себя классические методы машинного обучения (МО), искусственные нейронные сети (ИНС), а также методы глубокого обучения (ГО) и др.

Диагностирование технического состояния электрической машины представляет собой решение задачи классификации. При этом по набору параметров определяется, к какому классу принадлежит объект, где каждый класс соответствует конкретной неисправности.

Процесс применения методов ИИ для классификации происходит в соответствии со следующими шагами:

- получение и обработка статистических данных;
- подготовка обучающей выборки;
- выбор эффективного алгоритма обучения, схемы валидации, гиперпараметров;
- обучение модели;
- проверка точности и скорости обученной модели новыми (тестовыми) данными.

Так как в настоящий момент разнообразие методов довольно широко, выбор был остановлен на методах:

- классический метод машинного обучения – метод ансамбля ближайших соседей (KNN Ensemble) [4] с гиперпараметрами: количество соседей – 1, количество циклов обучения – 15; оптимальная схема валидации – отложенная валидация с разбиением: 85% – тренировочная выборка, 15% – тестовая выборка;
- нейросетевой метод – трехслойная (входной, выходной и скрытый слои) сеть прямого распространения (Feedforward Neural Net – FNN). Количество входов – 15, количество нейронов в скрытом слое – 13, количество выходов – 7;
- метод глубокого обучения – рекуррентная сеть Long Short-Term Memory (LSTM) [5] с 5-ю слоями:

1. Input layer. Входной слой. Размерность входа равна количеству параметров: 15.
2. LSTM layer.
3. Fully connected layer.
4. Softmax layer.
5. Classification layer.

С целью получения статистических данных для обучения моделей были проведены стендовые испытания лабораторного образца электродвигателя с имитацией типовых неисправностей электрической части.

Проведенные опыты:

- исправный двигатель;
- межвитковые замыкания в одной фазе;
- межвитковые замыкания в двух фазах;
- обрыв фазы;
- увеличение сопротивления двух фаз и межвитковые замыкания;
- увеличение сопротивления одной фазы;
- увеличение сопротивления двух фаз.

Полученные данные разбивались на обучающую и тестовую выборки в соотношении 2:1 соответственно. Выборки дробились на 150 частей.

Выборки были составлены, опираясь на результаты зарубежных исследований [6]:

Временная область:

1. Среднеквадратичное значение (СКЗ) – skz.
2. Куртозис – kurtosis.
3. Клиренс фактор – clearance factor.

4. Пик-фактор – peak factor.
5. Форм фактор – shape factor.
6. Энтропия Шэннона – Shannon entropy.
7. Смещение – skewness.

Частотная область:

8. Максимальное значение спектра – peak spectre.
9. Энергия спектра – energy spectre.
10. Спектральная плотность – PSD.

Частотно-временная область [7]:

11. D1 – первый коэффициент вейвлет декомпозиции.
12. D2 – второй коэффициент вейвлет декомпозиции.
13. D3 – третий коэффициент вейвлет декомпозиции.
14. D approx – коэффициент аппроксимации.

Точность работы моделей классификации наглядно отображается в матрицах несоответствия (Confusion matrix). На рис. 1 для примера представлена матрица несоответствия для метода FNN.

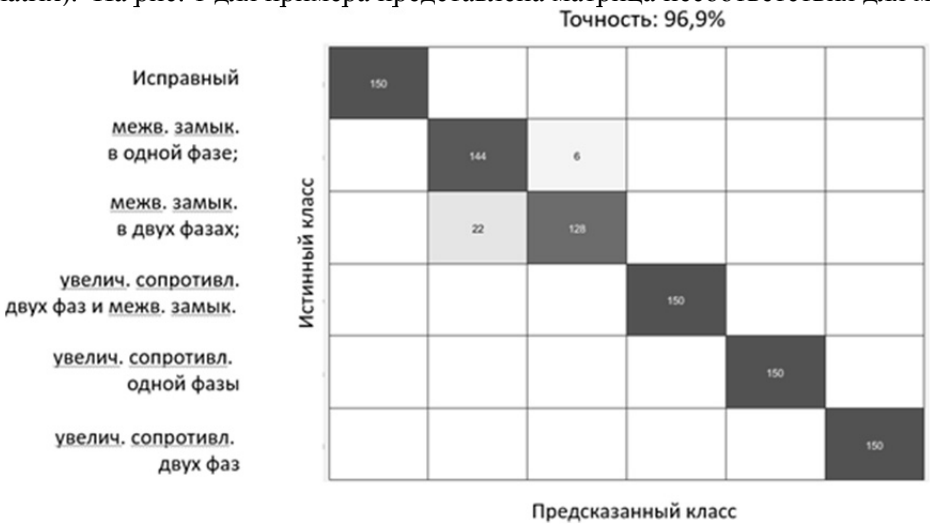


Рисунок 1 – Матрица несоответствия для метода FNN

Матрица показывает количество верно/неверно классифицированных признаков и позволяет в наглядном виде понять, как работает обученная модель.

В табл. 1 представлены результаты работы трёх рассмотренных методов на тестовых данных. В качестве параметров, раскрывающих эффективность, были выбраны длительность обучения, длительность классификации и точность работы.

По соотношению быстродействие\точность работы наилучший результат показала ИНС прямого распространения.

Таблица 1 – Результаты работы обученных моделей классификации

	МО (KNN)	**ИНС (FNN)**	**ГО (LSTM)**
Длительность обучения, сек	2.8262	0.2613	181
Длительность классификации, сек	0.0785	0.0557	0.3419
Точность, %	95,1	96,9	97,2

Представленные выше результаты были получены при полном наборе параметров в обучающей выборке. С целью улучшить эффективность работы моделей классификации были проведены работы по оптимизации состава обучающей выборки.

В данном случае оптимизация заключается в максимальном уменьшении количества параметров, входящих в состав обучающей выборки при улучшении как минимум одного из показателей эффективности обученной модели. Критерий оптимизации – максимальное быстродействие и точность при минимальном размере выборки.

В настоящее время существует множество методов для определения информативности отдельных параметров выборки, однако выбор был остановлен лишь на нескольких из них. Для корректного и адекватного решения данной задачи одного или двух методов недостаточно ввиду сильной разобщенности результатов каждого отдельно взятого метода.

Рассматриваемые методы определения информативных параметров:

- One way ANOVA (Однофакторный дисперсионный анализ);
- Метод Kruskal-Wallis;
- Метод ChiSquare;
- Метод Minimum Redundancy Maximum Relevance (MRMR) [8];
- Метод Neighborhood Component Analysis (NCA);
- Laplacian scores [9];
- Метод ReliefF [10].

На рис. 2 показаны результаты определения информативности первых трех параметров выборки. Так как каждый метод выдает результат в своих единицах, значения, полученные каждым методом, были нормированы.

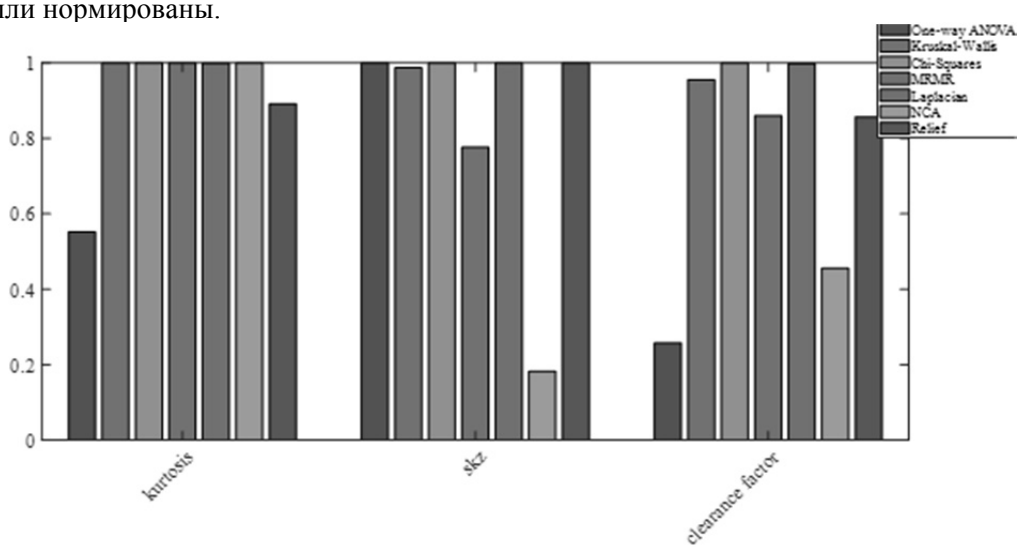


Рисунок 2 – Определение информативности параметров выборки

Конечная общая оценка для каждого параметра была получена путем суммирования результатов всех методов. Таким образом была получена возможность ранжировать параметры выборки по их значимости и информативности для решения задачи классификации (рис. 3).

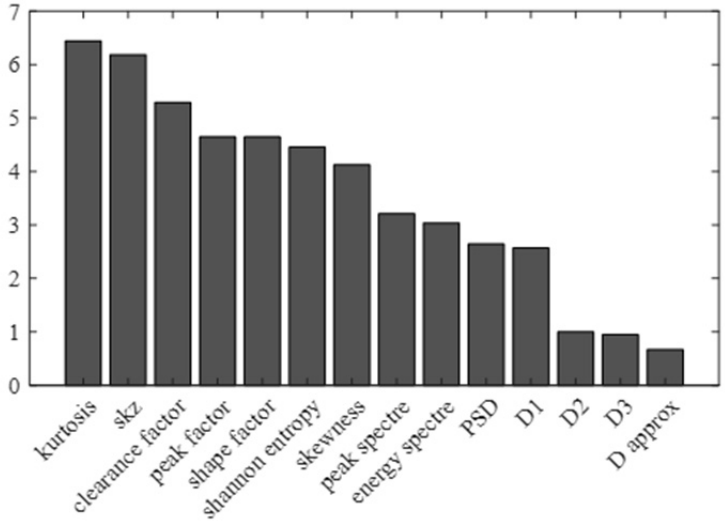


Рисунок 3 – Ранжирование параметров выборки по значимости

Самыми информативными и значимыми параметрами, влияющими на точность работы модели классификации, оказались параметры временной области, наименее информативными – параметры из частотно-временной области (коэффициенты вейвлет декомпозиции). Параметры частотной области средние по значимости.

Вследствие слабой значимости параметры частотно-временной области были изъяты из обучающей выборки, после чего заново была проведена проверка эффективности работы всех трех методов. В табл. 2 представлены результаты работы моделей классификации с оптимизированной обучающей выборкой.

Таблица 2 – Результаты работы моделей классификации до оптимизации (слева) и после оптимизации (справа)

	МО (KNN)		**ИНС (FNN)**		**ГО (LSTM)**	
Длительность обучения, сек	2.8262	1.964	0.2613	0.1553	181	143
Длительность классификации, сек	0.0785	0.0533	0.0557	0.01	0.3419	0.312
Точность, %	95.1	97.2	96.9	100	97.2	95.3

Оптимизация положительно повлияла на быстродействие всех методов, однако глубокая сеть LSTM единственная, на чью точность негативно повлияло сокращение размера обучающей выборки.

Метод с применением ИНС прямого распространения в обоих случаях справляется лучше по соотношению точность/быстродействие.

Рассмотрен подход к диагностике технического состояния синхронного электродвигателя с применением методов искусственного интеллекта.

Получены модели классификации, обученные разными методами на обработанных сигналах фазных токов, полученных с испытаний реального образца электродвигателя, решающие задачу диагностики электрической части двигателя.

Проведена оптимизация обучающей выборки путем отсечения неинформативных признаков, что привело к улучшению эффективности работы моделей классификации.

Для наибольшего быстродействия хорошо подходят классические и нейросетевые методы машинного обучения.

Методы глубокого обучения эффективны в сложных и неопределенных задачах, когда нет достаточной информации о рассматриваемом объекте и требуется определить сложные зависимости между параметрами и эффектами, однако в решении рассматриваемой задачи диагностики их применение не является рациональным, т.к. другие методы решают эту задачу не менее эффективно за гораздо меньшее время.

С точки зрения точности работы и быстродействия наилучшим методом является трехслойная нейронная сеть прямого распространения.

Работа выполнена в организации ФГБОУ ВО БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (доп. соглашение от 09.06.2020 № 075-03-2020-045/2 на выполнение государственного задания).

Литература

1. Harlişca C., Szabó L. Wavelet analysis and Park's Vector based condition monitoring of induction machines // Journal of Computer Science and Control Systems. – 2011. – Т. 4. – №. 2. – С. 35-38.

2. Коротков Е. Б., Слободзян, Н. С., Широбоков, О. В., Киселев, А. А., Надежин, М. И. Наземная система комплексной диагностики электромеханических устройств космических аппаратов // Радиопромышленность. – 2019. – Т. 29. – №. 4. – С. 54-62.

3. Надежин М. И., Киселев, А. А., Целищев, И. А., Широбоков, О. В. и др. ТОКОВАЯ ДИАГНОСТИКА ВЕНТИЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА // МОЛОДЕЖЬ. ТЕХНИКА. КОСМОС. – 2019. – С. 342-347.

4. Gul, A., Perperoglou, A., Khan, Z., Mahmoud, O., Miftahuddin, M., Adler, W., & Lausen, B. Ensemble of a subset of kNN classifiers // Advances in data analysis and classification. – 2018. – Т. 12. – №. 4. – С. 827-840.

5. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long short-term memory // Neural computation. – 1997. – Т. 9. – №. 8. – С. 1735-1780.

6. Barbieri, F., Hines, J. W., Sharp, M., Venturini, M. Sensor-based degradation prediction and prognostics for remaining useful life estimation: Validation on experimental data of electric motors // International Journal of Prognostics and Health Management. – 2015. – Т. 6. – №. 19. – С. 1-20.

7. Mallat, S. G. “A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1989. – Т. 11. – № 7. – С. 674–693.

8. Ding, C., and H. Peng Minimum redundancy feature selection from microarray gene expression data // Journal of Bioinformatics and Computational Biology. – 2005. – Т. 3. – №. 2. – С. 185–205.

9. He, X., D. Cai, and P. Niyogi Laplacian Score for Feature Selection // NIPS Proceedings. 2005.

10. Robnik-Sikonja, M., and I. Kononenko. Theoretical and empirical analysis of ReliefF and RReliefF // Machine Learning. – 2003. – Т. 53. – С. 23–69.

Д.В. Васильков, Е.Б. Коротков, Н.С. Слободзян, О.В. Широбоков

ДИАГНОСТИКА МЕХАНИЧЕСКИХ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, vasilkovdv@yandex.ru, ebkorotkov@yandex.ru, ja-nikita@mail.ru, shirok.93@mail.ru

Аннотация

Рассматривается электродвигатель как исполнительный элемент в составе космических систем. Обладая для различных подсистем космического аппарата (КА) важностью устойчивого функционирования, ставится вопрос о диагностике технического состояния электродвигателей. В данной статье рассматривается статистика отказов, которая указывает на механические неисправности как на основные для электромеханических агрегатов, приводится краткий обзор существующих методов и их эффективность. Демонстрируется метод построения диагностических карт (ДК) для выполнения диагностики, основные подходы и условия построения, обеспечивающие получение достаточной информации. Приводится также практический опыт применения ДК на лабораторном образце электродвигателя, имеющем наработку ресурса. Применение ДК показывает эффективность быстрой локализации механической неисправности электромеханических устройств и имеет практические перспективы на применение в дальнейшем.

Ключевые слова: Электродвигатель, космический аппарат, диагностика, мониторинг, диагностическая карта.

D.V. Vasilkov, E.B. Korotkov, N.S. Slobodzyan, O.V. Shirobokov

MECHANICAL FAULT DIAGNOSTICS SPACE APPLICATIONS MOTORS

BSTU VOENMEH, Saint-Petersburg, vasilkovdv@yandex.ru, ebkorotkov@yandex.ru, ja-nikita@mail.ru, shirok.93@mail.ru

Abstract

An electric motor is considered as an executive element in space systems. Having the importance of stable functioning for various subsystems of the spacecraft, the question of diagnosing the technical condition of electric motors is raised. This article discusses the failure statistics, which indicate mechanical failures as the main ones for electromechanical units, provides a brief overview of existing methods and their effectiveness. The method of constructing diagnostic maps (DC) for performing diagnostics, the main approaches and conditions for constructing, providing sufficient information is demonstrated. Practical experience of using DC on a breadboard model of electric motor with known operating time is presented. The use of DC shows the efficiency of rapid localization of electromechanical devices failure and has practical prospects for further use.

Key words: Electric motor, spacecraft, diagnostics, monitoring, diagnostic charts.

Электродвигатели (ЭД) имеют широкое распространение в качестве исполнительного элемента в составе спутниковых систем. Они применяются в составе систем наведения, стабилизации, в системах непрерывного жизнеобеспечения. К ЭД предъявляется перечень жестких требований ресурса, стойкости к воздействию радиации, вакуума и широкого диапазона температур. Именно высокие показатели ресурса являются наиболее важными для устойчивого функционирования космических бортовых систем. Их отказ приводит к полному или параметрическому отказу подсистем КА или КА в целом. Так, в 2010 г. на Международной космической станции (МКС) электронасос системы терморегулирования, имеющий в составе электродвигатель, вышел из строя [1], в результате пришлось переключиться на резервный контур охлаждения, а множество научно-исследовательских работ пришлось вернуть до замены отказавшего устройства. В случае искусственных спутников Земли отказы подобного рода ставят под вопрос целесообразность функционирования на целевой орбите.

Основными распространенными дефектами электрической и механической части синхронных двигателей являются: повреждения подшипников; повреждение, перегрев, обрыв, межвитковые замыкания фазных обмоток статора; межфазные замыкания; изменение зазора между статором и

ротором; дисбаланс (биение) ротора; перегрузки по моменту; перегрев постоянных магнитов ротора; неисправности силовой электроники. При этом согласно приведенной ниже статистике повреждения, наибольшее распространение имеют отказы подшипников, при этом от них зависит устойчивое функционирование ЭД.

В виду вышесказанного, для повышения надежности КА необходимо решить актуальную проблему диагностики электромеханических элементов. Диагностика обеспечивает своевременное обнаружение функционального и параметрического отказов ЭД в целом и его основных элементов.

Электродвигатель представляет собой электромеханическую систему (ЭМС), состоящую из вращающейся части, включающей в себя ротор, вал и подшипники, а также неподвижной из статора и корпусных элементов.

Диагностика вращающихся машин, к которым относятся ЭД, заключается в постоянной оценке технического состояния его элементов. Наибольшее распространение среди ЭД для КА имеет трехфазный вентильный двигатель. Статистика повреждений электрических машин переменного тока представляет такие числа [2]:

- неисправности обмоток статора – 26%;
- неисправности ротора – 3%;
- неисправности подшипников – 44%;
- неисправности вала – 5%;
- остальные неисправности – 22%.

Наиболее распространенным и, в то же время, наиболее уязвимым элементом роторных механизмов является подшипник качения. Подшипники осуществляют пространственную фиксацию вращающихся роторов и, следовательно, именно подшипники воспринимают большую часть статических и динамических усилий, возникающих в работающем механизме. Состояние подшипников является важнейшей составляющей технического состояния механизма, его исправности и работоспособности.

В конструкциях электродвигателей как правило используются однорядные шариковые радиальные и радиально-упорные подшипники качения.

Отказ подшипников электродвигателя может характеризоваться как постепенный отказ, при котором происходит нарастание воздействия негативных факторов. Вследствие этого изменяется техническое состояние подшипников и, контролируя его, мы обеспечиваем контроль технического состояния ЭД.

Современный подход к диагностике электромеханических систем основан на комплексном анализе физического состояния машины, к которому относятся уровни виброускорений, виброскоростей и виброперемещений, температура корпуса и обмоток, фазные токи [3] и напряжения, и ряд других параметров [4]. При этом вибродиагностика является наиболее информативным методом диагностики для контроля состояния подшипников ЭД [5].

Среди существующих методов диагностики электромеханических систем (ЭМС), в частности, подшипников, есть сравнительно простые, такие как мониторинг среднеквадратичного значения (СКЗ) виброскорости или соотношения пик/фон вибросигнала, однако они позволяют идентифицировать неисправность только на поздней стадии ее развития.

Наиболее сложные, такие как Вейвлет-анализ [6] и кепстральный анализ [7] позволяют получить гораздо больше информации о текущем состоянии объекта. Также известны алгоритмы диагностики и обнаружения дефектов на основе методов нелинейного фильтра Калмана [8] и улучшенный Гауссовский регрессионный процесс [9].

Диагностическая карта — это наглядное визуальное представление спектральной характеристики сигнала с нанесением всех характерных частот исследуемой ЭМС.

При использовании ДК анализ и определение неисправностей выполняется экспертом или группой специалистов, имеющих необходимую квалификацию, опыт работы с оборудованием и базу знаний, позволяющую сопоставить спектральную картину с возможными неисправностями.

Данные ДК визуализируются на спектрограммах в виде вертикальных линий (обычно разного цвета), отражающих предварительно сформированный частотный состав, присутствующий в рассматриваемой ЭМС. Эксперты сравнивают полученную карту с диагностической картой ЭМС без дефектов и судят по величине сигналов на характерных частотах о развивающихся в системе дефектах.

Возможно построение ДК для различных электрических и механических параметров. Набор карт обычно определяется экспертом, выполняющим анализ.

Один из способов диагностики — анализировать техническое состояние двигателя путем сравнения амплитуд на характерных частотах спектра с амплитудой на нулевой частоте, однако опыт показал, что следует сравнивать абсолютные значения амплитуд всплесков на характерных частотах исследуемой ЭМС в ее текущем состоянии с амплитудой всплесков на тех же частотах исправной (эталонной) системы и наблюдать их изменение с течением времени.

Характерные частоты необходимо рассчитывать для каждой рассматриваемой ЭМС, т.к. они зависят от конструктивных особенностей и режимов работы каждой конкретной системы. Основным параметром, от которого зависит большинство характерных частот, является частота вращения вала двигателя. Только собственные и резонансные частоты в такой системе не зависят от частоты вращения вала.

Вместе с этим, эффективная рассматриваемая полоса частот также определяется для каждой ЭМС и для каждого отдельного параметра этой системы (например, для виброскоростей и виброускорений эффективный диапазон частот будет различаться).

Т.к. определяющими являются не только характерные частоты, но и их гармоники, требуется определить оптимальное количество гармоник, которое следует рассматривать для эффективного анализа.

В некоторых случаях частоты отдельных диагностических признаков в процесс эксплуатации смещаются по отношению к приведенным в ДК. Это, в основном, относится к подшипниковым частотам. Отклонения возникают, как правило, из-за наличия осевых усилий на подвижные части подшипников. При этом изменяется угол контакта между телами качения и наружной (внутренней) обоймой подшипника. Нарабатываются смещенные дорожки качения, которые являются дополнительным диагностическим признаком и фактором износа элементов подшипника.

При построении ДК могут встречаться ситуации, когда на карте имеются всплески, не попадающие ни под один из обозначенных признаков. Это могут быть гармоники уже известных признаков либо новые признаки, которые присутствуют в ЭМС, но не идентифицированы, что указывает на присутствие дополнительных источников колебаний.

В этом случае проводится исследование по определению их природы, после чего соответствующий признак вместе со своей частотой наносится на ДК. Таким образом происходит дополнение карты новыми данными, что позволит выявлять все возможные дефекты рассматриваемой системы.

Для анализа механической части ЭМС используются спектры параметров вибрации: виброускорения, виброскорости, виброперемещения, огибающие виброускорений, огибающие виброскоростей и др. параметры.

Рассмотрим практическое применение метода экспертного анализа диагностических, практически реализованных в лабораторных условиях для электродвигателя мощностью 50 Вт.

Для метода экспертного анализа ДК лабораторный электродвигатель имитировал условия работы, приближенные к номинальным.

Рассмотрим диагностические карты, полученные в ходе измерений и обработки сигналов вибрационных параметров электродвигателя.

При анализе результатов испытаний ЭМС для начала следует определить СКЗ и пик-фактор параметров. Пик-фактор – это отношение максимального значения сигнала к его СКЗ.

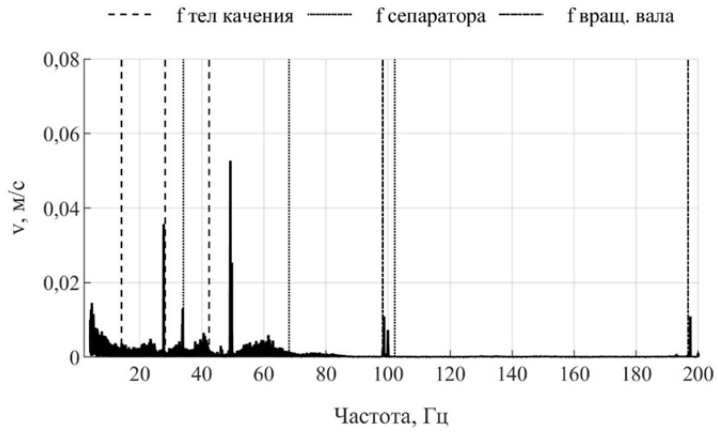
Сопоставление пик-фактора и СКЗ измерительных сигналов при различных испытаниях позволяет сопоставить общий уровень вибрации. Это важно для качественной оценки изменения состояния диагностируемого объекта. Виброускорения лучше проявляются в высокочастотном диапазоне, а виброперемещения – в низкочастотном диапазоне. Виброскорость является ровной характеристикой во всем частотном диапазоне, что дает основание рассматривать ее в качестве основной при сопоставлении пик-фактора и СКЗ измерительных сигналов.

При малых изменениях СКЗ и пик-фактора анализ целесообразно проводить по спектрам скорости и огибающей скорости; при резких изменениях СКЗ или пик-фактора анализ целесообразно проводить по спектрам ускорения и огибающей ускорения.

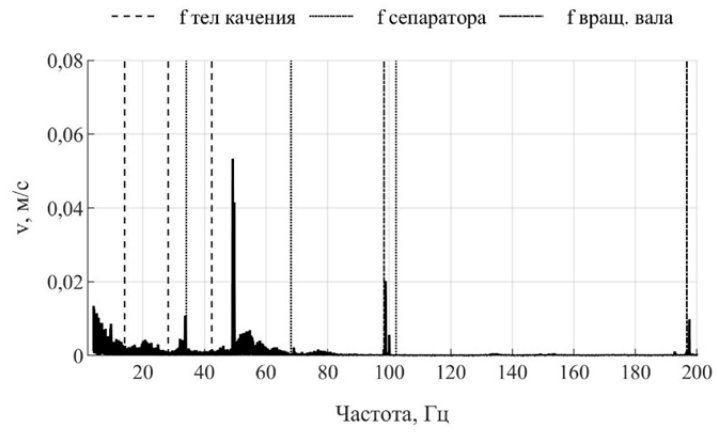
Опыт анализа СКЗ и пик-фактора параметров вибрации лабораторного образца электродвигателя показал, что любые изменения в процессе эксплуатации в первую очередь отражаются в виброускорениях, далее в виброскоростях и, в последнюю очередь, в виброперемещениях. Из перечисленного следует, что СКЗ виброускорения оказалось наиболее чувствительным и определяющим общим диагностическим признаком, зафиксировавшим изменения в диагностируемой системе. При резких изменениях СКЗ виброускорения следует детально рассмотреть спектральные характеристики виброускорений и огибающих виброускорений. Если в ЭМС присутствует механическая неисправность, то в первую очередь она проявит себя в показаниях виброускорений.

Из перечисленного следует, что СКЗ виброускорения оказалось наиболее чувствительным и определяющим общим диагностическим признаком, зафиксировавшим изменения в диагностируемой системе и указавшим на наличие развития дефекта. Для определения конкретного источника возмущения следует подробнее изучить ДК.

Изучение ДК по результатам измерений на начальный период работы ЭД позволяет отследить приработку механической части. На момент запуска (рис. 1а) наблюдаются гармоники на частотах тел качения, уровень которых после наработки (рис. 1б) снижается до уровня шумов.



а)



б)

Рисунок 1 – ДК виброскоростей по оси, сонаправленной с осью лабораторного образца ЭД: а) декабрь; б) февраль

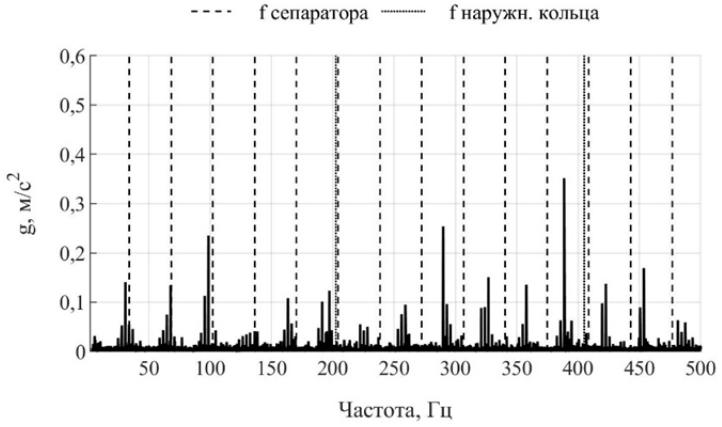
На рис. 2 показаны ДК огибающих виброускорений в направлении оси, сонаправленной с осью вала, полученные при испытаниях лабораторного двигателя.

По прошествии некоторого времени и наработки ресурса СКЗ виброускорения увеличилось в 1,7 раза. Такое резкое изменение в сторону увеличения свидетельствует о повышении энергии возмущения в измеряемом объекте. При этом обязательно должны быть обнаружены источники возмущения и отклики со стороны объекта диагностики. Между тем пик-фактор виброускорения, а также СКЗ и пик-фактор виброскорости и виброперемещения существенно сглаживают обнаруженное увеличение СКЗ виброускорения.

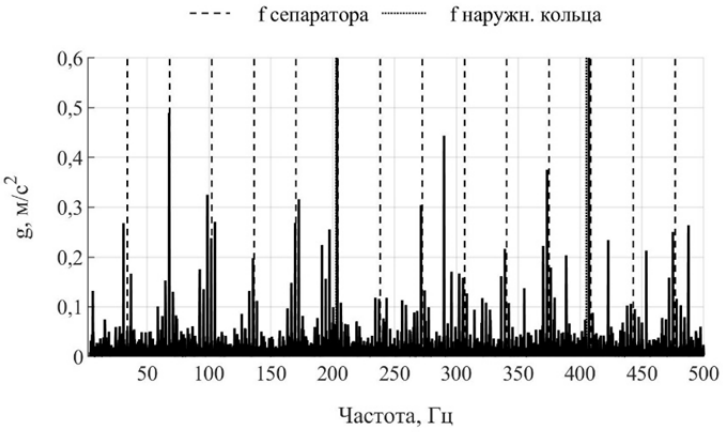
На ДК (рис. 2а) видно зарождение дефекта сепаратора. Первой стадией развития дефекта является появление пиков на частотах неисправного элемента и его первых нескольких гармоник, которые выделяются на общем фоне спектра.

При последующем развитии дефекта подшипниковая гармоника увеличивает свою мощность до такого значения, что становится соизмерима с основными механическими гармониками (на частоте вращения вала) - первой и второй. Результатом наличия в вибросигнале двух, как минимум, гармоник - синхронной и несинхронной примерно одинаковой мощности возбуждает в агрегате частоты биений. Эти частоты биений проявляются в спектре в виде боковых полос вблизи характерной подшипниковой гармоники (зарождение этой стадии дефекта видно на рис. 2а). Это обозначает, что начался этап пространственного расширения зоны дефекта в подшипнике вдоль поверхностей качения.

По мере роста мощности подшипниковой гармоники с расширением зоны дефекта число боковых полос и их мощность постепенно возрастает (рис. 2б). Дальнейшее развитие дефекта приводит к появлению новых семейств гармоник, уже от самой характерной подшипниковой частоты.



а)



б)

Рисунок 2 – ДК огибающих виброускорения по оси, сонаправленной с осью вала лабораторного образца ЭД с некоторой разницей наработки ресурса: а) июль, б) сентябрь

Т.е. появление пиков на частоте какого-либо узла системы и нескольких ее гармониках характеризует начало развития дефекта этого узла. При увеличении амплитуд этих пиков до пика на основной частоте и появлении боковых полос рядом с гармониками дефектного узла отражает сильное развитие дефекта и свидетельствует о наличии неисправности. Чем большее число гармоник с боковыми полосами появляется и чем больше их амплитуда по сравнению с общим фоном спектра, тем сильнее развит дефект.

В этом случае, именно огибающие позволяют четко различить неисправность сепаратора, т.к. на спектрах других параметров (виброперемещения, виброскорости, виброускорения) сепаратор не оставляет отклик. Виброперемещения и виброскорости не содержат отклик сепаратора, т.к. дефект только развивается и не вносит в эти параметры влияния, а спектр виброускорения не способен «разглядеть» колебания на таких низких частотах. На этом примере наглядно демонстрируется важность анализа огибающих сигналов в дополнение к анализу самих сигналов.

Таким образом, изменения в СКЗ виброускорения указали на наличие зародившегося дефекта, а ДК огибающих ускорения позволили определить неисправность конкретной части – сепаратора подшипника.

Анализ ДК виброперемещений, виброускорений и виброскоростей лабораторного образца электродвигателя ЭД позволил определить предельные частоты для каждого из сигналов:

- виброускорения: 16 кГц;
- виброскорости: 10 кГц;
- виброперемещения: 5 кГц.

Анализ спектров колебаний отдельных элементов диагностируемого объекта показал, что независимо от направления осей координат предельные частоты для каждого из рассматриваемых сигналов не меняются.

Предельные частоты для сигналов вибрации будут разниться для разных типов ЭМС. При рассмотрении другой системы потребуется определить их путем анализа спектров соответствующих сигналов. В первую очередь они будут зависеть от рабочей частоты вращения вала.

Также было определено, что спектры виброперемещений информативны на низких частотах от 0 до 100 Гц и позволяют оценить уровень небаланса ротора, который рассматривается на частоте вращения вала двигателя $f_в$, а также идентифицировать ослабление закрепления или задевания элементов подшипника на частоте $0{,}5f_в$ и другие механические неисправности. Спектры виброскоростей информативны в средней полосе частот от 500 Гц до 10 кГц. Спектры виброускорений позволяют просматривать самую широкую полосу частот, от 1,5 кГц до 16 кГц, отображая в себе эффекты трения и собственные частоты ЭМС. Спектры огибающих виброскоростей и виброускорений очень информативны в полосе частот от 0 до 3 кГц и необходимы для того, чтобы дополнить информацию, имеющуюся на низких частотах.

ДК идентифицирует до 80% гармоник вибрационных сигналов на амплитудных спектрах. Цветовая раскраска линий ДК на спектрах позволяет визуально идентифицировать частотный состав и уровень колебаний отдельных элементов диагностируемого объекта при достаточно высоком уровне кратности отдельных диагностических признаков.

Все вышесказанное позволяет охарактеризовать метод экспертной оценки ДК посредством выявления его достоинств и недостатков.

Достоинства ДК как метода диагностики технического состояния ЭМС:

– удобное визуальное представление состояния системы в частотном диапазоне;
– высокая чувствительность к изменениям параметров системы;
– возможность идентификации дополнительных источников возмущения, не известных ранее.

Недостатки метода экспертного анализа диагностических карт:

– до начала анализа необходимо знать параметры системы для расчета характерных частот;
– необходимо рассчитывать характерные частоты, специфичные для каждой отдельно конкретной ЭМС;
– сложно рассчитать все характерные частоты с высокой точностью (например, подшипниковые частоты зависят от угла контакта, который невозможно определить точно);
– в процессе работы ЭМС возможно смещение частотного состава вследствие изменения параметров системы, что необходимо учитывать при анализе;
– сложно идентифицировать все частотные составляющие рассматриваемой ЭМС.

Анализ ДК эффективен в условиях недостатка статистических данных, но известно время наработки исследуемого образца. При этом метод требует высокой квалификации у персонала, выполняющего данную работу.

При накоплении значительного объема измерений анализ ДК становится малоэффективен, так как он выполняется одним человеком и приводит к значительным временным затратам.

Самым эффективным из перечисленных методов обнаружения дефектов подшипников механической части на ранних стадиях является метод диагностики по спектрам огибающих. Поэтому наиболее предпочтительным является использование в практике этого метода диагностики дефектов в электродвигателях в виду большей достоверности и чувствительности к зарождающимся дефектам на ранних этапах. В особенности это относится к применению метода по спектрам огибающих виброускорения.

Работа выполнена в организации ФГБОУ ВО БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова в рамках НИОКТР комплексного проекта «Создание высокотехнологичного импортозамещающего производства высокоресурсных элементов систем исполнительной автоматики транспортной и авиационно-космической техники, обеспечивающей освоение и использование Мирового Океана, Арктики и Антарктики» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-11-2019-077 от 13.12.2019) в соответствии с постановлением Правительства РФ от 09.04.2010 № 218.

Литература

1. Robert J. Bruckner, Richard A. Manco II, ISS Ammonia Pump Failure, Recovery, and Lesson Learned – A Hydrodynamic Bearing Perspective, Proceedings of the 42nd Aerospace Mechanisms Symposium, NASA Goddard Space Flight Center (2014), P. 451-462.

2. Keith E. Holbert, Kang Lin, George G. Karady Enhancement of electric motor reliability through condition monitoring // IFAC Symposium on Power Plants and Power Systems Control. 2006.

3. Надежин М.И., Киселев А.А., Целищев И.А., Широбоков О.В. Токовая диагностика вентильного электропривода // Молодежь. Техника. Космос: труды XI Общероссийской науч.-техн. конф. Т.2. Балт. гос. техн. ун-т. СПб. 2019. С. 342-347.

4. Матвеев С.А., Жуков Ю.А., Коротков Е.Б., Широбоков О.В., Надежин М.И., Ладыгин А.П. Обзор методов диагностики электронасосных агрегатов спутниковых платформ // Радиопромышленность. 2020. 30(3). С. 86-98

5. Wade A. Smith, Robert B. Randall Rolling element bearing diagnostics using the Case Western Reserve University data: a benchmark study // Mechanical Systems and Signal Processing. 2015. 64-65. P. 100-131

6. Cesarda Costa, Masamori Kashiwagi, Mauro Hugo Mathias Rotor failure detection of induction motors by wavelet transform and Fourier transform in non-stationary condition // Case Studies in Mechanical Systems and Signal Processing. 2015. P. 15-26.

7. Mohamed Salah, Khmais Bacha, Abdelkader Chaari Cepstral Analysis of the stator current for monitoring mechanical unbalance in squirrel cage motors // First International Conference on Green Energy ICGE. 2014. P. 290-296.

8. Jihyoung Cha, Sangho Ko, Soon-Young Park, Eunhwan Jeong Fault detection and diagnosis algorithms for transient state of an open-cycle liquid rocket engine using nonlinear Kalman filter methods // Acta Astronautica. 2019. 163 Part A. P. 147-156.

9. Seyed M.Mehdi, Hassani.N, Xiaoning Jin, Jun Ni Physics-based Gaussian process for the health monitoring for a rolling bearing // Acta Astronautica. 2019. 154. P. 133-139.

В.В. Сергеев, Ю.С. Прибылов, В.А. Соколов

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ПОДВОДНОГО ВИДЕНИЯ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

АО «НИИ телевидения», Санкт-Петербург, npk62ypr@niitv.ru

Аннотация

В докладе предлагается методика проведения испытаний активной системы подводного видения (АСПВ) автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) в лабораторных условиях без использования водной среды для проверки её основных технических характеристик. Приводятся расчеты ослаблений светового потока водной средой в зависимости от дистанции наблюдения и относительной прозрачности воды, предлагается метод создания освещенности объектов наблюдения в воздушной среде аналогичной освещённости объектов наблюдения в водной среде. Для имитации перемещений объектов наблюдения в диапазоне скоростей хода АНПА в процессе испытаний и оценки возможности наблюдения и разрешения объектов заданного размера, предлагается универсальная вращающаяся круглая мишень. Приведены некоторые результаты лабораторных испытаний образца АСПВ. Показано, что предложенная методика испытаний позволяет проверить технические решения, промоделировать и отладить алгоритмы цифровой обработки в приближенных к натурным условиям наблюдения и, тем самым, сократить продолжительность испытаний АНПА в водной среде.

Ключевые слова: автономные и телеуправляемые необитаемые подводные аппараты, подводное телевидение, дальность видимости под водой, светодиодные системы подсветки, цифровая обработка изображений.

V.V. Sergeev, Yu.S. Pribylov, V.A. Sokolov

EVALUATION OF TECHNICAL CHARACTERISTICS OF THE ACTIVE UNDERWATER VISION SYSTEM UNDER LABORATORY CONDITIONS

JSC «Television Scientific Research Institute», Saint-Petersburg, npk62ypr@niitv.ru

Abstract

The report proposes a methodology for testing the active underwater vision system (AUVS) of autonomous underwater vehicles (AUV) in laboratory conditions without using an aquatic environment to test its main technical characteristics. Calculations of the attenuation of the light flux by an aqueous medium are given as function of the observation distance and the relative transparency of the water. It is proposed the method for creating the illumination of the observation objects in the air, which has the same illumination of the objects in the aquatic environment. The universal rotating circular target is proposed in order to simulate the movements of observation objects in the range of speeds of the AUV during testing and to evaluate the possibility of observing and detection the given size objects. Some results of laboratory tests of the AUVS sample are presented. It is shown that the proposed test method allows to check technical solutions, simulate and debug digital processing algorithms in approximate to real observation conditions and, thereby, reduce the duration of AUV testing in an aquatic environment.

Key words: autonomous and remotely controlled unmanned underwater vehicles, underwater television, underwater visibility, LED illumination systems, digital image processing.

При создании систем подводного видения для автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) требуется проведение продолжительных и дорогостоящих натурных испытаний для проверки работоспособности АСПВ в составе АНПА, особенно в процессе отладки программного обеспечения, в ходе разработки и тестировании новых алгоритмов цифровой обработки изображений.

В докладе рассматривается методика проведения испытаний для оценки технических характеристик разрабатываемых АСПВ для АНПА в лабораторных условиях без водной среды, которая

не исключает натурных испытаний, но позволяет проверить технические решения, промоделировать и отладить алгоритмы цифровой обработки в приближённых к натурным условиям наблюдения и, тем самым, сократить продолжительность испытаний АНПА в водной среде.

Предложенная методика испытаний была применена при создании АО «НИИ телевидения» опытного образца АСПВ для установки на малогабаритный АНПА АО «Концерн «НПО «Аврора». Это позволило проверить технические решения, оценить мощность излучения светильника, выбрать время накопления ТВ камеры и длительность импульсов подсветки, проверить режимы проведения фото- и видеосъёмки морского дна на заданных дистанциях от 2 до 5 метров с возможностью разрешения объектов размером от 20 мм при скорости хода АНПА до 3-х узлов, промоделировать и отладить алгоритмы адаптации к скорости хода АНПА и алгоритмы цифровой обработки для повышения качества формируемых изображений, выполнить комплексную настройку и предварительные испытания АСПВ в режиме реального времени без установки на АНПА и без водной среды.

Суть методики испытаний состоит в том, чтобы создать в лабораторных условиях в воздухе такую освещенность объектов наблюдения, которая была бы аналогичной для объектов наблюдения в водной среде при заданных дистанциях наблюдения и относительной прозрачности воды, а также обеспечить перемещение объектов наблюдения в диапазоне скоростей хода АНПА.

Для этого аналитически рассчитываются коэффициенты ослабления прямого и отраженного от объекта наблюдения светового излучения водной средой, затем подбираются нейтральные светофильтры, обратная величина коэффициентов пропускания которых (коэффициенты ослабления), равнялась бы рассчитанным коэффициентам ослабления водной средой. Далее выбранные светофильтры устанавливаются перед объективом ТВ камеры для получения необходимой освещенности объектов наблюдения в процессе испытаний.

Для имитации движения АНПА со скоростями хода 1...3 узла (0.5 м/с...1.5 м/с), оценки обнаружения и разрешения объектов наблюдения с разными контрастами, была разработана и изготовлена круглая универсальная мишень, смотри рис. 1, размещаемая на устройстве вращения.

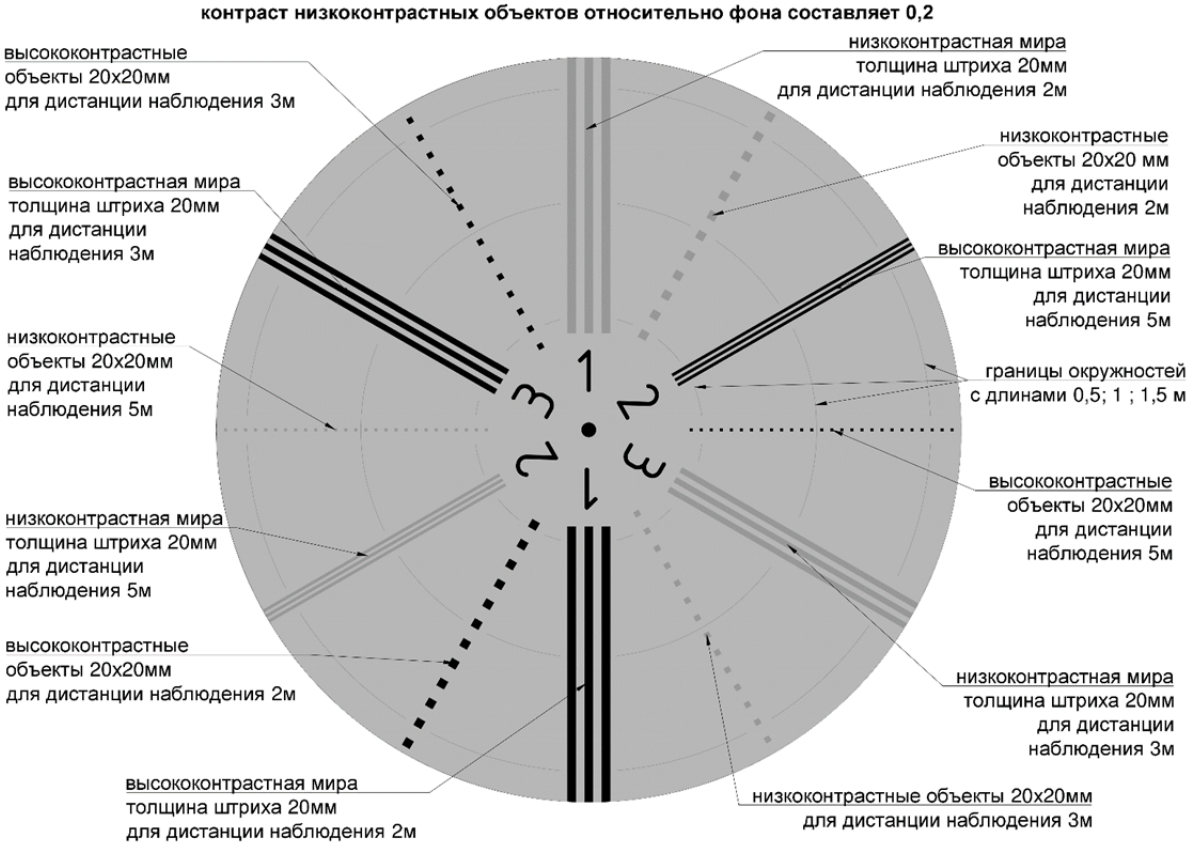


Рисунок 1 – Круглая универсальная мишень

На мишени нанесены три концентрические окружности. Длина большой окружности равна 1.5 м, средней - 1 м и маленькой окружности - 0.5 м. Таким образом, диаметр универсальной мишени немного больше или равен диаметру большой окружности.

На мишени напечатаны типовые объекты наблюдения в виде квадратов и протяженные объекты в виде штриховых мир, где низко контрастные объекты и миры имеют контраст 0.2 относительно фона. Размеры квадратов на мишени соответствуют объектам наблюдения 20×20 мм, а ширина штрихов миры - протяжённым объектам шириной 20 мм на дистанциях наблюдения 2 м, 3 м и 5 м, соответственно.

ТВ камера с осветителем устанавливается на некотором фиксированном расстоянии Lб, назовем его базовым, чтобы мишень вписывалась в поле зрения ТВ камеры. В испытаниях АСПВ ТВ камера и осветитель были установлены на расстоянии Lб=2.46 м от мишени. Поскольку дистанция наблюдения в испытаниях не меняется, то имитация дистанций наблюдения 2, 3 и 5 м осуществляется путем изменения размеров квадратов и штрихов миры относительно их размеров при наблюдении с базовой дистанции. На рис. 1 мира, расположенная напротив цифры 1, соответствует заданным объектам наблюдения на дистанции 2 м, миры, расположенные напротив цифр 3 и 2 - дистанциям наблюдения 3 м и 5 м, соответственно. Контраст штрихов и коэффициент отражения фона выбирается в соответствии с желаемыми условиями наблюдения, в испытаниях использовались две мишени с коэффициентами отражения ρ=0.62 и ρ=0.25.

Имитация движения объектов наблюдения со скоростями от 0.5 до 1.5 м/с осуществляется одновременно за счёт вращения универсальной мишени с частотой 1 оборот/сек. При этом линейная скорость перемещения элементов мишени, расположенных на окружности большого диаметра составляет 1.5 м/с, на окружности среднего диаметра – 1м/с и на окружности малого диаметра – 0.5 м/с. Объекты, расположенные между окружностями малого и большого диаметров, будут иметь скорости перемещения от 0.5 до 1.5 м/с.

Для создания требуемой освещённости универсальной мишени сначала выполняется расчёт коэффициентов ослабления светового потока в водной среде по эмпирическим формулам, полученным опытным путём и учитывающим закон Бугера, в зависимости от дистанции наблюдения L и относительной прозрачности водной среды $Z_б$ [1]:

- $К_{ПР} = e^{2L/Zб}$ - коэффициент ослабления прямого светового потока от осветителя до мишени;
- $К_{ОТР} = e^{4L/Zб}$ - коэффициент ослабления в воде для отраженного от мишени светового потока до ТВ камеры;
- $К_{ОВ} = К_{ПР} \times К_{ОТР}$ - общий коэффициент ослабления прямого и отраженного световых потоков в воде.

В табл. 1 приведены результаты расчётов коэффициентов ослабления светового потока водной средой в зависимости от дистанции наблюдения L=2, 3 и 5 м и величины относительной прозрачности водной среды Zб=20,10,7 и 5 м.

Таблица 1 – Коэффициенты ослабления светового потока водной средой

Относительная прозрачность воды Zб, м	**Расстояние до объекта L, м**								
	2			**3**			**5**		
	$К_{ПР2}$	**$К_{ОТР2}$**	**$К_{ОВ2}$**	**$К_{ПР3}$**	**$К_{ОТР3}$**	**$К_{ОВ3}$**	**$К_{ПР5}$**	**$К_{ОТР5}$**	**$К_{ОВ5}$**
20	1,22	1,49	1,82	1,35	1,82	2,46	1,65	2,72	4,48
10	1,49	2,23	3,32	1,82	3,32	6,05	2,72	7,39	20,09
7	1,77	3,14	5,55	2,36	5,55	13,08	4,17	17,41	72,65
5	2,23	4,95	11,02	3,32	11,02	36,60	7,39	54,60	403,43

Поскольку расстояние от ТВ камеры с осветителем до мишени в испытаниях фиксированная, то для заданных дистанций наблюдения 2,3 и 5 м, освещённость мишени в воздухе будет изменяться пропорциональна квадрату изменения расстояния наблюдения относительно базового расстояния Lб. То есть, освещённость мишени в воздухе на расстоянии L будет равна $E_L = E_{Lб}/K_L$, где K_L - коэффициент пересчёта освещённости с расстояния Lб на заданную дистанцию наблюдения. Так, для дистанций наблюдения L= 2, 3 и 5 м, значения коэффициентов пересчёта для базовой дистанции Lб=2.46 м равны $K_2 = 0.66$, $K_3 = 1.49$ и $K_5 = 4.13$.

Умножив полученные значения коэффициентов $К_{OBL}$ в табл. 1 на K_L, получим итоговые значения коэффициентов ослаблений светового потока в водной среде, учитывающие дистанцию наблюдения (L), величину относительной прозрачности воды (Zб) и коэффициент пересчёта с базовой дистанции наблюдения на заданные дистанции наблюдения (K_L).

Таблица 2 – Итоговые коэффициенты ослабления светового потока водной средой

Относительная прозрачность воды Zб, м	**Расстояние до объекта L, м**		
	2	**3**	**5**
	$К_{О2}=К_{ОВ2}\times К_2$	$К_{О2}=К_{ОВ3}\times К_3$	$К_{О5}=К_{ОВ5}\times К_5$
20	1,20	3,66	18,51
10	2,19	9,00	82,98
7	3,67	19,46	300,15
5	7,29	54,43	1666,62

Далее подбираются светофильтры, коэффициенты ослабления которых соответствовали бы рассчитанным коэффициентам ослабления воды, приведённым в табл. 2.

В испытаниях использовались светофильтры из набора №1668, см. табл. 3.

Таблица 3 – Коэффициенты ослабления светового потока нейтральных светофильтров из набора №1668

	Фильтры №								
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
Коэффициенты ослабления	$1,4^x$	$1,5^x$	$2,1^x$	$2,7^x$	$4,4^x$	$7,6^x$	$12,3^x$	48^x	150^x

В табл. 4 приведены комбинации фильтров, коэффициенты ослабления которых близки к коэффициентам ослабления воды из табл. 2.

Таблица 4 – Комбинация фильтров из набора №1668 для лабораторных испытаний

Комбинация фильтров из набора №1668	**Коэффициент ослабления комбинации фильтров**	**Коэффициент ослабления воды $К_{OL}$**
1	1,40	1,20
1,2	2,10	2,19
1,4	3,78	3,66
6	7,60	7,29
3,5	9,24	9,00
2,7	18,45	18,51
1,2,3,5	19,40	19,46
5,7	54,12	54,43
2,5,7	81,18	82,98
1,2,9	315,00	300,15
2,6,9	1710,0	1666,62

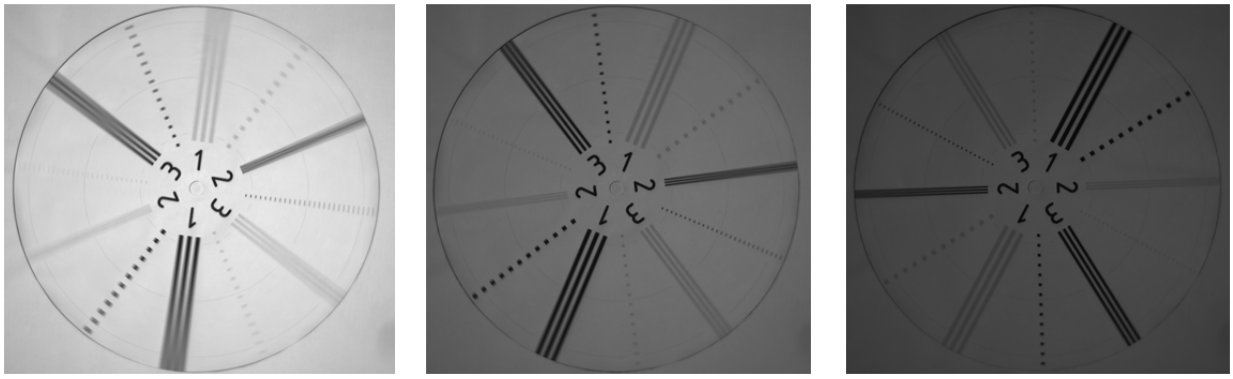
В процессе испытаний полученные комбинации фильтров из таблицы 4 устанавливались перед объективом ТВ камеры.

В испытаниях участвовал опытный образец АСПВ, который включал в себя блок телекамеры, модуль питания и управления, осветитель светодиодный [2]. В блоке телекамеры АСПВ была установлена монохромная ТВ камера на КМОП матрице Sony IMX265. Осевая сила света светодиодного осветителя составляла 5700 кд.

Приведем некоторые результаты лабораторных испытаний.

Сначала было определено время накопления ТВ камеры и длительность импульсов подсветки для разрешения типовых объектов в режимах фото- и видеосъёмки на скоростях хода АНПА. Расчётное время экспозиции вычислялось из допустимости «смаза» 4 мм при наблюдении объектов размерами 20×20 мм.

На рис. 2 приведены изображения, полученные при времени накопления 8 мс, 4 мс, 2.7 мс. Освещённость мишени соответствует освещённости объектов в водной среде с дистанции наблюдения ТВ камерой 2 м при Zб=10 м.



Время накопления t=8 мс Время накопления t=4 мс Время накопления t=2.7 мс

Рисунок 2 – Примеры изображений для определения времени накопления на скоростях хода АНПА

Миры 1,3 и 2 соответствуют объектам наблюдения размером 20 мм на дистанциях наблюдения 2, 3 и 5 м.

При времени накопления 8 мс разрешаются миры 1 и 3 при скорости их перемещения 0.5 м/с.

При времени накопления 4 мс разрешаются миры 1, 2 и 3 при скорости перемещения 0.5 м/с, а при скорости 1м/с разрешаются миры 1 и 3.

При времени накопления 2.7 мс разрешаются миры 1 и 3 при скорости перемещения 1.5 м/с, а мира 2 не разрешается. Для разрешения миры 2 необходимо уменьшить время накопления до 2 мс.

Протяжённые объекты наблюдаются при любой экспозиции, но с увеличением смаза и уменьшением их контрастности.

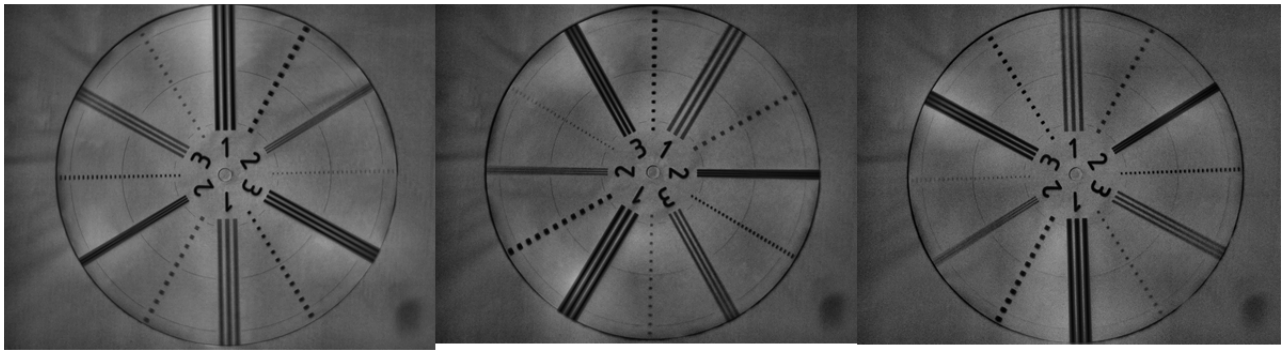
При уменьшении относительной прозрачности водной среды и с увеличением дистанции наблюдения качество получаемых изображений значительно ухудшается. На рис. 3 приведены исходные изображения с временем накопления 4 мс. Освещённость мишени соответствует освещённости объектов в водной среде с дистанции наблюдения ТВ камерой 3 м при Zб=20, 10 м и 7 м.

Zб=20 м Zб=10 м Zб=7 м

Рисунок 3 – Примеры исходных изображений с временем накопления 4 мс

Предложенная методика испытаний позволила в лабораторных условиях промоделировать различные алгоритмы цифровой обработки и режим биннинга 2×2 эл. для повышения качества получаемых изображений.

Результаты моделирования показали, что для повышения качества фото и видео изображений в водной среде целесообразно использовать алгоритм адаптивного контрастирования CLAHE, см. рис. 4, а при ухудшении условий наблюдения режим автоматического перехода на биннинг 2×2, см. рис. 5, но за счёт уменьшения разрешения.



Zб=20 м Zб=10 м Zб=7 м

Рисунок 4 – Изображения после обработки алгоритмом контрастирования CLAHE для дистанции наблюдения 3 м, экспозиция 4 мс

Исходное изображение После контрастирования алгоритмом CLAHE

Рисунок 5 – Изображения, полученные в режиме биннинга 2×2, дистанция наблюдения 3 м, экспозиция 4 мс, Zб=7 м

При создании систем подводного видения для автономных необитаемых подводных аппаратов, особенно в процессе отладки программного обеспечения, при разработке и тестировании новых алгоритмов цифровой обработки изображений, требуются продолжительные и дорогостоящие натурные испытания АСПВ в составе АНПА в водной среде.

Предложена методика проведения испытаний для оценки технических характеристик разрабатываемых АСПВ для АНПА в лабораторных условиях без водной среды, которая не исключает натурные испытания, но позволяет провести комплексную настройку и предварительные испытания в приближенных к натурным условиям наблюдения и, тем самым, сократить продолжительность испытаний АСПВ в составе АНПА в водной среде.

Проведенные испытания подтвердили возможность оценки технических характеристик АСПВ в режиме реального времени без установки на АНПА и без водной среды. В процессе испытаний можно оценить чувствительность ТВ камеры, мощность излучения светильника, выбрать время накопления ТВ камеры и длительность импульсов подсветки, проверить режимы фото и видеосъёмки для наблюдения объектов на заданных дистанциях в диапазоне скоростей хода АНПА, промоделировать и отладить алгоритмы адаптации к скорости хода АНПА и алгоритмы цифровой обработки для повышения качества формируемых изображений.

Литература

1. 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.

2. 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.

В.В. Сергеев, Ю.С. Прибылов, В.Н. Карпов, В.А. Соколов, О.К. Пшеничная

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА ФОТО И ВИДЕО РЕГИСТРАЦИИ ДЛЯ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

АО «НИИ телевидения», Санкт-Петербург, npk62ypr@niitv.ru

Аннотация

В докладе рассматриваются структура, составные части и основные технические решения, использованные в АО «НИИ телевидения» при создании адаптивной системы подводного видения (АСПВ) со светодиодной импульсной подсветкой для автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА). АСПВ предназначена для проведения фото и видео съёмки морского дна на дистанциях от 2 до 5 метров с возможностью наблюдения объектов размером от 20 мм при скорости хода АНПА до 3-х узлов. Показано, что для уменьшения мощности потребления и времени работы от аккумуляторных батарей целесообразно использовать импульсный режим подсветки, где время излучения согласовано с временем накопления в ТВ камере и адаптацию мощности излучения осветителя к прозрачности водной среды и к дистанции съёмки. Показано, что для повышения качества формируемых изображений следует использовать ТВ камеры с высокой контрастной чувствительностью и разрешением, пространственное разнесение источника света и ТВ камеры, адаптацию длительности экспозиции к скорости хода АНПА и алгоритмы цифрового контрастирования формируемых изображений. Описаны составные части и структура АСПВ, приведены характеристики ТВ камеры, светодиодного осветителя и некоторые результаты лабораторных испытаний.

Ключевые слова: автономные и телеуправляемые необитаемые подводные аппараты, подводное телевидение, твердотельные устройства формирования изображений, дальность видимости под водой, светодиодные системы подсветки.

V.V. Sergeev, Yu.S. Pribylov, V.N. Karpov, V.A. Sokolov, O.K. Pshenichnaya

ADAPTIVE PHOTO AND VIDEO SYSTEM FOR AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLES

JSC «Television Scientific Research Institute», Saint Petersburg, npk62ypr@niitv.ru

Abstract

The report discusses the structure, components and main technical solutions that were used by JSC «Television Scientific Research Institute» during the creation of the adaptive underwater vision system (AUVS) with LED pulsed illumination for autonomous underwater vehicles (AUV). AUVS is designed for photo and video filming of the seabed at distances from 2 to 5 meters with the ability to observe objects from 20 mm in size at an AUV speed of up to 3 knots. It is shown that to reduce the power consumption and operating time from batteries it is advisable to use a pulsed illumination mode, where the radiation time of the LED illuminator is equal with the exposure time of the TV camera, and where its radiation power adaptive to the transparency of the water environment and observation distance. It is shown that in order to improve the quality of the generated images, one should use TV cameras with high contrast sensitivity and resolution, spatial spreading of the light source and the TV camera, adaptation of the exposure duration to the speed of the AUV, and digital contrasting algorithms for the generated images. The report describes the components and structure of the AUVS, the characteristics of the TV camera, LED illuminator and some results of laboratory tests.

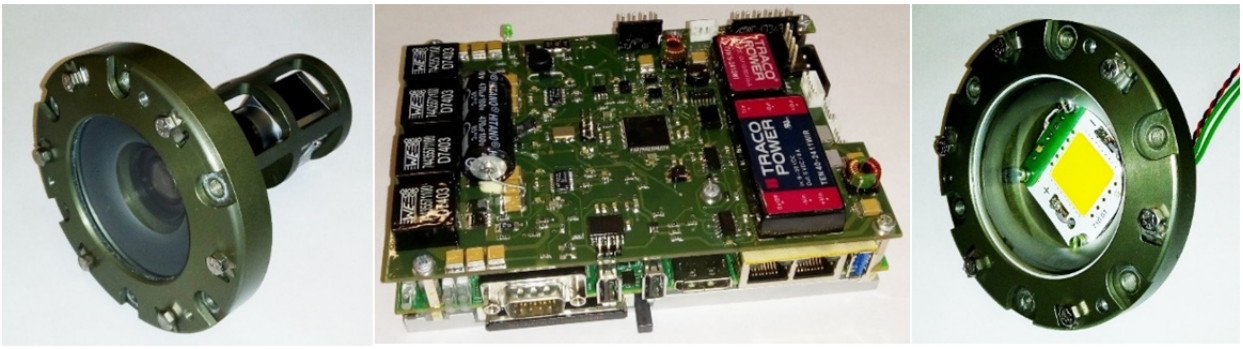
Key words: autonomous and remotely controlled unmanned underwater vehicles, underwater television, solid-state imaging devices, underwater visibility, LED lighting systems.

В настоящее время уделяется повышенное внимание направлению создания автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), оснащенных системами подводного видения, благодаря возможности получения объективной информации о подводной обстановке на различных глубинах погружения, что позволяет расширить спектр решения научных и прикладных задач освоения Мирового океана, успешнее выполнять поисковые, аварийно-спасательные операции и решать задачи оборонного значения.

В общем случае при проектировании систем подводного видения АНПА в зависимости от класса и решаемых ими задач, предъявляются требования к дальности видимости, разрешающей способности, качеству получаемых фото и видео материалов, а также требования к массогабаритным характеристикам, рабочей глубине погружения и потребляемой мощности, определяющей время автономной работы при работе от аккумуляторных батарей.

В 2019 году АО «НИИ телевидения» разработало и изготовило опытный образец АСПВ для установки на малогабаритный АНПА АО «Концерн «НПО «Аврора».

Система подводного видения предназначена для проведения фото и видеосъёмки морского дна на дистанциях от 2 до 5 метров с возможностью разрешения объектов размером от 20 мм при скорости хода АНПА до 3-х узлов и при этом имеет минимальную мощность потребления. Конструкция составных частей АСПВ предусматривает их установку в герметичные отсеки АНПА и обеспечивает фото и видео съемку на рабочей глубине 1000 м (рисунок 1).



а) б) в)

Рисунок 1 – Составные части АСПВ

В состав опытного образца АСПВ входят:

- блок телекамеры (рис. 1а);
- конструктивная сборка Блока питания и управления и Процессорного модуля (рисунок 1б);
- осветитель светодиодный (рис. 1в).

Структурная схема АСПВ приведена на рис. 2.

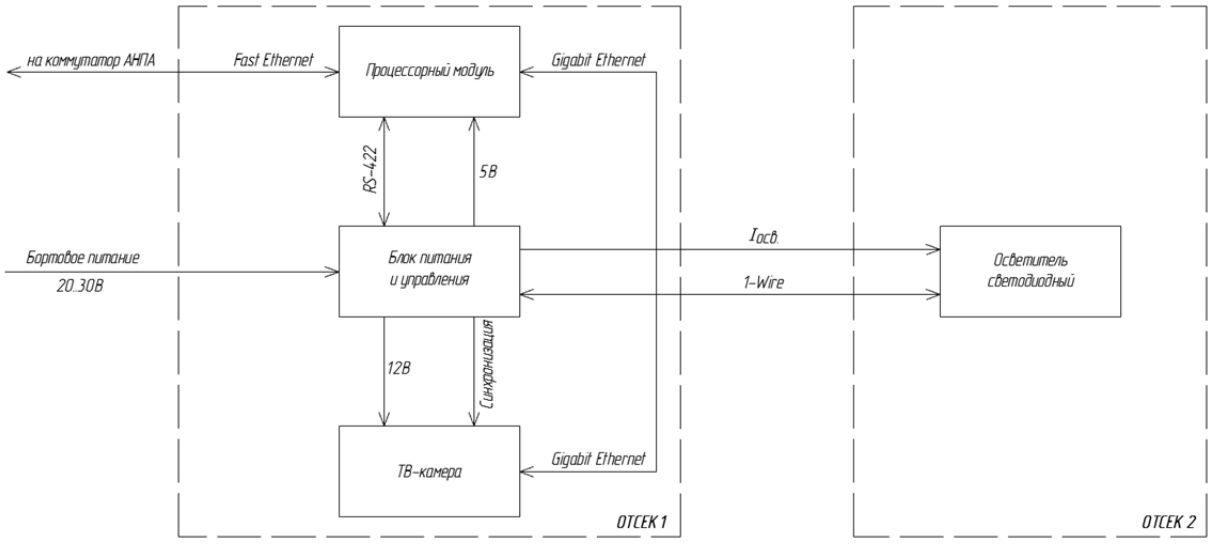


Рисунок 2 – Структурная схема АСПВ

Рассмотрим структуру, составные части и основные технические решения, использованные при создании АСПВ.

Блок телекамеры (рисунок 1а) конструктивно состоит из монохромной ТВ камеры с объективом и оправы с защитным стеклом для крепления в герметичный отсек АНПА. ТВ камера формирует изображения на дистанциях съемки от 2 до 5 м в широком диапазоне относительной прозрачности водной среды $Z_б$. Относительная прозрачность воды $Z_б$, измеренная по белому диску Секки,

служит оценкой дальности видимости систем подводного видения. Так, дальность видимости монохромной системы подводного видения должна быть не хуже $Z_б$.

На выбор ТВ камеры в первую очередь влияли оптические свойства водной среды. С оптической точки зрения морская вода представляет собой сложную неоднородную среду, которая рассеивает и поглощает свет, поэтому даже при сравнительно небольших дальностях наблюдения ухудшается качество получаемых объектов. Это проявляется в уменьшении яркости и контрастности изображений, в искажении пространственной структуры и утрате информации о цвете объекта, в увеличении шумовой составляющей изображения и в ограничении дальности видимости [1]. Поэтому для обеспечения возможности наблюдения и съёмки указанных объектов в водной среде на заданных дистанциях, ТВ камера системы подводного видения должна иметь высокую контрастную чувствительность и высокую разрешающую способность [2].

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, была выбрана ТВ камера с Ethernet интерфейсом на монохромной КМОП матрице [Sony] IMX265LLR: число фоточувствительных элементов 2048×1536, размер элемента 3,45×3,45 мкм. ТВ камера имеет высокую контрастную чувствительность, небольшие массогабаритные характеристики и оптический формат 1/1.8″.

Для обеспечения требуемого угла поля зрения в воде по диагонали 52 градуса и глубины резкости без подстройки на дистанциях съёмки, используется мегапиксельный объектив TAMRON M118FM06 с фокусным расстоянием 6 мм и диафрагменным числом 1,4. ТВ камера имеет внешнюю синхронизацию и программное управление временем накопления.

Выбранная ТВ камера обеспечивает наблюдение объектов размерами 20×20 мм и протяженных объектов размером от 20 мм. В неподвижном положении на дистанции съёмки 5 м объект занимает на матрице ~7 эл, а на дистанции 2 м ~ 17 эл. Это удовлетворяет критерию Джонсона для распознавания объектов указанного размера [4].

Для проверки возможности наблюдения и съёмки указанных объектов на скоростях хода АНПА, были проведены лабораторные испытания по оценке разрешающей способности ТВ камеры в зависимости от установленного времени накопления. Так, при времени накопления 8 мс мира с шириной штриха 20 мм при скорости перемещения 0,5 м/с разрешается на дистанциях наблюдения от 2 до 3 м, а при времени накопления 4 мс – на всех дистанциях от 2 до 5 м. При скорости перемещения 1 м/с (2 узла) и времени накопления 4 мс мира разрешается на дистанциях наблюдения от 2 до 3 м, а на 5 м – не разрешается из-за «смаза». При уменьшении времени накопления до 2,7 мс мира стала разрешаться и на дистанции наблюдения 5 м. Заметим, что отдельно стоящие и протяжённые объекты шириной 20 мм наблюдались на всех дистанциях при экспозициях от 2,7 мс до 8 мс, но с различной величиной «смаза» и контрастности изображений объектов.

Для обеспечения необходимого уровня освещённости объектов наблюдения на заданных дистанциях съёмки разработан осветитель светодиодный (рисунок 1в) на матрице SvL-23iP100. Осевая сила света осветителя 5700 кд, угол излучения в воде 60^0, мощность потребления в непрерывном режиме излучения 100 ВА. В осветителе имеется контроллер с датчиками измерения температуры и влажности, кроме того, контроллер измеряет время наработки светодиодной матрицы.

При применении внешней подсветки контраст объекта уменьшается не только из-за ослабляющего действия воды, но и из-за эффекта объёмного рассеяния энергии при прохождении светового пучка через водную среду, которое воспринимается оптическим приёмником как свечение самой воды (световая дымка) и называется помехой обратного рассеяния (ПОР), которая значительно снижает яркостной контраст объекта наблюдения [2]. Заметим, что увеличение мощности источников света не позволяет пропорционально увеличить контраст объекта наблюдения, поскольку с ростом мощности излучения растёт и вуалирующая яркость ПОР.

В разработанной АСПВ для уменьшения ПОР применено пространственное разнесение источника света и ТВ камеры. Величина разнесения и угол наклона светильника относительно оптической оси объектива были рассчитаны таким образом, чтобы при заданных дистанциях наблюдения (2 – 5 м), габаритах АНПА и компоновки в нём оборудования, максимально уменьшить засвеченный объём воды от источника света перед ТВ камерой.

Блок питания и управления конструктивно выполнен в виде печатной платы, размещенной над процессорным модулем, см. рис. 1б. Блок питания и управления информационно связан с ТВ камерой, осветителем светодиодным и процессорным модулем, см. структурную схему АСПВ (рисунок 2), и выполняет следующие функции:

- формирует из бортового напряжения 20…30В напряжения питания +5 В для процессорного модуля и контроллера осветителя и напряжение питания +12 В для ТВ камеры;
- по команде процессорного модуля формирует импульсный или постоянный ток питания светодиодной матрицы в диапазоне от 0,1 до 3,5 А в зависимости от требуемой мощности излучения;
- принимает по интерфейсу 1-Wire телеметрические данные от осветителя – температуру подложки матрицы, относительную влажность в отсеке осветителя и наработку светодиодной матрицы и передает данные по интерфейсу RS-422 в процессорный модуль для принятия решения о техническом состоянии устройства;
- обеспечивает синхронизацию времени накопления ТВ камеры и времени излучения осветителя подачей сигнала синхронизации в ТВ камеру синхронно с формированием тока питания светодиодной матрицы осветителя.

Процессорный модуль – одноплатный компьютер формата 3,5″ на базе процессора Intel Atom E3845, 4 ядра, базовая частота 1.91 ГГц.

В процессорном модуле установлены:
- оперативная память 4 GB;
- Flash память 16 GB;
- Flash диск 512 GB для записи и хранения фото и видео материалов;
- разработанное специализированное ПО АСПВ.

Процессорный модуль АСПВ информационно связан с бортовым компьютером АНПА по сети Fast Ethernet, с ТВ камерой – по сети Gigabit Ethernet, а с блоком питания и управления – по интерфейсу RS-422, см. рис. 2.

Процессорный модуль совместно с блоком питания и управления обеспечивает:
- импульсный режим подсветки при формировании изображений, где время излучения согласовано с временем экспозиции в ТВ камере;
- адаптацию длительности экспозиции к скорости хода АНПА и к дистанции съёмки;
- адаптацию фотосъёмки к скорости хода АНПА;
- адаптацию мощности излучения осветителя к прозрачности водной среды и к дистанции съёмки;
- контроль технического состояния составных частей АСПВ.
- Кроме того, процессорный модуль выполняет:
- цифровую обработку изображений с использованием адаптивного алгоритма контрастирования CLAHE;
- запись фото и видео изображений на Flash диск;
- приём служебной информации о скорости хода АНПА, расстоянии до дна, географических координатах от бортового компьютера и передачу данных о техническом состоянии АСПВ в бортовой компьютер;
- передачу записанных фото и видео изображений в бортовой компьютер АНПА.

Импульсный режим подсветки при фото и видеосъёмке значительно уменьшает потребляемую мощность осветителя АСПВ и позволяет увеличить время автономной работы АНПА при ограниченной мощности аккумуляторных батарей. Так, в режиме фотосъёмки с частотой 2 кадра/сек с 50% перекрытием кадров, при времени накопления 4 мс потребляемая мощность импульсного светильника будет в 125 раз меньше, а при частоте видеосъёмки 25 кадров/сек – в 10 раз меньше по сравнению с непрерывным излучением, что составляет 0,8 и 10 Вт соответственно.

Адаптация длительности экспозиции к скорости хода АНПА и к дистанции съёмки уменьшает «смаз» изображений и обеспечивает требуемое разрешение АСПВ.

Адаптация режима фотосъёмки к скорости хода АНПА оптимизирует число записываемых кадров в процессе съёмки и позволяет уменьшить требование к объёму накопителя. При увеличении скорости хода АНПА число кадров съёмки увеличивается при сохранении требований к перекрытию кадров, а при уменьшении скорости хода – уменьшается.

Адаптация мощности излучения светильника к прозрачности водной среды и к дистанции съёмки позволяет дополнительно уменьшить мощность потребления АСПВ. В результате анализа в процессорном модуле гистограммы изображений от ТВ камеры, формируется необходимая величина тока питания светильника для изменения мощности излучения.

Информацию о скорости хода АНПА и расстоянии до дна для адаптации процессорный модуль АСПВ получает от бортового компьютера АНПА.

По результатам лабораторных испытаний для повышения качества формируемых в АСПВ изображений целесообразно использовать адаптивный алгоритм цифрового контрастирования CLAHE.

Область робототехники с использованием автономных необитаемых подводных аппаратов, оснащенных системами подводного видения, имеет важное значение для решения широкого спектра научных, народнохозяйственных и оборонных задач.

При создании систем подводного видения для автономных подводных аппаратов целесообразно использовать импульсный режим подсветки, где время излучения согласовано с временем накопления в ТВ камере. Это позволяет при фото и видеосъёмке значительно уменьшить потребляемую мощность осветителя АСПВ и увеличить время автономной работы АНПА, что важно при ограниченной мощности аккумуляторов.

Адаптация времени накопления ТВ камеры к скорости хода АНПА позволяет уменьшить «смаз» изображений и обеспечить наблюдение объектов заданного размера;

Адаптация режима фотосъёмки к скорости хода АНПА оптимизирует число записываемых кадров в процессе съёмки и позволяет уменьшить требование к объёму накопителя.

Для повышения качества формируемых изображений необходимо использовать ТВ камеры с высокой контрастной чувствительностью и разрешением, пространственное разнесение источника света и ТВ камеры, а также использовать адаптивный алгоритм цифрового контрастирования CLAHE.

Литература

1. Долин Л.С., Левин И.М. «Справочник по теории подводного видения». – Л.: Гидрометеоиздат, 1991. – 229с.

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.

4. Воробьев А.Л., Журик Ю.П., Краснов А.М., Шашков С.Н. «Методика вероятностного анализа процесса наблюдения в цифровых телевизионных системах видимого диапазона». Электронный журнал «Труды МАИ». Выпуск № 49, 2011, 29 с.

А.И. Машошин, И.В. Пашкевич

ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, aimashoshin@mail.ru

Аннотация

В работе рассмотрены пути интеллектуализации АНПА в обеспечение решения трёх задач, от которых во многом зависит успешное применение АНПА. Этими задачами являются: управление АНПА, обеспечивающее достижение цели миссии в условиях возникновения нештатных ситуаций, а также преднамеренного и непреднамеренного противодействия; подводная навигация, обеспечивающая выполнение миссии на больших удалениях от пункта базирования; сетевая подводная связь, обеспечивающая групповое применение АНПА.

Ключевые слова: автономный необитаемый подводный аппарат, система управления, подводная навигация, сетевая подводная связь.

A.I. Mashoshin, I.V. Pashkevich

PROBLEM ISSUES OF AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLES INTELLECTUALISATION

JSC «Concern Central Research Institute «Elektropribor», St. Petersburg, aimashoshin@mail.ru

Abstract

The paper considers ways to intellectualize autonomous underwater vehicles (AUV) in order to provide solutions to three problems that largely determine the successful application of AUV. These problems are: control of the AUV, which ensures the achievement of the mission task in the event of emergency situations, as well as deliberate and unintentional counteraction; underwater navigation, which ensures the implementation of the mission at great distances from the port; network underwater communication, which ensures the group use of the AUV.

Key words: autonomous underwater vehicle, control system, underwater navigation, network underwater communication.

Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) являются одним из наиболее перспективных средств изучения и освоения Мирового океана [1].

Поскольку АНПА является автономным роботом, его создание предполагает внедрение целого комплекса технологий искусственного интеллекта.

Целью работы является рассмотрение путей интеллектуализации решения трёх задач, от которых во многом зависит эффективное применение АНПА:

1. создание системы управления АНПА, обеспечивающей достижение цели миссии в условиях возникновения нештатных ситуаций, а также преднамеренного и непреднамеренного противодействия;
2. подводная навигация АНПА большой автономности, обеспечивающая выполнение миссии на больших удалениях от пункта базирования;
3. сетевая подводная связь, обеспечивающая групповое применение АНПА.

Интеллектуализация решения перечисленных задач предполагает использование такой технологии искусственного интеллекта, как интеллектуальная поддержка принятия управленческих решений [2].

По каждой задаче в работе формулируются основные проблемные вопросы и намечаются пути их решения на основе интеллектуализации.

Создание эффективной системы управления АНПА

Назначением системы управления (СУ) АНПА является максимально точное выполнение маршрутного задания (МЗ), загруженного в её память до начала миссии. МЗ представляет собой разработанный человеком-оператором набор формализованных инструкций, привязанных ко вре-

мени и географическим координатам, точное и своевременное выполнение которых позволит достичь цели миссии [3]. Для разработки МЗ созданы специальные языки и инструментарий.

Выполнение МЗ АНПА под управлением СУ больших трудностей не вызывало бы, если бы не препятствующие обстоятельства. Опыт применения АНПА показывает, что эти обстоятельства сопутствуют практически каждой миссии. И обусловлены они как внешними, так и внутренними факторами. К внешним факторам относятся:

– появление подводных объектов, столкновение с которыми нужно избежать;

– обнаружение неподвижных препятствий (подводных хребтов и др.), не нанесённых на навигационную карту, которые нужно обойти;

– непредвиденное изменение скорости и/или направления течения, вызывающие необходимость изменять параметры движения АНПА;

– изменение границ ледового покрова, что препятствует всплытию для обсервации в назначенное время.

Большинство из перечисленных факторов приводит к дополнительным временным затратам и дополнительному расходу запаса электроэнергии и, в конечном счёте, к необходимости корректировки МЗ.

Ситуация ещё более усложняется в условиях преднамеренного противодействия выполнению миссии, что имеет место при применении АНПА в специальных операциях.

Внутренними факторами, препятствующими выполнению МЗ, являются неустранимые неисправности аппаратной части АНПА и не восстанавливаемые сбои программного обеспечения, что также приводит к необходимости корректировки МЗ, а, в крайнем случае, и к прекращению миссии.

Парирование перечисленных негативных факторов является нетривиальной задачей даже для человека, поскольку для принятия в сложившейся ситуации эффективного решения, обеспечивающего достижение цели миссии, нужно учесть как возникшие негативные факторы, так и ограничения по запасу электроэнергии, скорости хода, точности автономной навигации, дальности гидроакустической связи. Для решения этой задачи системой управления АНПА она должна реализовывать сложные адаптивные алгоритмы, базирующиеся на технологиях искусственного интеллекта. И здесь возникает ещё одна проблема. Формализованных методик синтеза подобных алгоритмов на сегодняшний день не существует. Есть только общие рекомендации по принципам их построения [4]. Такие алгоритмы во многом являются эвристическими, что переносит трудности с их разработки на их практическую отработку. А длительная отработка не предусмотрена действующей в России нормативной базой, регламентирующей разработку по госконтрактам сложной техники.

Рисунок 1 – Структурная схема СУ АНПА

СУ АНПА относится к системам управления наивысшей сложности, что обусловлено необходимостью управлять в реальном времени большим количеством разнородных технических средств и при этом функционировать в полностью автоматическом режиме в непрерывно изменяющейся внешней зачастую агрессивной среде при ограниченных возможностях автономной подводной навигации и связи с пунктом управления.

Известно [5, 6], что построить такую СУ как централизованную (мультиобъектную), в которой СУ управляет всеми действиями всех технических средств АНПА, ввиду высокой сложности весьма затруднительно.

Для построения СУ АНПА в наибольшей степени подходит децентрализованная мультиагентная структура (рис.1). При такой структуре каждая система АНПА является самостоятельным независимым интеллектуальным агентом с собственной системой управления. Управление движением АНПА и выполнением других функций осуществляется путём взаимодействия на основе равноправного общения всех систем-агентов. Для того чтобы это взаимодействие имело целенаправленный характер, предусмотрен специальный агент-диспетчер, организующий выполнение сценария миссии, описанного в МЗ.

С учётом сказанного основными путями решения проблемы создания эффективной СУ АНПА являются:

− разработка адаптивных алгоритмов, позволяющих управлять системами АНПА и АНПА в целом в условиях возникновения нештатных ситуаций, а также преднамеренного и непреднамеренного противодействия с учётом ограничений по запасу электроэнергии, скорости хода, точности автономной подводной навигации, дальности гидроакустической связи;

− разработка рациональных алгоритмов распределения энергоресурсов по системам АНПА в соответствии со сложившейся обстановкой;

− разработка алгоритмов сохранения функциональной устойчивости АНПА при частичной неисправности технических средств;

− разработка СУ на базе мультиагентной технологии;

− создание моделирующих комплексов, позволяющих отрабатывать СУ, в том числе, в нештатных ситуациях, а также верифицировать маршрутное задание АНПА перед загрузкой его в СУ;

− совершенствование нормативной базы, предусматривающее в необходимых случаях длительный этап натурной отработки создаваемых робототехнических средств.

Подводная навигация АНПА большой автономности

Одной из важных миссий, которые планируется возложить на АНПА, является выполнение задач в трудно доступных районах (в частности подо льдом) на больших удалениях от базы. Для выполнения этих миссий уже сейчас создаются АНПА большой автономности (АНПА БА). Одним из необходимых условий эффективного решения задач на больших удалениях от базы является высокоточная навигация АНПА БА на всём протяжении маршрута.

Основой навигации АНПА БА остаётся счисление пути с использованием данных бортового курсоуказателя либо бесплатформенной инерциальной навигационной системы и абсолютного (гидроакустического) либо относительного (электромагнитного) лага [7-8]. Однако, учитывая жёсткие требования к габаритам и энергопотреблению этих приборов для их размещения на АНПА, они имеют ограниченные характеристики, как по точности выработки курса, так и по глубине под килём, при которой возможно измерение скорости абсолютным лагом (как правило, не более 400 м). Из этого вытекает необходимость периодической коррекции координат АНПА путём осуществления обсервации.

На сегодняшний день разработано большое количество методов определения координат (позиционирования) АНПА [7-12]. Все эти методы можно разделить на 3 группы:

− методы, не требующие предварительного навигационного обустройства планируемого маршрута АНПА;

− методы, предусматривающие предварительное навигационное обустройство планируемого маршрута АНПА;

− методы оперативного оборудования маршрута.

Рассмотрим каждую группу методов подробнее.

Методы позиционирования АНПА, не требующие предварительного навигационного оборудования их планируемого маршрута

К этим методам относятся:

1. Позиционирование АНПА с использованием сигналов глобальных спутниковых навигационных систем (ГСНС) [7]. Достоинствами данного метода являются: высокая точность позиционирования (единицы-десятки метров) и возможность его использования в любой точке Мирового океана, а недостатком – необходимость всплытия АНПА в надводное положение и приёма сигналов ГСНС, что занимает значительное время (особенно при всплытии с больших глубин), требует

дополнительного расхода запаса электроэнергии, а также ведёт к потере скрытности АНПА. Кроме того, возможность позиционирования АНПА по данным ГСНС зависит от состояния поверхности моря (при большом волнении приём сигналов ГСНС существенно затруднён). Ввиду малой мощности излучения сигналы ГСНС обладают низкой помехозащищённостью и легко поддаются преднамеренному искажению либо подавлению.

2. Позиционирование с использованием сигналов радионавигационных систем (РНС) [9-11]. В зависимости от диапазона используемых частот РНС делятся на сверхдлинноволновые (СДВ), длинноволновые (ДВ), средневолновые (СВ). Достоинством РНС СДВ диапазона является большая дальность действия (до 13000 км), а недостатком – низкая точность позиционирования (до 760 м на предельной дальности). Достоинством РНС ДВ диапазона является сравнительно большая дальность действия (до 1500 км) и приемлемая точность позиционирования (до 150 м на предельной дальности). Достоинством РНС СВ диапазона является сравнительно большая дальность действия (до 1000 км) и высокая точность позиционирования (единицы метров).

К достоинствам РНС следует также отнести возможность при определённых условиях позиционирования при нахождении АНПА в приповерхностном слое воды без всплытия на поверхность, а также подо льдом.

Основным недостатком РНС, кроме необходимости всплытия АНПА в приповерхностный слой воды, является то, что отечественными системами РНС охвачены весьма ограниченные области Мирового океана. Не исключением являются и прибрежные моря России.

1. Позиционирование с использованием технологии высокоточной подводной акустической дальнометрии [12]. Метод состоит (рис.2) в установке у побережья нескольких ненаправленных гидроакустических излучателей, периодически излучающих кодированные сигналы, содержащие информацию об условном номере излучателя, времени излучения и скорости распространения сигнала. АНПА, приняв сигнал каждого излучателя, с использованием извлеченной из него информации и, зная координаты каждого излучателя, вычисляет время его распространения и дистанцию до излучателя. И далее, определив дистанцию до нескольких излучателей, методом длинной базы вычисляет собственные координаты. Ошибка позиционирования согласно [12] не превышает 250 м при удалении от излучателей до нескольких сотен километров.

Достоинством данного метода является возможность скрытного (без всплытия на поверхность) позиционирования всех подводных объектов (в том числе и АНПА), находящихся в районе площадью до 100 тыс. км^2, причём не периодически, а практически непрерывно, что позволяет АНПА не отклоняться от заложенного маршрута. Недостатком метода является необходимость развёртывания подобных систем в районах, через которые пролегает маршрут АНПА, а также необходимость периодически уточнять скорость распространения акустических сигналов на трассе от каждого излучателя до АНПА.

На сегодняшний день подобных развёрнутых систем в мире нет, но их разработка активно ведётся как в России [12], так и за рубежом [13].

Методы позиционирования АНПА, предусматривающие предварительное навигационное обустройство планируемого маршрута АНПА

К этим методам относятся:

1. Позиционирование с использованием донных маяков-ответчиков (ДМО), излучающих кодированные сигналы по запросу либо периодически [7,8]. По этим сигналам АНПА определяет текущую дистанцию до каждого ДМО и далее одним из методов вычисляет собственные координаты относительно ДМО. Точность позиционирования АНПА в зависимости от количества используемых ДМО (от одного и более) составляет единицы-десятки метров.

Достоинством данного метода является возможность осуществления позиционирования без изменения глубины хода АНПА, а недостатками:

- необходимость предварительной установки ДМО вдоль маршрута АНПА, что является весьма затратной процедурой;
- ограничения по глубине моря в месте установки ДМО;
- ограничения по времени функционирования ДМО.

2. Позиционирование с использованием естественных геофизических полей (батиметрического, гравитационного и магнитного) [14]. Данный метод состоит в измерении текущих значений пространственных аномалий этих полей и их сопоставлении при помощи экстремально-корреляционных методов с предварительно измеренными аномалиями, привязанными к географическим координатам. Точность позиционирования данным методом составляет сотни метров-единицы километров.

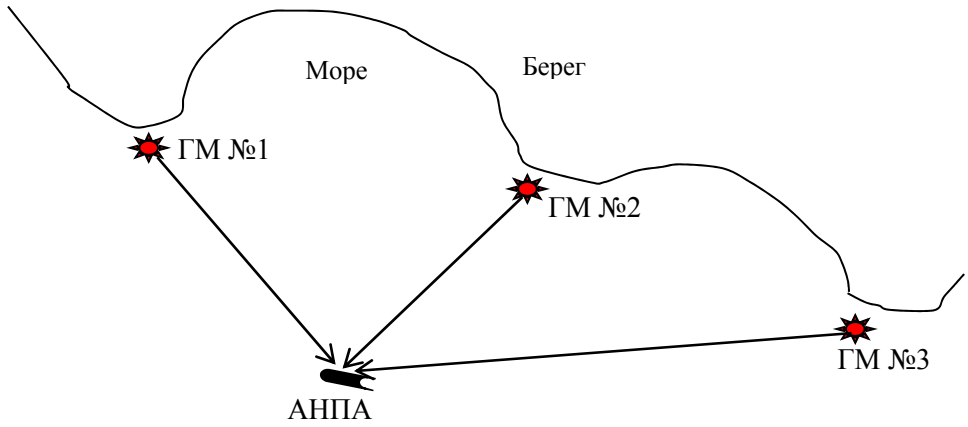


Рисунок 2 – Иллюстрация позиционирования АНПА с использованием технологии высокоточной подводной акустической дальнометрии

Достоинством данного метода является возможность скрытного позиционирования АНПА, а недостатками необходимость наличия:

– существенных аномалий используемых естественных геофизических полей в районе плавания;
– заранее составленных подробных карт этих аномалий;
– аппаратуры, позволяющей фиксировать аномалии с необходимой точностью.

3. Позиционирование с использованием пассивных подводных ориентиров (ППО). Данный метод идеологически аналогичен методу позиционирования с использованием ДМО, за исключением того, что вместо активных гидроакустических маяков используются расставленные в известных точках вдоль маршрута движения АНПА ППО, каждый из которых представляет собой установленное на некотором расстоянии от дна моря при помощи плавучести, якоря и якорь-троса звукоотражающее тело в форме всенаправленного уголкового отражателя из материала, имеющего высокий коэффициент отражения акустического сигнала на частотах работы типовых гидролокаторов АНПА. К ППО предъявляется основное требование – возможность их надёжного обнаружения и распознавания гидролокатором АНПА. Точность позиционирования с использованием ППО составляет десятки-сотни метров.

Достоинством данного метода позиционирования является возможность позиционирования АНПА без всплытия на поверхность, а недостатками – необходимость предварительного оборудования маршрута и ограничения по глубине моря. При этом следует заметить, что на сегодняшний день идея данного метода не доведена до практической реализации.

Методы позиционирования АНПА, путём оперативного оборудования их предполагаемого маршрута

К этим методам относятся:

1. Позиционирование с использованием сигналов мобильных РНС. Сущность этого метода состоит в оперативном оборудовании района плавания АНПА площадью до 100 тыс. км^2 мобильными передающими станциями РНС средневолнового диапазона частот, устанавливаемыми на морских судах либо на льду, равномерно расставленных по границе района плавания АНПА (рис.3). Точность позиционирования АНПА с использованием сигналов таких РНС составляет единицы-десятки метров.

Достоинством данного метода является возможность оборудования средствами высокоточного помехоустойчивого позиционирования морских объектов (в том числе АНПА) любого района Мирового океана (в том числе покрытого льдом), а недостатком – достаточно высокая стоимость, обусловленная необходимостью задействования на длительный срок, как минимум, трёх судов, оборудованных передающими станциями РНС.

2. Позиционирование с использованием радиогидроакустических буёв, называемых в зарубежной литературе GPS Intelligent Buoys или сокращённо GIBs [8]. Каждый буй по радиоканалу принимает сигналы СНС и транслирует их по гидроакустическому каналу. АНПА принимает эти сигналы и одновременно путём модемного обмена определяет расстояние до буя и его пеленг. Достоинствами данного метода является возможность высокоточного позиционирования АНПА без всплытия на поверхность, а недостатком – необходимость установки буёв вдоль маршрута АНПА. Причём, учитывая ограниченный заряд аккумулятора и возможность сноса течением, буи необходимо расставлять в процессе движения АНПА по маршруту.

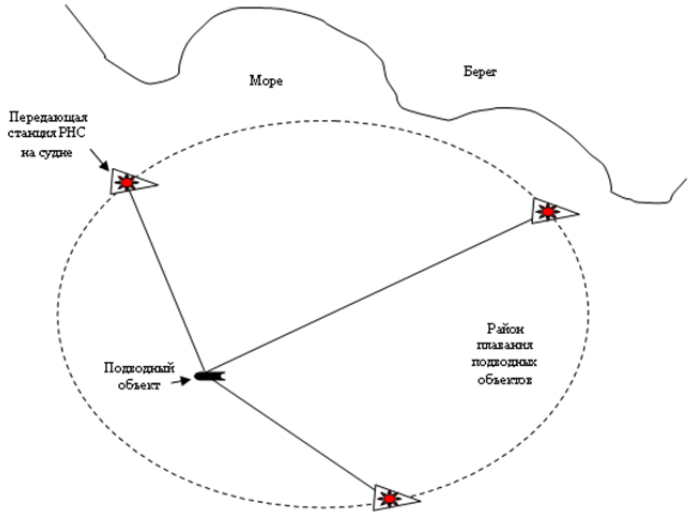


Рисунок 3 – Иллюстрация метода позиционирования АНПА с использованием мобильной РНС

Вариантом данного метода является оборудование подобным буем АНПА. Тогда вместо всплытия АНПА всплывать на поверхность для получения сигналов ГСНС будет привязной буй. В ряде случаев этот вариант может оказаться предпочтительным.

Из рассмотрения трёх групп методов позиционирования АНПА можно сделать вывод, что применение каждого из них зависит от многих факторов, ввиду чего необходима разработка и внедрение в СУ АНПА адаптивных алгоритмов выбора метода обсервации в сложившихся условиях с учётом многообразия факторов.

Сетевая подводная связь

Известно, что применение АНПА наиболее эффективно при их групповом использовании [1]. Необходимым условием группового использования АНПА является их оборудование средствами сетевой подводной (гидроакустической) связи (СПС). Специфическими техническими требованиями к СПС (и одновременно проблемными вопросами её реализации) являются [15]:

– обеспечение обмена данными одновременно между заранее непредсказуемым числом абонентов сети;

– высокоточное абсолютное либо относительное позиционирование абонентов в процессе обмена данными;

– обеспечение постоянной связности сети в сложных гидроакустических условиях путём создания оптимальных на текущий момент маршрутов передачи данных между каждой парой абонентов;

– ограничение массо-габаритных характеристик и стоимости сетевого оборудования.

Наземным аналогом СПС является сетевая радиосвязь. Но если последняя достаточно хорошо развита, то первая только делает начальные шаги. Обусловлено это как более поздней практической востребованностью СПС, так и множеством фундаментальных физических факторов, затрудняющих развитие СПС. К этим факторам относятся: существенно ограниченная полоса частот, которая может использоваться на практике для передачи сигнала, большое время распространения гидроакустического сигнала (скорость распространения на пять порядков меньше, чем у радиосигнала), реверберация связного сигнала большой интенсивности и длительности, образование протяжённых зон тени и замирания связного сигнала вследствие его многолучевого распространения, большие доплеровские искажения, быстрая изменчивость характеристик гидроакустической среды.

Для преодоления негативного влияния перечисленных факторов применительно к СПС разработаны методы и алгоритмы:

– формирования и обработки связного сигнала, обеспечивающие высокую помехоустойчивость передачи данных;

– управления доступом к среде с учетом специфики распространения гидроакустического сигнала;

– сетевой маршрутизации данных с учетом многолучёвости и временной изменчивости среды распространения;

– транспорта данных в условиях длительных задержек в их доставке и разрывов связности сети.

Но проблема состоит в том, что эффективность применения всех без исключения разработанных методов зависит от текущих гидроакустических условий и конфигурации сети. Ввиду этого для эф-

фективной реализации СПС СУ АНПА должна быть оснащена адаптивными алгоритмами выбора методов реализации СПС в сложившихся условиях. Разработка таких адаптивных алгоритмов, к тому же реализуемых без участия человека, представляет собой весьма нетривиальную задачу, поскольку, с одной стороны, они требуют учёта большого количества факторов, а, с другой стороны, они представляют собой решение многокритериальной задачи.

Эффективное применение АНПА для исследования и освоения Мирового океана существенно зависит от способности их системы управления принимать наилучшие решения в сложившейся обстановке, для чего система управления АНПА должна быть оснащена алгоритмами поддержки управленческих решений, базирующимися на технологиях искусственного интеллекта.

В работе рассмотрены пути интеллектуализации АНПА в обеспечение решения трёх задач, от решения которых во многом зависит успешное применение АНПА. Этими задачами являются:

1. управление АНПА, обеспечивающее достижение цели миссии в условиях возникновения нештатных ситуаций, а также преднамеренного и непреднамеренного противодействия;
2. подводная навигация, обеспечивающая выполнение миссии на больших удалениях от пункта базирования;
3. сетевая подводная связь, обеспечивающая групповое применение АНПА.

4. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 19-08-00253).

Авторы благодарят И.Г. Архипову и В.Н. Полиенко за ценные советы в части методов радионавигации.

Литература

1. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение /А.В. Инзарцев, Л.В. Киселев, В.В. Костенко, Ю.В. Матвиенко, А.М. Павин, А.Ф. Щербатюк. [отв. ред. Л.В. Киселев]. Владивосток: ИПМТ ДВО РАН. 2018. 368 стр.
2. Указ Президента РФ №490 от 10.10.2019г.
3. Борейко А.А., Инзарцев А.В., Машошин А.И., Павин А.М., Пашкевич И.В. Система управления АНПА большой автономности на базе мультиагентного подхода // Подводные исследования и робототехника, 2019,. №2 (28), с.23-31.
4. Procedural Reasoning System User's Guide. A Manual for Version 2.0. SRI International, 2001. (электронный документ) http://www.ai.sri.com/~prs/prs-manual.pdf
5. Городецкий В.И., Грушинский М.С., Хабалов А.В. Многоагентные системы (обзор) // Новости искусственного интеллекта, 1998, №2, с.64-116.
6. Ржевский Г.А., Скобелев П.О. Как управлять сложными системами? Мультиагентные технологии для создания интеллектуальных систем управления предприятиями. Самара: Офорт, 2015, 290 с.
7. Kinsey J.C., Eustice R.M., Whitcomb L.L. A Survey of Underwater Vehicle Navigation: Recent Advances and new Challenges // IFAC Conference on maneuvering and control of marine craft. – 2006, Lisbon, Portugal.
8. Кебкал К.Г., Машошин А.И. Гидроакустические методы позиционирования автономных необитаемых подводных аппаратов // Гироскопия и навигация. – 2016. – Т. 24, №3 (94). – С.115-130.
9. Малеев П.И. Проблемы средств навигации АНПА и возможные пути их решения // Навигация и гидрография. – 2015. – № 39. – С.7-11.
10. Каретников В.В., Миляков Д.Ф., Брянова Я.Д. Навигационное обеспечение Северного морского пути: функциональные дополнения ГНСС // Морская радиоэлектроника. – 2018. – №2 (64). – С.8-11.
11. Каретников В.В., Миляков Д.Ф., Брянова Я.Д., Сикарев А.А. Навигационное обеспечение Северного морского пути: проблемы и перспективы развития // Морская радиоэлектроника. – 2017. – №4 (62). – С.18-22.
12. Моргунов Ю.Н., Безответных В.В., Буренин А.В., Войтенко Е.А., Голов А.А**.** Экспериментальное тестирование технологии высокоточной подводной акустической дальнометрии // Акустический журнал. – 2018. – Т. 64, №2. – С.191-196
13. DARPA Broad Agency Announcement Positioning System for Deep Ocean Navigation (POSYDON). Strategic Technology Office, DARPA-BAA-15-30.
14. Степанов О.А., Торопов А.Б. Методы нелинейной фильтрации в задаче навигации по геофизическим полям // Гироскопия и навигация. – 2015. – №3. – С.102-125, 2015. – №4. – С.147-159.
15. Кебкал К.Г., Машошин А.И., Мороз Н.В. Пути решения проблем создания сетевой подводной связи и позиционирования // Гироскопия и навигация. 2019. Т. 27. №2 (105). С.106-135.

Л.А. Мартынова, Г.В. Конюхов, Т.А. Гриненкова, Г.А. Подшивалов, А.И. Стариков, А.В. Червинский, Н.И. Горбачев, С.А. Сырцов

МЕТОД СНИЖЕНИЯ ВНУТРИОТСЕЧНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург,
martynowa999@bk.ru, kongv1@yandex.ru,t_silina@bk.ru, 930730@mail.ru, alstarwar@yandex.ru, anton_ch007@mail.ru, n1ck-g1@yandex.ru, s-syrcov@mail.ru

Аннотация

Рассмотрена задача снижения влияния температуры окружающей среды внутри корпуса автономного необитаемого подводного аппарата на погрешность навигационных определений. Проведены исследования, направленные на оценку влияния токов потребления на повышение температуры внутри корпуса аппарата и на погрешность навигационных определений в ходе выполнения маршрутного задания. Разработан метод снижения внутриотсечной температуры, в основу которого положен предложенный эвристический алгоритм оптимального распределения потребителей по токопроводящим шинам. Для проведения численного эксперимента разработана имитационная модель движения аппарата с учетом использования потребителей и потребляемого ими тока на различных этапах маршрутной траектории. С использованием имитационной модели получены оценки влияния повышение температуры внутри корпуса аппарата на погрешность навигационных определений и вероятность успешного выполнения маршрутного задания. На численном примере показано, как результаты имитационного моделирования позволили сконфигурировать подключение потребителей по шинам так, чтобы обеспечить успешность выполнения маршрутного задания при минимальном количестве шин и источников тока.

Ключевые слова: автономного необитаемого подводного аппарата, навигационные определения, погрешность, вероятность, имитационная модель, численный эксперимент, токопровод.

L.A. Martynova, G.V. Konyukhov, T.A. Grinenkova, G.A. Podshivalov, A.I. Starikov, A.V. Chervinsky, N.I. Gorbachev, S.A. Syrtsov

METHOD FOR REDUCING INTRACERABLE TEMPERATURE AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE

JSC Concern Central Research Institute Elektropribor, St. Petersburg,
martynowa999@bk.ru, kongv1@yandex.ru,t_silina@bk.ru, 930730@mail.ru, alstarwar@yandex.ru, anton_ch007@mail.ru, n1ck-g1@yandex.ru, s-syrcov@mail.ru

Abstract

The problem of reducing the influence of ambient temperature inside the body of an autonomous underwater vehicle on the error of navigation definitions is considered. Studies have been conducted aimed at assessing the effect of consumption currents on increasing temperature inside the autonomous underwater vehicles and on the error of navigation definitions during the course task. A method has been developed to reduce the intra-cutoff temperature, which is based on the proposed heuristic algorithm for the optimal distribution of consumers over conductive conductor. To conduct a numerical experiment, a simulation model of the autonomous underwater vehicle movement was developed taking into account the use of consumers and the current consumed by them at various stages of the route trajectory. Using the simulation model, we obtained estimates of the effect of an increase in temperature inside the autonomous underwater vehicles body on the error of navigation definitions and the probability of successful completion of the route task. The numerical example shows how the results of simulation allowed to configure the connection of consumers via conductor so as to ensure the success of the route task with a minimum number of conductor and current sources.

Key words: autonomous underwater vehicle, navigation definitions, error, probability, simulation model, numerical experiment, conductor.

При движении автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) под водой для определения собственного местоположения в навигационной системе используется бортовая инерциаль-

ная навигационная система (БИНС), обладающая высокой степенью помехозащищенности и позволяющая в условиях длительного отсутствия корректирующей информации эффективно решать задачи ориентации и навигации [1]. Точность определения координат в БИНС зависит от ряда факторов, одним из которых является температура окружающей среды, оказывающая влияние на работу основных элементов БИНС – гироскопа и акселерометров. Превышение температуры допустимых норм приводит к возникновению помех в работе БИНС [2], в результате чего у АНПА возникает погрешность вычисления координат собственного положения [3]. В связи с этим необходимо поддержание температуры внутри корпуса АНПА на требуемом уровне. При проектировании и разработке сложного АНПА, аналогичного, например, Orca XLUUV (США) [4], причинами, приводящими к повышению температуры внутри корпуса АНПА, являются использование гибридной системы энергообеспечения и распределения электроэнергии (СЭОиРЭ) с несколькими разнородными источниками электропитания, работающими на различных физических принципах и вероятное превышение токов в токопроводах их номинальных значений.

Последнее связано с тем, что в таком сложном АНПА количество потребителей многократно превышает аналогичные показатели типовых АНПА. Соответственно, потребляемые токи – также возрастают, логико-временная последовательность работы приборов подсистем АНПА и их токопотребление в зависимости от различных условий – усложняется. Из-за отсутствия теплоотводов происходит нагревание окружающей среды в замкнутом внутриотсечном помещении, в котором находится БИНС. В связи с этим подключение различных источников тока и всех потребителей к токопроводам (так называемым шинам) без специального анализа токов приводит, как показали исследования, к возникновению помех работе навигационного комплекса. Решение проблемы путем увеличения номинального тока шины приводит к повышению ее массогабаритных характеристик. Увеличение же количества источников тока для запитывания каждой шины также приводит к повышению внутриотсечной температуры.

В связи с этим возникает задача оценки необходимого количества шин на основе рационального распределения подключения потребителей к шинам и оценки превышения токов номинальных значений шин в различных условиях выполнения АНПА маршрутного задания.

Решение подобной задачи в прикладных областях, не связанных с автономной робототехникой, не представляет большого труда из-за отсутствия жестких ограничений на массогабариты. В то же время применительно к морской робототехнике в отечественной и зарубежной литературе публикации практически отсутствуют из-за новизны технического решения, связанного с применением гибридной системы энергообеспечения и распределения электроэнергии (СЭОиРЭ) на борту АНПА. В этих работах либо отражены химические процессы, протекающие в одном из видов источника тока, либо обсуждается использование гибридной СЭОиРЭ на обитаемом подводном объекте [5]. В зарубежных источниках, например в [6], уделено достаточно внимания особенностям использования гибридных СЭОиРЭ на борту АНПА, однако детали принятых технических и алгоритмических решений не раскрываются.

Цель работы: обеспечить работу СЭОиРЭ так, чтобы минимизировать повышение температуры внутри корпуса АНПА выше допустимой и, тем самым, снизить погрешности навигационных определений.

Влияние температуры на погрешности навигационных определений

Основным источником навигационных определений АНПА является БИНС. Основными чувствительными элементами БИНС являются измерители ускорения (акселерометры) и гироскопы, служащие для задания на АНПА системы отсчета и определяющие углы поворота и наклона подвижного АНПА. Одним из основных типов гироскопов, применяемых для построения БИНС в настоящее время, является волоконно-оптический гироскоп [7].

На рис. 1 показано изменение выходного сигнала волоконно-оптического гироскопа (ВОГ) в БИНС под действием переменных внешних тепловых воздействий, искусственно созданных в термокамере [2].

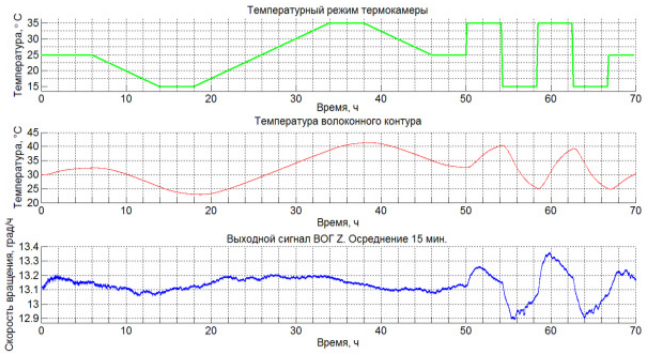


Рисунок 1 – Влияние внешних температурных возмущений на выходной сигнал гироскопа в БИНС

Из результатов, приведенных на рис.1 следует, что при резких ступенчатых изменениях температуры окружающей среды в диапазоне от 15°С до 35°С разница между максимальным и минимальным значением скорости вращения, регистрируемой гироскопом, превышает 0,45°/ч. Учитывая, что для использования в БИНС необходимы гироскопы с точностью не хуже 0,01°/ч, результаты, приведенные на рис. 1, подтверждают высокую чувствительность ВОГ к резким перепадам температур окружающей среды и необходимость снижения этого влияния.

На работу акселерометров, входящих наряду с гироскопами в состав БИНС и используемых для навигационных определений положения АНПА, повышение температуры также оказывает воздействие. Так, в [8] приведены графики смещения нуля и масштабных коэффициентов в зависимости от температуры (на рис. 2 обозначены линией синего цвета с цифрой «1»).

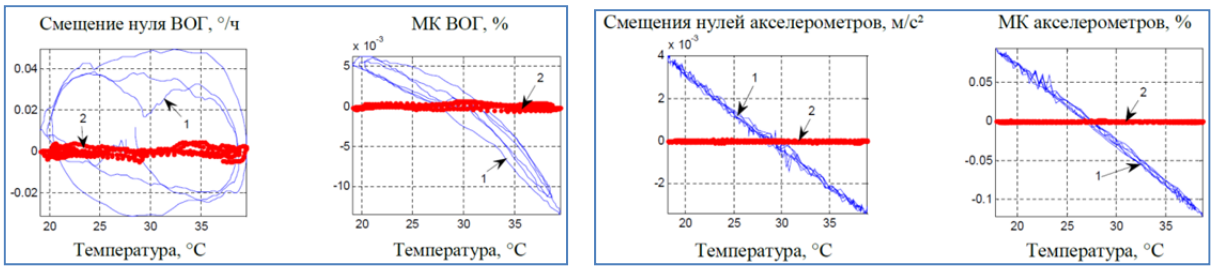


Рисунок 2 – Зависимость смещения нуля и масштабных коэффициентов ВОГ и акселерометров от температуры (1 – исходная зависимость)

Из результатов, приведенных на рис. 1-2, видно, что температура оказывает влияние на результаты измерений основополагающих параметров гироскопов и акселерометров. В свою очередь, влияние повышения температуры на работу гироскопов и акселерометров, являющихся основными элементами БИНС, приводит к возникновению погрешностей навигационных определений. Так, в [8] приведены результаты влияния нагревания на погрешности навигационных определений БИНС – широту, долготу и соответствующие проекции скорости (на рис. 3 кривая синего цвета, помеченная цифрой «1»).

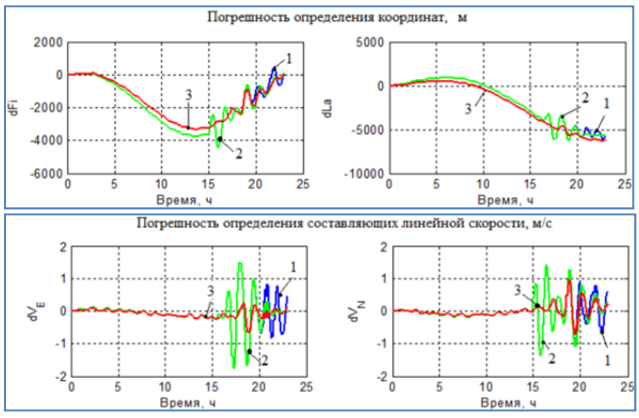


Рисунок 3 – Погрешности определения навигационных параметров (1 – традиционная калибровка)

На графиках рис. 3 на участке (15-24 ч) при качании платформы стенда, на которой был установлен гироскоп, видно, что погрешность определения составляющих линейной скорости достига-

ет 1,8 м/с. По графику погрешности определения северной составляющей линейной скорости, приведенном на рис. 4, видно, что погрешность достигает 4,3 м/с.

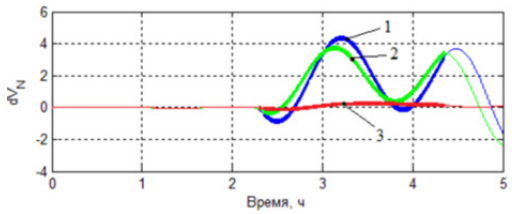


Рисунок 4 – Погрешность определения северной составляющей линейной скорости (1 – традиционная калибровка)

Все приведенные результаты проиллюстрировали степень влияния температуры на погрешности навигационных определений БИНС. Поэтому в современной гироскопии важной и актуальной задачей является обеспечение тепловых режимов гироскопов и навигационных систем на их основе.

Традиционными способами снижения влияния тепловых эффектов на точность показаний волоконно-оптических гироскопов являются [2]:

- конструктивные меры по усовершенствованию технологий изготовления отдельных узлов и компонентов самого гироскопа или расположения элементов в БИНС;
- температурная компенсация ВОГ, которая заключается в применении специальных алгоритмов для корректировки выходного сигнала гироскопа, находящегося под действием тепловых воздействий;
- термостатирование и тепловая защита как БИНС в целом, так и непосредственно ВОГ в частности.

Однако все эти способы могут оказаться бесполезными, если температуры окружающей среды, в которой расположена БИНС, окажется значительно выше допустимых норм.

В связи с этим в настоящей работе предложен еще один метод снижения теплового влияния на навигационную систему, связанный со снижением температуры внешней среды вокруг БИНС за счет более рационального подключения потребителей электроэнергии к шинам и оценкой влияния превышения токов номинального значения в ходе выполнения АНПА маршрутного задания.

Постановка задачи

В ходе движения по маршрутной траектории положение АНПА постоянно корректируется путем использования как основных исполнительных устройств – маршевого движителя и кормовых рулей, так и дополнительных. К дополнительным исполнительным устройствам относятся носовые рули, подруливающие устройства и уравнительно-дифференртная система. Как основные, так и дополнительные исполнительные устройства, обеспечивающие движение АНПА, потребляют электроэнергию. Кроме того, работают приборы и устройства других подсистем, обеспечивающих так называемые «нужды АНПА» – навигационные, освещения обстановки, гидроакустической и радиосвязи, аварийной и т.д. Так, например, в зоне повышенной опасности движению АНПА включается активный режим гидроакустической системы освещения обстановки, являющийся достаточно энергоемким потребителем, при проведении сеанса радиосвязи происходит всплытие АНПА и включение подсистемы радиосвязи и т.д. В результате оказывается, что периодически к шинам подключаются/отключаются различные приборы подсистем АНПА. Заранее точно прогнозировать подключение потребителей к шинам невозможно из-за непредсказуемости внешних и внутренних условий, поэтому и превышение тока на каждой шине также прогнозировать невозможно. В связи с этим возникает задача на этапе предстартовой подготовки так сконфигурировать использование источников тока и распределение подключения потребителей к шинам, чтобы в наиболее энергоемких ситуациях в ходе выполнения маршрутного задания повышение температуры в корпусе АНПА был наименьшим, а период времени повышения температуры был минимальным.

Задачу оптимального распределения потребителей по шинам представим в формализованном виде.

Пусть состояние гибридной СЭОиРЭ определяется количеством задействованных шин y_i , i=1,...,n и количеством подключенных потребителей a_{ij} , j=1,...,n к определенным шинам, i – номер шины, j – номер потребителя на i-ой шине, n – количество потребителей, характеризуемых током потребления.

Необходимо надо найти целое число шин B и разбиение множества $\{1,\ldots,n\}$ на B подмножеств $S_1 \cup \ldots \cup S_B$ таких, что $\Sigma a_i \le V_k \ \forall k=1,\ldots,B$. где k обозначает различные типы источников тока, определяющих ограничения по току той шины, к которой данный тип подключен. Решение называется оптимальным, если B минимально. Тогда представим задачу распределения потребителей по шинам как задачу целочисленного программирования [15]:

$$\text{Минимизировать } B = \sum_{i=1}^{n} y_i \tag{1}$$

при ограничениях

$$\sum_{j=1}^{n} a_j x_{ij} \le V_k y_i, \forall i \in \{1,.....,n\}, \text{ k}\in \{1,\ldots,\text{K}\} \tag{2}$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_{ij} = 1, \forall j \in \{1,.....,n\} \tag{3}$$

$$y_i \in \{0;1\}, \quad \forall i \in \{1,.....,n\} \tag{4}$$

$$x_{ij} \in \{0;1\}, \quad \forall i \in \{1,.....,n\} \quad \forall j \in \{1,.....,n\} \tag{5}$$

где y_i =1, если используется шина i и x_{ij} =1, если потребитель j подключен к шине i.

Из условия задачи следует, что задействовано в общем случае n источников тока, то есть, по крайней мере, каждому потребителю гарантировано подключение к свободной шине без превышения номинального тока этой шины.

Решение задачи рационального распределения потребителей по шинам

Для решения поставленной задачи предлагается эвристический алгоритм, основанный на жадном алгоритме, в котором на каждом шаге делается локально наилучший выбор в предположении, что итоговое решение будет оптимальным. Разработанный эвристический алгоритм основан на одном из приближённых полиномиальных алгоритмов Best Fit Decreasing (BFD), означающем «наилучший подходящий по убыванию». Алгоритм заключается в том, что потребителей упорядочивают по невозрастанию потребляемого тока и последовательно подключают к шине, у которой после подключения останется наименьший свободный ресурс.

Распределение потребителей по шинам с использованием алгоритма BFD в рассматриваемой задаче выглядит следующим образом:

1. сортируем шины в порядке убывания токов, создаваемых источниками токов, подсоединенных к этим шинам;
2. сортируем потребителей в порядке убывания потребляемого ими тока;
3. берем самую большую по проходящему току шину из имеющихся;
4. берем самого большого по потребляемому току потребителя из имеющихся;
5. анализируем:

- если потребитель может быть подключен к выбранной шине, то его подключаем и переходим к п. 4);
- если потребитель не может быть подключен к выбранной шине, то берем следующего за ним потребителя из множества потребителей и переходим к п. 5);
- если в результате полного перебора потребителей не нашлось ни одного из них, меньшего свободного ресурса, то переходим к п. 3).

Процесс завершается тогда, когда все потребители оказываются в состоянии подключения к шинам.

Решение задачи рационального распределения происходит на этапе предстартовой подготовки АНПА с прогнозированием различных вариантов подключения. Для этого необходимо получение зависимости повышения температуры от превышения тока потребителей, подключенных к шине, ее номинального значения. Второе, что необходимо – это получение оценки задействования потребителей в ходе выполнения маршрутного задания, и влияния различных условий, возникающих в процессе выполнения маршрутного задания, на результативность его выполнения.

Оценка влияния потребляемого тока на температуру в корпусе АНПА

Получение оценки влияния времени и уровня превышения токов номинального значения шины на температуру внутри корпуса АНПА позволит спрогнозировать погрешность навигационных определений. Для оценки влияния превышения тока потребителей, подключенных к одной шине, номинального ее тока – на температуру окружающей среды, воспользуемся следующим выражением [9]:

$$\Theta = \frac{I^2 \cdot R_a}{K \cdot F} \cdot \left(1 - e^{-\frac{K \cdot F}{G \cdot c} \cdot t}\right) \quad (6)$$

где Θ – перегрев, равный превышению температуры шины по отношению к окружающей среде, °С; I – действующее значение силы тока потребителей, подключенных к шине, А; R_a – активное сопротивление шины, Ом; G – вес шины, кг; c – удельная теплоемкость материала шины, Дж/кг·°С; K – общий коэффициент теплоотдачи, учитывающий все виды теплоотдачи, Вт/м^2 °С; F – поверхность охлаждения шины, м^2; t – текущее время, с.

Из выражения (6) видно, что все характеристики, кроме тока I и времени t, являются неотъемлемой характеристикой шины – материалов, конструкции. При подключении новых потребителей меняется ток I: чем больше потребителей, тем больше ток, и тем выше температура во внутриотсечном помещении. В то же время чем дольше время превышения токов, тем выше температура во внутриотсечном помещении АНПА. Как следует из выражения (6), повышение температуры с течением времени происходит по экспоненциальной кривой, зависимость от тока носит квадратичный характер.

Оценка потребляемого тока на различных этапах выполнения маршрутного задания

Потребляемый ток зависит от состава потребителей, который, в свою очередь, зависит от текущей обстановки, возникающей в ходе выполнения маршрутного задания. Поэтому для оценки потребления тока на различных этапах выполнения маршрутного задания рассматривалось движение АНПА в зоне повышенной опасности, связанной с периодическим возникновением препятствий, которые АНПА необходимо огибать. Для огибания АНПА приходилось использовать дополнительные исполнительные устройства – потребители тока. Несмотря на то, что на этапе предстартовой подготовки маршрут строится в обход опасных зон, в ходе выполнения маршрутного задания возможны отклонения АНПА от заданной маршрутной траектории, вызванные течением или погрешностью навигационных определений, в результате чего происходило непроизвольное попадание АНПА в зону повышенной опасности.

Для оценки потребляемого тока специально разработана имитационная динамическая модель движения АНПА. На стартовом этапе запуска АНПА задавались целевая скорость движения АНПА и целевая глубина. По ним с использованием регуляторов движения и текущего состояния АНПА определялись текущие параметры исполнительных устройств движения АНПА. В зависимости от используемых исполнительных устройств определялся состав и количество потребителей и оценивалось их токопотребление и распределение их подключений к шинам. При прямолинейном движении АНПА задействованы основные исполнительные устройства движения – маршевый движитель и кормовые рули. Также учитывалось потребление тока остальными системами АНПА – навигационной, освещения обстановки при использовании активного режима, гидроакустической связи. При вхождении АНПА в зону повышенной опасности возникала необходимость включения активного режима гидроакустической системы освещения обстановки (ГАПОО) и дополнительно – подруливающих устройств для повышения маневренности АНПА по курсу и по глубине. Вновь подключенные к шинам устройства увеличивали потребляемый ток, что приводило к нагреванию внутриотсечного помещения.

По итогам моделирования были получены результаты потребления АНПА на различных этапах выполнения маршрутного задания, которые позволили оценить наиболее энергоемкие участки маршрутной траектории. Такие участки возникали при маневрировании АНПА для обхода препятствия практически на минимально возможной скорости при использовании активного режима средств освещения обстановки и гидролокатора бокового обзора, а также наиболее энергоемких исполнительных устройств движения – подруливающих устройств (горизонтальных и вертикальных) и уравнительно-дифферентной системы. По результатам эксперимента при подключении дополнительных устройств были получены превышения токов по отношению к стартовому состоянию токопотребления и время превышения в виде диапазона от t_{min} до t_{max},с использования дополнительных устройств.

Однако полученные результаты не давали ответ на вопрос о критичности их влияния на погрешность определения местоположения АНПА. В связи с этим на следующем этапе исследований оценивалось влияние повышения токов и длительности их повышения на результативность выполнения маршрутного задания.

Оценка влияния повышения токов и длительности повышения на успешность выполнения маршрутного задания

Для оценки влияния повышения токов и длительности их повышения на успешность выполнения маршрутного задания рассматривался тот же тактический эпизод движения АНПА в зоне повышенной опасности. Для этого на этапе предстартовой подготовки с использованием разработанного в настоящей работе эвристического алгоритма определялось рациональное подключение потребителей к шинам с учетом увеличения количества потребителей при входе в зону повышенной опасности. Затем, при входе АНПА в зону повышенной опасности оценивалось превышение токами дополнительных устройств – номинальных значений шин. По результатам моделирования движения АНПА оценивались токи задействованных потребителей, рассчитывалось суммарное превышение потребляемым током номинального значения, затем по формуле (9) оценивалось повышение температуры во внутриотсечном помещении. После этого с использованием данных из [8] и с учетом того, что при маневрировании для огибания препятствий происходило качание корпуса АНПА и, соответственно, БИНС, оценивалась погрешность навигационных определений. Полученные данные использовались при оценке отклонения АНПА от заданной маршрутной траектории. В результате движения АНПА происходило накопление ошибки навигационных данных с течением времени, в результате чего АНПА все дальше и дальше удалялся от маршрутной траектории, и в результате прибывал в конечную точку маршрута с некоторой погрешностью.

По результатам анализа полученной погрешности принималось решение: если погрешность прибытия АНПА в конечную маршрутную точку оказалась в пределах заданной, то принималось, что выполнение маршрутного задания прошло успешно. В противном случае для снижения температуры в отсеке требовался пересмотр количества и состава используемых источников тока, и соответствующая реконфигурация подключенных к шинам потребителей.

Для получения количественных оценок влияния потребляемых токов и распределения потребителей по шинам на успешность выполнения маршрутного задания были проведены численные эксперименты. Поскольку детальные причины изменения части параметров заранее неизвестны, то их значения принимались случайными из диапазонов их изменений. Такими случайными параметрами являлись: положения и моменты появления препятствий; используемых исполнительных устройств при маневре для обхода препятствий; потребляемые токи; время, в течение которого были повышенные токи; отклонения показаний БИНС, зависящие от температуры внутри отсека. Появление и положение препятствий определялись плотностью их нахождения в рассматриваемом районе. Плотность нахождения препятствий оказывала влияние на частоту использования дополнительных устройств-потребителей тока и продолжительность подключения дополнительных устройств к шинам.

С учетом результатов, полученных на предыдущем этапе исследований, рассматривались различные варианты подключения потребителей к шинам, оказывающие влияние на превышения номинальных токов по уровню и по времени, которое определялось характером подключения потребителей и тактической ситуацией. Было рассмотрено три варианта подключения потребителей к шинам: в первом варианте все новые потребители подключались к единственной имеющейся одной и той же шине (вариант 1). Во втором варианте для активного режима освещения обстановки была предоставлена отдельная дополнительная шина (вариант 2). В третьем варианте исполнительные устройства движения, освещения обстановки, а также навигация, радиосвязи и гидроакустической связи – были подключены к разным трем шинам (вариант 3). Полученные результаты нагревания внутриотсечного помещения в зависимости от варианта подключения потребителей к шинам представлены в виде графических зависимостей (рис. 5). Каждый вариант характеризовался превышением токами номинального значения шины и временем этого превышения.

На рис. 5 по горизонтальной оси отложено время превышения номинальных токов, по вертикальной – повышение температуры внутриотсечного помещения в нормированном виде относительно допустимого значения. Варианты подключений обозначены: первый вариант – пунктирной линией, второй вариант – штрихпунктирной линией, третий вариант – сплошной линией. Как видно из рис. 5, в варианте 1 превышение тока номинального значения произошло практически в 2 раза.

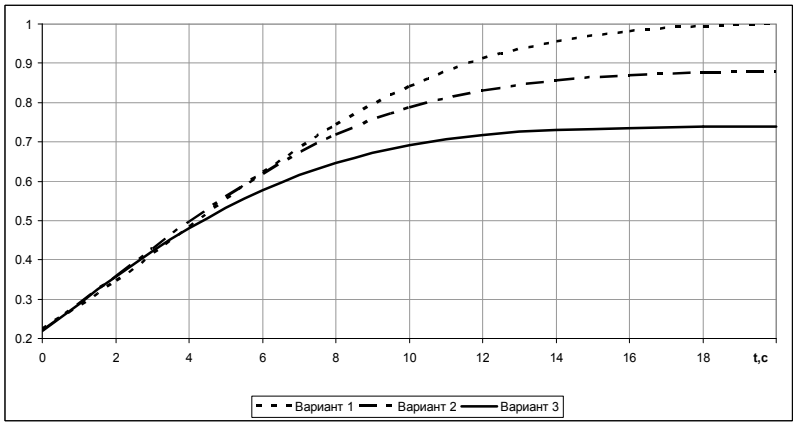


Рисунок 5 – Повышение температуры с течением времени для различных вариантов подключений потребителей к шинам

В ходе проведения численного эксперимента движение АНПА осуществлялось в зоне повышенной опасности с учетом маневрирования по курсу и по глубине со скоростью из диапазона от $V_{\min}$ до $V_{\max}$. В ходе движения АНПА равновероятно разыгрывался момент появления препятствия, которое АНПА необходимо было обогнуть, изменив курс и глубину, для чего включались подруливающие устройства и носовые рули, а также использовалась уравнительно-дифферентная система. Длительность использования дополнительных устройств также разыгрывалась равновероятно из диапазона от $t_{\min}$ до $t_{\max}$ с, полученного на предыдущем этапе исследований. В момент выхода АНПА из зоны повышенной опасности происходило выключение дополнительных потребителей, и, соответственно, снижение внутриотсечной температуры.

Оценка отклонения погрешности прибытия АНПА относительно положения конечной маршрутной точки и вероятность успешности выполнения маршрутного задания осуществлялись по методу статистических испытаний (методу Монте-Карло). Для этого проводилась серия испытаний, оценивалась результативность каждого испытания, и затем по результатам серии испытаний рассчитывалась вероятность успешного выполнения маршрутного задания как отношение количества результативных испытаний к нерезультативным. Испытание считалось результативным, если АНПА по завершении маршрутного задания прибывал в конечную маршрутную точку с погрешностью в пределах заданной. Протяженность моделируемого маршрута составляла 50 км. Проводилось три серии испытаний, отличающихся подключениями потребителей к шинам, и характеризующихся зависимостями, приведенными на рис. 5. По результатам имитационного моделирования получены оценки отклонения ΔR АНПА от заданной конечной точки маршрута, которые приведены на рис. 6 слева.

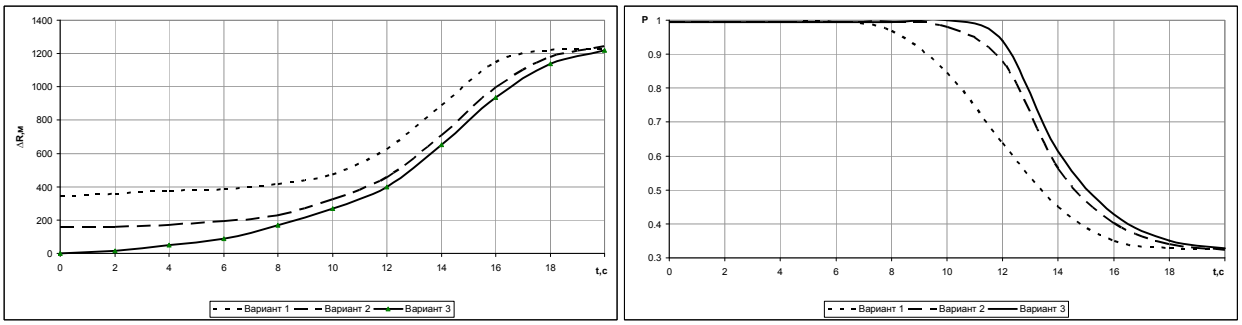


Рисунок 6 – Зависимость погрешности навигационных определений с течением времени (слева) и соответствующей вероятности успешности выполнения маршрутного задания (справа)

На рис. 6 обозначены: первый вариант – пунктирной линией, второй вариант – штрихпунктирной линией, третий вариант – сплошной линией. Результаты, представленные на рис. 6, показали, что с течением времени характер зависимости – нелинейный, и в течение первых примерно 10 часов хода АНПА результаты из-за нагревания в корпусе АНПА увеличиваются незначительно. Однако после 10 часов хода возникает резкий подъем погрешности определения навигационных параметров. Полученные результаты свидетельствуют о том, что при непродолжительном движении – до 10 часов в зоне повышенной опасности – погрешность навигационных определений хоть и существует, и она незначительна и стабильна. Особенно ярко это проявляется в третьем варианте

подключения потребителей к разным трем шинам, при котором погрешность минимальна. Это значит, что если маршрутное задание предполагает до 10 часов движения в опасной зоне, то, скорее всего, нет необходимости менять подключения потребителей на этапе предстартовой подготовки. Однако если длительность движения в опасной зоне запланирована свыше 10 часов, то целесообразно подключить потребителей «с запасом» по превышаемым токам. Вариант рационального подключения потребителей к шинам будет ориентироваться на наиболее полное использование исполнительных устройств в процессе преодоления опасной зоны. В результате получится, что перед входом АНПА в опасную зону шины окажутся недозагруженными, однако в ходе преодоления опасной зоны погрешность навигационных определений будет сохраняться в пределах допустимой. Результаты, приведенные на рис. 6, свидетельствуют также о том, что при планировании длительности хода в опасной зоне свыше 14 часов необходимо пересмотреть подключения: рассмотренные три варианта не удовлетворяют требованиям по погрешности навигационных определений, поэтому необходимо ввести дополнительные источники тока, и часть потребителей переключить на эти дополнительные источники тока.

Полученные результаты использовались для расчета вероятности успешности выполнения маршрутного задания, выраженной отклонением положения АНПА в момент окончания маршрутного задания от заданной конечной точки маршрута. Полученные результаты по вероятности позволяли получить ответ на вопрос об использовании текущего подключения, исключающего перегрев и увеличение погрешностей навигационных определений. Для этого задавалось пороговое значение вероятности, равное, например, 0,8, что традиционно принимается как критерий принятия решения. По результатам численных экспериментов делались выводы относительно рациональности использования шин и подключения к ним потребителей. Если вероятность оказывалась ниже заданного порогового значения, то принималось решение об изменении конфигурации подключения потребителей к шинам с учетом предложенного алгоритма подключения. В случае же превышения заданного порогового значения принималось, что маршрутное задание будет успешно выполнено при текущем состоянии подключения потребителей к шинам.

Зависимость вероятности успешности выполнения маршрутного задания от повышения температуры во внутриотсечном помещении приведена на рис. 6 справа. Из результатов, представленных на рис. 6 справа, видно, что до 10 часов хода в опасной зоне вероятность успешности выполнения маршрутного задания не ниже 0,8, однако после 10 часов хода с течением времени вероятность падает, и в этом случае необходимо на этапе предстартовой подготовки переключить потребителей к шинам по варианту 3. Тогда в этом случае вероятность успешности выполнения маршрутного задания повысится на 0,3 и в результате превысит требуемый уровень 0,8.

Таким образом, результаты проведенных исследований показали степень влияния подключений потребителей на предстартовом этапе – на результат выполнения маршрутного задания. Это позволяет заранее предусмотреть вариант подключения потребителей по шинам, чтобы минимизировать повышение температуры и длительность ее повышения, обеспечивающие в конечном итоге успешность выполнения маршрутного задания.

Для снижения погрешности навигационных определений проведены исследования, направленные на оценку влияния повышения температуры внутри корпуса АНПА на погрешности навигационных определений. На основании этих оценок, а также токов потребления в ходе выполнения АНПА маршрутного задания, получены оценки повышение температуры внутри корпуса АНПА на различных этапах выполнения маршрутного задания. Полученные результаты позволили специально разработать метод, в основу которого положен разработанный эвристический алгоритм оптимального распределения потребителей по токопроводящим шинам. Для проведения оценок по токопотреблению на различных этапах выполнения маршрутного задания была разработана имитационная модель движения АНПА по маршрутной траектории с учетом использования потребителей и потребляемого ими тока. Полученные результаты и разработанная имитационная модель были использованы для проведения исследований, направленных на оценку успешности выполнения маршрутного задания, заключающегося в прибытии АНПА в конечную точку маршрута с погрешностью в пределах заданной. На численном примере показано, как результаты имитационного моделирования позволили сконфигурировать подключение потребителей по шинам так, чтобы обеспечить успешность выполнения маршрутного задания при минимальном количестве шин и источников тока.

Результаты были получены при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект №20-08-00130).

Литература

1 Пешехонов В.Г. Современное состояние и перспективы развития гироскопических систем // Гироскопия и навигация 2011 №1 с.3-17

2 Громов Д.С. Тепловая защита и термостабилизация волоконно-оптических гироскопов. Дис. на соиск. уч.ст. канд.ртехн. наук. 2014. с.22-23, 134 с.

3 Драницына Е.В. Снижение влияния изменения температуры на выходной сигнал волоконно-оптического гироскопа / Е.В. Драницына [и др.] // Гироскопия и навигация. – 2012. – № 4 (79). – С. 10–20.

4 Orca Extra Large Unmanned Undersea Vehicles (XLUUVs). Электронный ресурс https://www.globalsecurity.org/military/systems/ship/xluuv.htm. (Дата обращения 29.03.2020).

5 Никифоров Б.В. Батрак Д.В., Чигарев А.В., Игнатьев К.Ю. Электроэнергетическая система для перспективных неатомных подводных лодок. Патент RU № 2534470. 2014. 6 с.

6 Lee B., Park P., Kim C. Power Managements of a Hybrid Electric Propulsion System Powered by Solar Cells, Fuel Cells, and Batteries for UAVs. https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007%2F978-90-481-9707-1_115. (accessed 19.04.2020).

7 Кузовков Н. Т., Салычев О. С. Инерциальная навигация и оптимальная фильтрация. – М.: Машиностроение, 1982. – 216 с.

8 Драницына, Е.В. Калибровка измерительного модуля прецизионной бинс на волоконно-оптических гироскопах. Дис. на соиск. уч.ст. канд.ртехн. наук. 2016. Санкт-Петербург. с.22-23, 89 с.

9 Нагрев токоведущих частей при длительном протекании тока. Электронный ресурс: http://electricalschool.info/main/visokovoltny/1125-nagrev-tokovedushhikh-chastejj-pri.html. (Дата обращения 19.04.2020).

Е.И. Абрамова, А.А. Кошурина, М.С. Крашенинников

РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ОПЕРАТИВНОЙ ЛИКВИДАЦИИ АВАРИЙНЫХ РАЗЛИВОВ НЕФТЕПРОДУКТОВ НА АРКТИЧЕСКОМ ШЕЛЬФЕ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (НГТУ), г. Нижний Новгород, nntu@nntu.ru, lccm@list.ru, allakoshurina@yandex.ru.

Аннотация

Ликвидация аварийных разливов нефти (ЛАРН) на территории арктического шельфа затруднена из-за сложных климатических условий, отсутствует оборудование для круглогодичных работ. ЛАРН негативно сказывается на состоянии особо охраняемых природных территорий, примыкающих к нефтегазоносным районам. Коллективом лаборатории композиционных и керамических материалов с применением к арктическим транспортным средствам предложена разработка робототехнического комплекса быстрого реагирования на чрезвычайные ситуации. В основе проекта – носитель на воздушной подушке, на который можно устанавливать различное оборудование. Так же разработано технологическое оборудование и спроектирован контейнер с необходимыми средствами ликвидации разливов нефти. Разработанный комплекс на СВП имеет возможность установки различного оборудования для ликвидации разливов нефти до 50 м^3 в арктических условиях на морских акваториях, покрытых дрейфующим льдом в зоне предельного мелководья, где применение судовых технических средств с большой осадкой для механического сбора нефти невозможно.

Ключевые слова: ликвидация аварийных разливов нефти, ЛАРН, робототехника, транспорт, Арктика.

E.I. Abramova, A.A. Koshurina, M.S. Krasheninnikov

FAST LIQUIDATION ROBOTIC COMPLEX OF EMERGENCY OIL SPILLS ON THE ARCTIC SHELF

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev (NNSTU), Nizhny Novgorod, nntu@nntu.ru, lccm@list.ru, allakoshurina@yandex.ru.

Abstract

Oil spill response (OSR) on the Arctic shelf is difficult because of the climatic conditions. There is no technology for year-round work; specially protected natural areas near oil-and-gas-bearing areas are deteriorating. The team of laboratory of composite and ceramic materials (LCCM) has developed a robotic complex emergency response. The project based on an air-cushion vehicle with various types of equipment. Besides, we developed a technological equipment and a container with the necessary mechanisms for oil spill response. The presented complex has the ability to install various equipment for the elimination of oil spills up to 50 m^3 in Arctic conditions in sea areas covered with drifting ice in the zone of extreme shallow water, where is impossible to use shipboard technical equipment.

Key words: oil spill response, OSR, robotics, transport, Arctic.

Четверть нефтяных и половина газовых запасов России сосредоточена на шельфе вдоль арктического побережья – на территории, где ликвидация разливов нефти существенно затруднена из-за климатических условий. Особенности этой территории требуют от оборудования для ликвидации аварийных разливов нефти способности работать при температурах до -50°С, а от транспортных средств, дополнительно, амфибийности и быстроходности. Участки крупнейших нефтедобывающих компаний примыкают к особо охраняемым природным территориям (Большой арктический и Таймырский заповедники, национальный парк «Русская Арктика» и пр.). Это повышает экологические риски и служит предпосылкой к разработке арктических средств ЛАРН.

Так как сжигание и диспергирование в России запрещено, возможен только механический способ ликвидации нефтяных разливов. Существующие технические решения для средних широт России рассчитаны на небольшой диапазон температур и не предназначены для Арктики. Страны Арктического совета предлагают ограничить время буровых операций в нефтегазоносных районах периодом, когда буровая установка и связанные с ней системы реагирования на разливы нефти

способны ликвидировать последствия аварии в арктических условиях. Выходом из сложившейся ситуации может стать не модернизация существующей техники, а проектирование специализированной техники для арктических климатических условий.

Предпосылки реализации проекта складываются из проблем и барьеров на рынке техники нефтегазодобывающей промышленности, среди которых необходимость повышения экологической безопасности, защита охраняемых природных территорий, сложные климатические условия и узкий временной диапазон для ведения работ ЛАРН.

Для решения задачи оперативной ликвидации аварийного разлива нефти в Арктике коллективом лаборатории композиционных и керамических материалов с применением к арктическим транспортным средствам LCCM был предложен настоящий проект.

В рамках реализации проекта «Робототехнический комплекс оперативной ликвидации аварийных разливов нефтепродуктов на Арктическом шельфе» выполнен аван-проект, изготовлен макет носителя и проведена разработка технологического оборудования для арктического шельфа. В качестве носителя оборудования выбрано экологически безопасное судно на воздушной подушке (СВП), которая позволяет развивать скорость до 100 км/ч и проводить работы на мелководье. Использование воздушной подушки позволит ускорить процесс доставки оборудования к месту аварии и увеличить временной диапазон в году, когда возможно проведение работ по ликвидации разливов нефти.

Представленный комплекс на СВП (см. рис. 1-3) имеет возможность установки различного оборудования для ликвидации разливов нефти до 50 м^3 в арктических условиях на морских акваториях, покрытых дрейфующим льдом в зоне предельного мелководья (0-10 м), где применение судовых технических средств с большой осадкой для механического сбора нефти невозможно.

Рисунок 1 – 3D-модель СВП с оборудованием ЛАРН в контейнере

Рисунок 2 – 3D-модель СВП с ковшовым нефтесборщиком

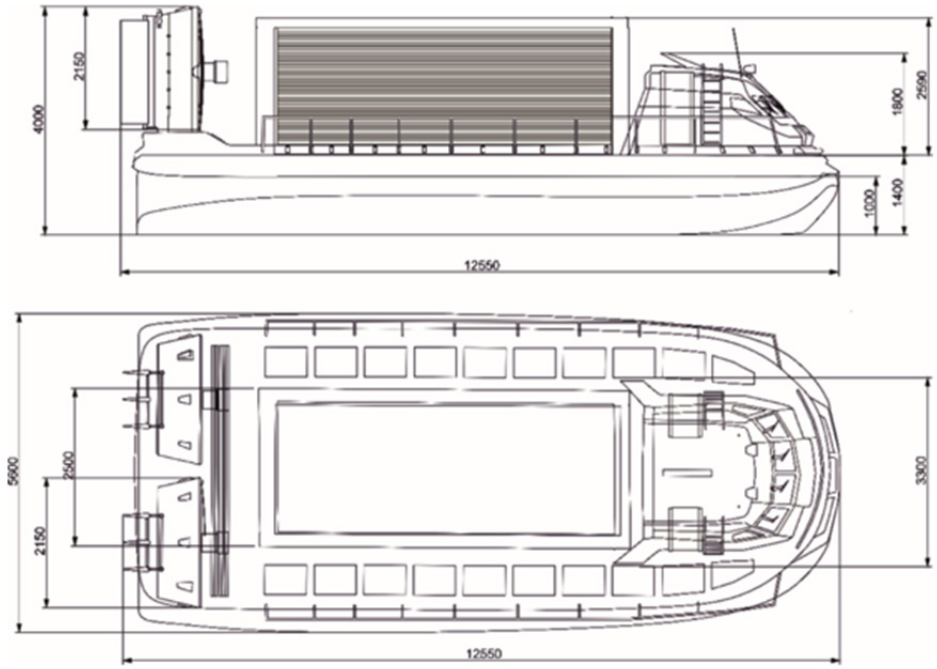


Рисунок 3 – СВП, вид сверху и вид справа с основными размерами

Был проведен анализ существующего технологического оборудования ЛАРН: использование щеточных скиммеров и ковшовых нефтесборщиков целесообразно на открытой воде и в мелкобитом льду на начальных этапах проведения ликвидации разливов нефти до момента вмерзания нефтепродуктов в лед. После вмерзания нефтепродуктов в лед, которое сопровождается падением эффективности сбора нефтесборных систем прямого действия, дальнейший их механический сбор целесообразно производить грейфером с последующим плавлением замазученного льда в ледоплавильной установке с последующей перекачкой нефтеводяной смеси в сборные емкости.

В рамках проекта был разработан проект носителя и подготовлена 3D-модель, была проведена разработка автоматизированного технологического оборудования (см. рис. 4), спроектирован контейнер с необходимыми средствами ЛАРН (см. рис. 5).

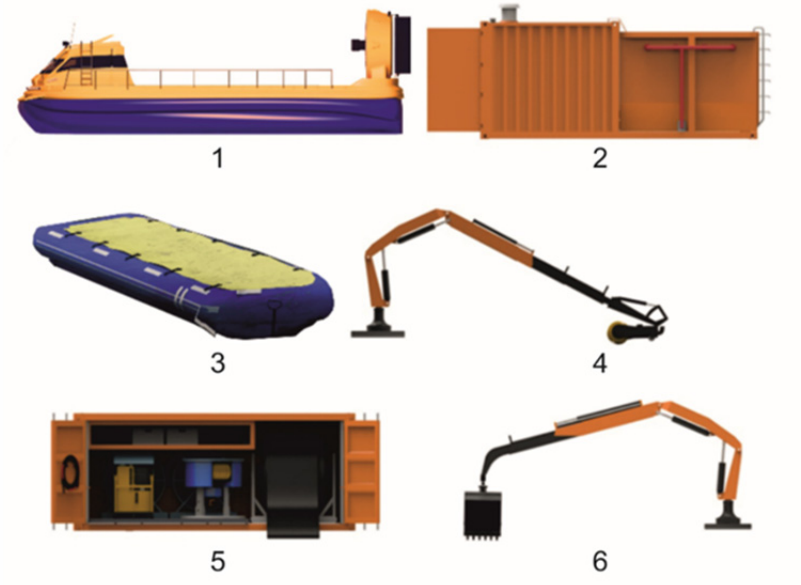


Рисунок 4 – Прочее оборудование ЛАРН.

На рис. обозначено: 1. Носитель на базе СВП; 2. Ледоплавильная установка; 3. Гибкий бронированный танк; 4. Ковшовый нефтесборщик; 5. Контейнер с оборудованием 6000 мм; 6. Гидравлический грейфер.

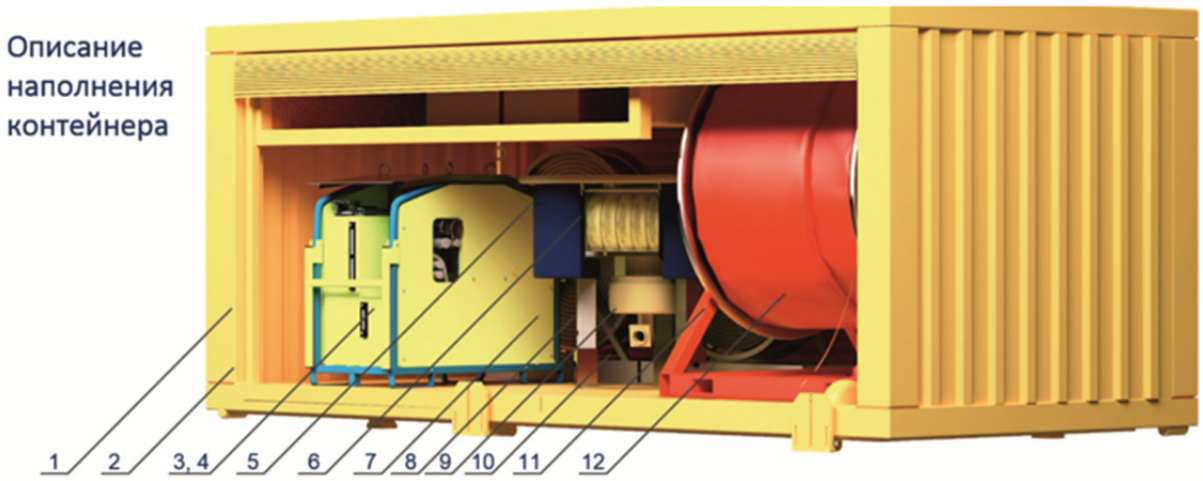


Рисунок 4 – Контейнер с набором необходимого оборудования ЛАРН

В состав контейнера (см. рис. 5) входит следующее оборудование:

1. Оборудованный контейнер с двумя длинными боковыми дверьми;
2. Выдвижная площадка контейнера;
3. Гидравлический блок питания;
4. Запасной комплект;
5. Мультискиммер;
6. Набор щеток для мультискиммера;
7. Набор гидравлических шлангов мультискиммера;
8. Запасной комплект мультискиммера;
9. Насос;
10. Комплект гидравлических шлангов;
11. Комплект для сбора нефти;
12. Надувной плавучий бон.

Кроме этого контейнер дополнительно имеет:

- Шланг для поплавка 80х30мм для шлангов 2-3 дюйма;
- Кран;
- Буксировочный комплект;
- Набор анкеров;
- Комплект ремонта бона;
- Катушка с боном;
- Комплект гидравлических шлангов;
- Гидравлический воздуходув;
- Комплект гидравлических шлангов;
- Расходные материалы.

Данная разработка имеет ряд преимуществ перед существующими техническими решениями. Создание и внедрение данного робототехнического комплекса может: расширить временной диапазон для ведения работ ЛАРН, и повысить экологическую безопасность данных работ, что является двумя основными проблемами современной ликвидации аварийных разливов нефти.

По данному проекту создан задел в части технических решений, эргономики и стилистики. В настоящее время ведутся проработки отдельных узлов и систем, готовятся заявки на получение патентов.

Работа выполнена в Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева, при финансовой поддержке Гранта Правительства Российской Федерации, постановление №220 «О мерах по привлечению ведущих ученых в российские образовательные учреждения высшего профессионального образования», договор №14.Z50.31.0036, название: «Создание научной лаборатории композиционных и керамических материалов с применением к арктическим транспортным средствам (LCCM)».

Е.С. Брискин[1,2], В.Н. Платонов[1,3], Н.Г. Шаронов[1,2], В.А. Серов[3], С.А. Устинов[3]

О РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМАХ ДВИЖЕНИЯ ЯКОРНО-ТРОСОВЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ ПРИ ПЕРЕНОСЕ В НОВОЕ ПОЛОЖЕНИЕ

[1]Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, [2]Центр технологий компонентов робототехники и мехатроники, Университет Иннополис, г. Иннополис, [3]АО «ФНПЦ «Титан-Баррикады», г. Волгоград, dtm@vstu.ru

Аннотация

В статье рассмотрены режимы движения якорно-тросового движителя при переносе якоря в новое положение по различным траекториям. Оценены параметры движения, в том числе энергозатраты в единичном цикле переноса. На основании рассчитанных энергозатрат показано, какая из рассматриваемых траекторий является наиболее оптимальной.

Ключевые слова: роботизированная подводная платформа, управление, траектория, энергоэффективность, якорно-тросовый движитель.

E.S. Briskin[1,2], V.N. Platonov[1,3], N.G. Sharonov[1,2], V.A. Serov[3], S.A. Ustinov[3]

ON ANCHOR-ROPE PROPULSION MOTION'S RATIONAL MODES DURING THE MOVEMENT INTO A NEW POSITION

[1]Volgograd State Technical University, Volgograd, [2]Center for Technology Components of Robotics and Mechatronics, Innopolis University, Innopolis, [3] JSC «FRPC «Titan-Barricades», Volgograd, dtm@vstu.ru

Abstract

The article discusses the modes of movement of the anchor-cable mover when moving the anchor to a new position along various trajectories. The motion parameters, including energy consumption in a single transfer cycle, are estimated. Based on the calculated energy consumption, it is shown which of the considered trajectories is the most optimal.

Key words: robotic underwater platform, control, trajectory, energy efficiency, anchor-rope propulsion.

Разведка и добыча новых месторождений углеводородов на континентальном шельфе обуславливает поиск новых подходов к проведению донных буровых работ, а также поиск новых технологий для их реализации. Одной из таких технологий может стать применение подводных роботизированных буровых платформ [1, 2] с движителями шагающего типа или с якорно-тросовыми движителями [3].

Одним из основополагающих требований к работе таких подводных буровых комплексов становится минимизация энергопотребления как в случае питания от собственного автономного источника энергии, так и в случае связи посредством силовых кабелей с надводным судном обеспечения. При этом режим энергосбережения должен обеспечиваться как при выполнении непосредственной технологической задачи, так и при передвижении подводного комплекса между точками бурения.

В [4] представлен анализ энергетических показателей шагающих машин, в частности, зависимость энергозатрат в фазе переноса точки опоры от скоростных режимов элементов движителя.

Подобный анализ должен быть осуществлен и для якорно-тросовых движителей. Варианты возможных траекторий *7* переноса элемента движителя *5* в новое положение *6* в фазе одного цикла перемещения подводной робототизированной платформы *3* представлены на рис. 1.

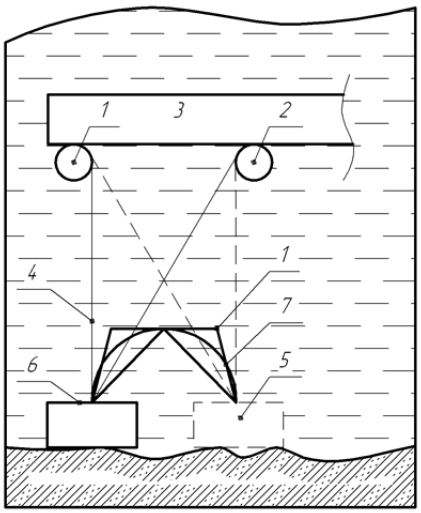


Рисунок 1 – Различные траектории переноса элементов якорно-тросового движителя:
1, 2 –маховики; 3 – платформа; 4 – тросы; 5, 6 – старое и новое положение якоря соответственно;
7 – возможные траектории переноса якоря.

Якорь переносится из положения *5* в положение *6* посредством изменения длин тросов *4* за счет поворотов маховиков *1* и *2*. Расчетная схема движителя приведена на рис. 2.

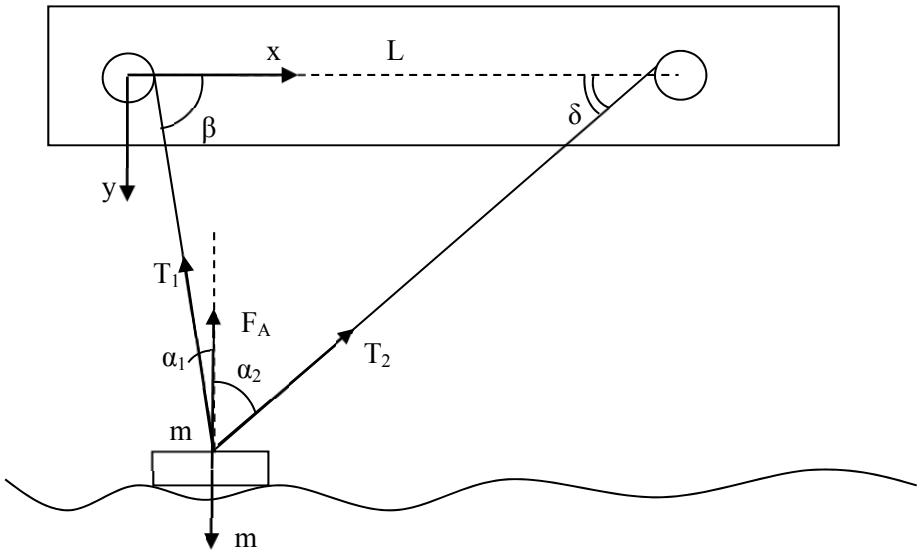


Рисунок 2 – Расчет ная схема движителя

Изменение длин тросов от маховиков до якоря определяется координатами текущей точки траектории (x_k,y_k) из геометрических соотношений:

$$l_{1k} = \sqrt{y_k^2 + x_k^2},\ l_{2k} = \sqrt{y_k^2 + (L - x_k)^2}\ , \tag{1}$$

Приращение угла поворота каждого маховика и его угловая скорость определяется выражениями:

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta l \cdot 180}{\pi R}\ ; \tag{2}$$

$$\omega = \frac{\partial\varphi}{\partial t} \tag{3}$$

где R – радиус маховика.

Тогда при движении груза (якоря) с постоянной скоростью уравнения движения имеют вид

$$\begin{cases} 0 = T_1 \cos\alpha_1 + T_2 \cos\alpha_2 + \rho g V - mg \\ 0 = T_2 \sin\alpha_2 - T_1 \sin\alpha_1 \end{cases}, \quad (4)$$

откуда можно получить выражения для моментов маховиков:

$$M = TR \, . \quad (5)$$

Мощность, затрачиваемая каждым маховиком, определяться на основании полученных законов изменений моментов:

$$P = M\omega \, . \quad (6)$$

Критерием, определяющим выбор той или иной траектории, является минимизация энергозатрат за время τ единичного цикла переноса:

$$A = \int_o^\tau P(t)dt \to \min \, . \quad (7)$$

Результаты моделирования режимов движения при различных траекториях переноса якоря в новое положение представлены на рис. 3 - 6.

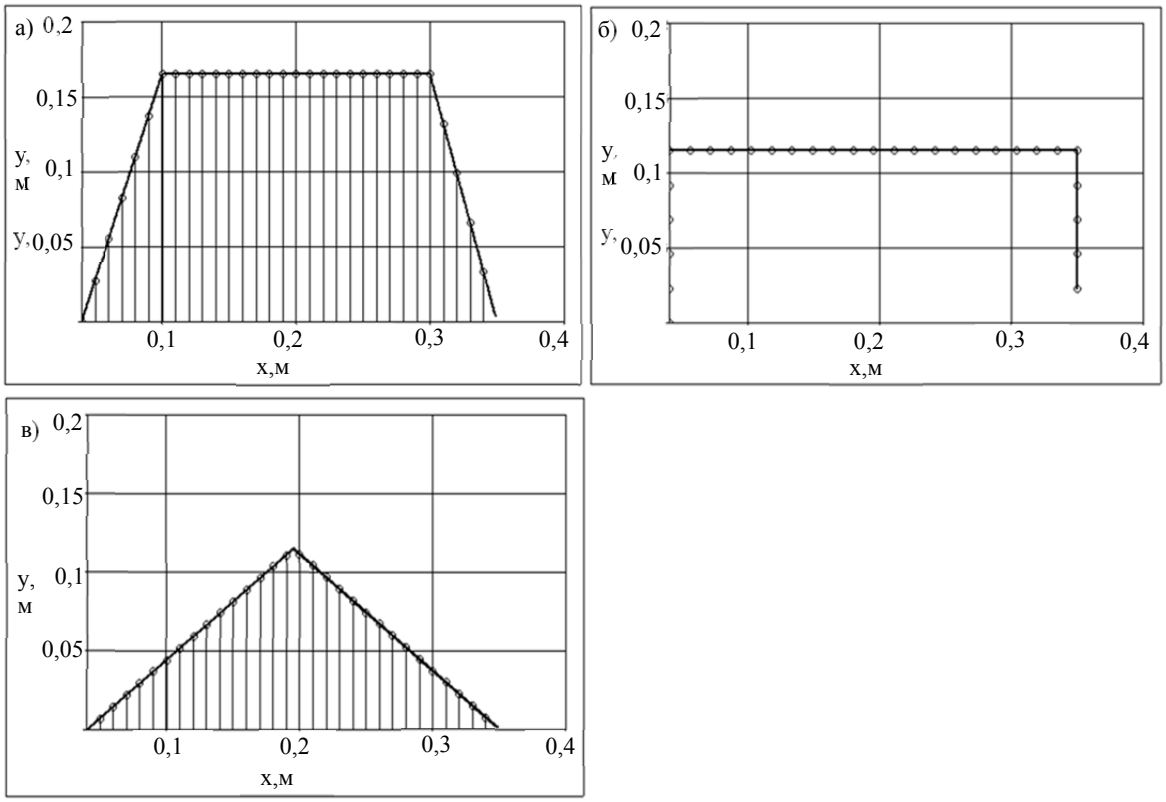


Рисунок 3 – Моделирование различных траекторий переноса якоря якорно-тросового движителя:
а) – трапеция; б) – прямоугольник; в) – треугольник

Изменения длин тросов, идущих к якорю движителя, при различных траекториях перемещения якоря представлены на рис. 4.

Изменения угловых скоростей маховиков при различных траекториях перемещения якоря представлены на рис. 5.

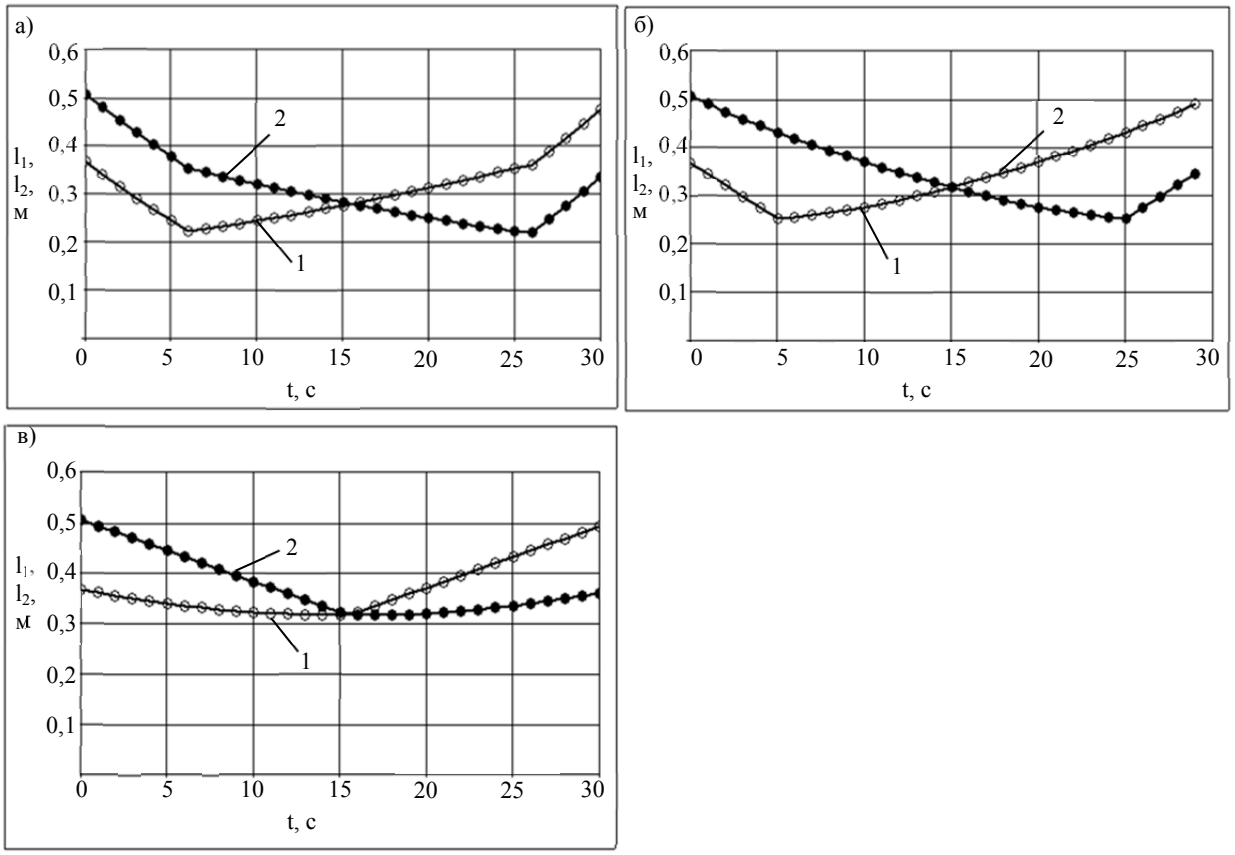


Рисунок 4 – Изменение длин тросов при различных траекториях переноса якоря якорно-тросового движителя: а) – трапеция; б) – прямоугольник; в) – треугольник; *1* – для двигателя 1, *2* – для двигателя 2

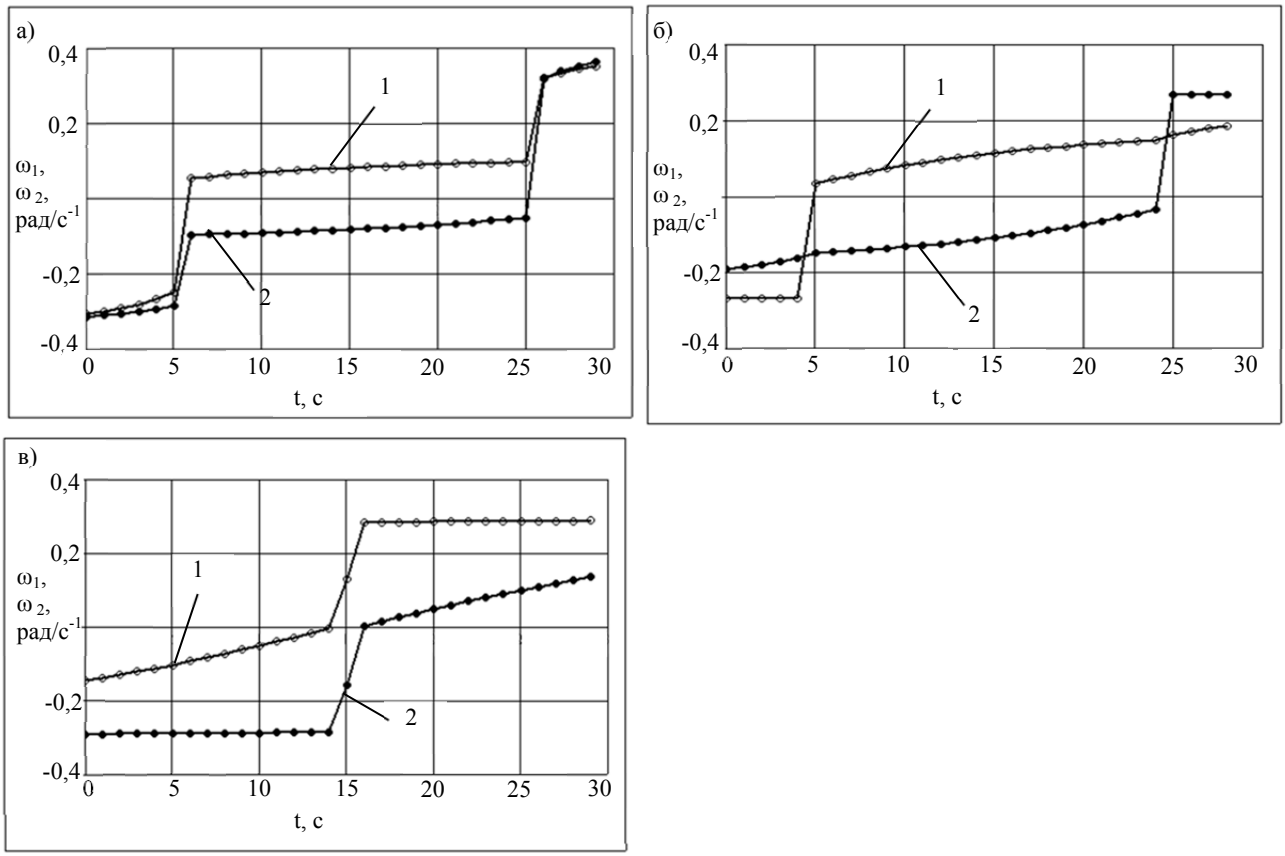


Рисунок 5 – Изменение угловых скоростей маховиков при различных траекториях переноса якоря якорно-тросового движителя: а) – трапеция; б) – прямоугольник; в) – треугольник; *1* – для двигателя 1, *2* – для двигателя 2

Изменения усилий в тросах при различных траекториях перемещения якоря представлены на рис. 6.

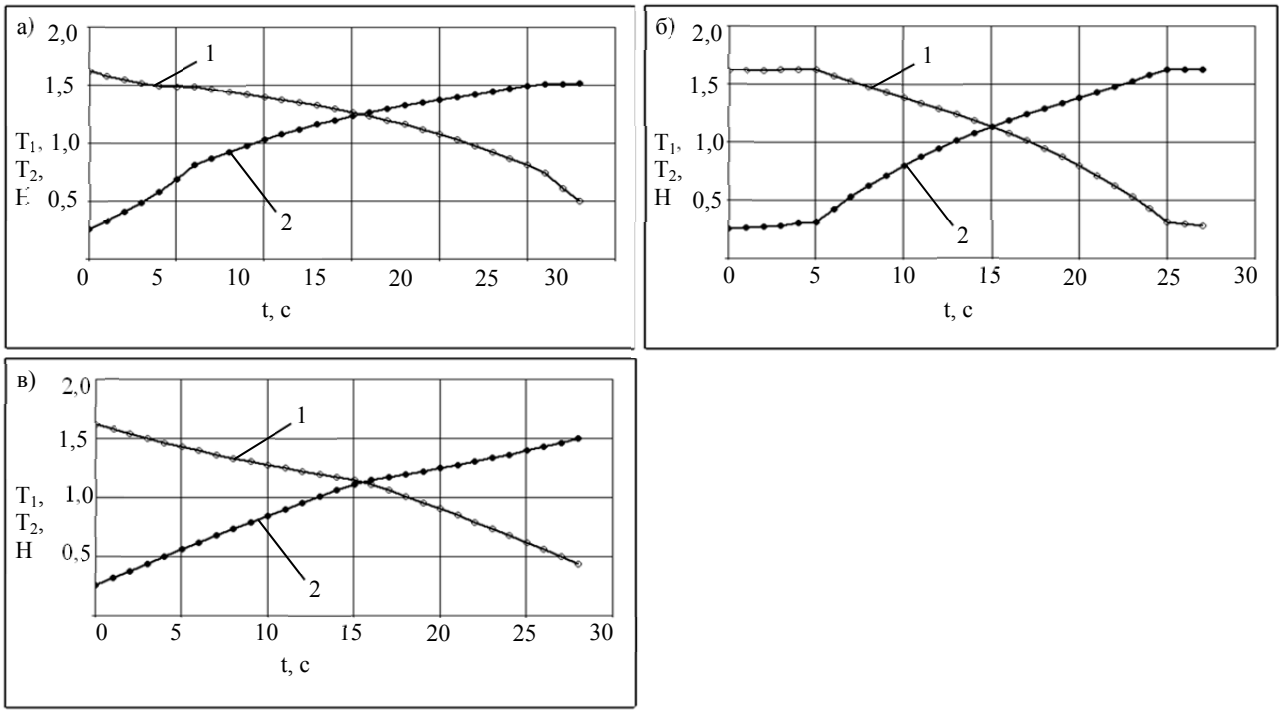


Рисунок 6 – Изменение усилий в тросах при различных траекториях переноса якоря якорно-тросового движителя: а) – трапеция; б) – прямоугольник; в) – треугольник; *1* – для двигателя 1, *2* – для двигателя 2

Поиск управляющих воздействий, подаваемых на якоря электродвигателей в случае применения двигателей постоянного тока, и обеспечивающих перемещение якоря движителя по заданным траекториям, может производиться двумя способами: 1) методам решения задачи прямого управления по механической характеристике, когда нагрузка – необходимые крутящие моменты на валах электродвигателей маховиков - априорно известна; 2) методом решения задачи управления в замкнутой системе с охватом канала «управляющее устройство – исполнительный механизм» цепью обратной связи.

Последний способ позволяет реализовывать систему управления без априорной идентификации нагрузки электродвигателей, и производить ее в каждый момент на основании информационно-измерительной системы, однако требует установки датчиков крутящих моментов или усилий в тросах.

В данной статье рассмотрен первый способ управления на примере синтеза управляющих воздействий для двигателей постоянного тока. Синтез управляющих воздействий, в данном случае, предполагает поиск напряжений U_1 и U_2 для якорей двигателей по механической характеристике двигателей на основе априорно рассчитанных значений угловых скоростей ω_1, ω_2, и моментов M_1, M_2 (способ их расчета представлен выше) для каждой дискретной точки траектории.

Из уравнения механической характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения, управляющее напряжение при априорно известных угловой скорости ω и моменте M, определяется выражением:

$$U = \left(\omega + \frac{R_я}{(k\Phi)^2} M \right) \cdot k\Phi \ , \qquad (8)$$

Листинг программы, реализующий данный способ поиска управляющих воздействий, представлен на рис. 7.

$$\begin{pmatrix} u1meh \\ il meh \\ \omega 1meh \end{pmatrix} := \left| \begin{array}{l} \omega meh_0 \leftarrow 0 \\ imeh_0 \leftarrow 0 \\ umeh_0 \leftarrow 0 \\ \text{for } j \in 0..Nstep - 3 \\ \quad \left| \begin{array}{l} umeh_j \leftarrow \left(\omega 1_j + \dfrac{Rya}{kFnom^2} \cdot M1_j \right) \cdot kFnom \\ imeh_{j+1} \leftarrow imeh_j + \Delta tstep \cdot \left(\dfrac{umeh_j - Rya \cdot imeh_j - kFnom \cdot \omega meh_j}{LL} \right) \\ \omega meh_{j+1} \leftarrow \omega meh_j + \Delta tstep \dfrac{1}{J} \cdot \left(kFnom \cdot imeh_j - M1_j \right) \end{array} \right. \\ \begin{pmatrix} umeh \\ imeh \\ \omega meh \end{pmatrix} \end{array} \right.$$

Рисунок 7 – Листинг расчета управляющих напряжений программы в пакете Mathcad,.

В результате получены управляющие напряжения для электродвигателей маховиков (рис. 8), а также токи якорей, соответствующие процессам перемещения якоря по заданной траектории.

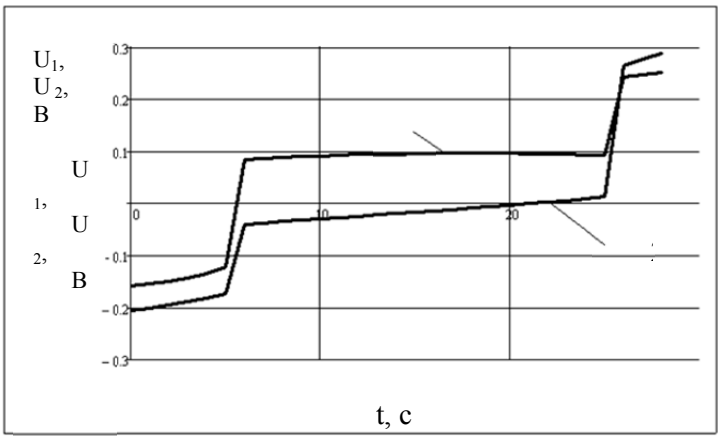


Рисунок 8 – Изменение управляющих напряжений для электродвигателей *1* и *2* соответственно.

Для проверки полученных результатов был разработан экспериментальная масштабный стенд движителя, моделирующий перенос якоря в единичном цикле. Стенд включает в себя два электропривода на основе шаговых двигателей, маховики и якорь, подвешенный на тросах с тензометрическими датчиками. Датчики позволяют измерять усилия в тросах и сопоставлять их с расчетными значениями. Внешний вид стенда представлен на рис. 9.

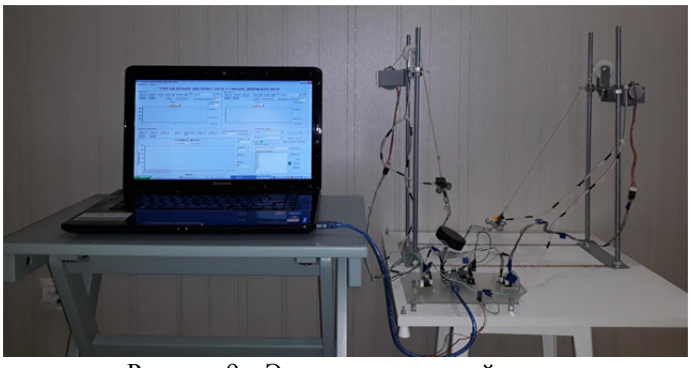


Рисунок 9 – Экспериментальный стенд

Исследование различных траекторий переноса якоря движителя проводилось на масштабном стенде со следующими параметрами: масса груза 240 гр, приводы - шаговые двигатели, начальная точка с координатами (0; 0,365), количество шагов $N = 30$, дискретизация по времени $\Delta t = 1$с.

Результаты расчетов позволяют получить зависимости энергозатрат A от характеристик режима переноса якоря движителя в новое положение.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ грант № 18-71-10069.

Литература

1 Серов В.А., Ковшов И.В., Устинов С.А. Задачи технологических роботизированных шагающих платформ при освоении подводных (подлёдных) месторождений полезных ископаемых // Известия ЮФУ. Технические науки. - 2017. № 9 (194). С. 181-191.

2 Jin-Ho Kim, Tae-Kyeong Yeu, Suk-Min Yoon, Hyung-Woo Kim, Jong-Su Choi, Cheon-Hong Min and Sup Hong. Electric-Electronic System of Pilot Mining Robot, MineRo-II // Proceedings of the Tenth ISOPE Ocean Mining and Gas Hydrates Symposium Szczecin, Poland, September 22-26, 2013. P. 269-273.

3 Брискин Е.С. Управление движением подводного мобильного робота с якорно-тросовыми движителями / Е.С. Брискин, Н.Г. Шаронов, В.А. Серов, И.С. Пеньшин // Робототехника и техническая кибернетика. – №2(19). – Санкт-Петербург : ЦНИИ РТК. – 2018. – С. 39-45.

4 Определение усилий в движителях якорно-тросового типа / Е.С. Брискин, И.С. Пеньшин, Л.Д. Смирная, Н.Г. Шаронов // Известия ВолгГТУ. Сер. Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. - Волгоград, 2017. - № 14 (209). - С. 87-90.

5 Брискин Е.С. Динамика и управление движением шагающих машин с цикловыми движителями / Е.С. Брискин, В.В. Жога, В.В. Чернышев, А.В. Малолетов; под ред. Е.С. Брискина. М.: Машиностроение, 2009. 192 с.: ил.

А.В. Зуев[1,2], А.Н. Жирабок[2]

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ДВИЖИТЕЛЕЙ ПОДВОДНЫХ РОБОТОВ

[1]Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток, [2]Институт проблем морских технологий ДВО РАН, г. Владивосток, zuev@dvo.ru, zhirabok@mail.ru

Аннотация

В докладе представлен новый метод построения систем функционального диагностирования движителей подводных роботов, которые обеспечивают онлайн обнаружение, локализацию и идентификацию возникающих незначительных дефектов. Этот метод содержит два этапа: 1) построение банка диагностических наблюдателей для обнаружения и локализации возникающих типовых дефектов; 2) построение дополнительных наблюдателей, работающих в скользящем режиме, для точной оценки величины ошибки в показаниях датчика угловой скорости и отклонений параметров движителей от их номинальных значений, обусловленных появлением дефектов.

Приведены результаты математического моделирования, которые подтвердили работоспособность и эффективность синтезированных наблюдателей.

Ключевые слова: дефект, движитель, подводный робот, диагностирование, идентификация, наблюдатель.

A.V. Zuev[1,2], A.N. Zhirabok[2]

METHOD OF CONSTRUCTING FUNCTIONAL DIAGNOSTIC SYSTEMS FOR UNDERWATER ROBOT THRUSTERS

[1]Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok, [2]Institute of Marine Technology Problems FEB RAS, Vladivostok, zuev@dvo.ru, zhirabok@mail.ru

Abstract

The report presents a method of building functional diagnostic systems for underwater robot thrusters, which provide online detection, localization and identification of minor faults. This method contains two stages: 1) construction of a bank of diagnostic observers for detection and localization of typical faults; 2) construction of additional sliding mode observers to accurately assess the deviations of thrusters parameters from their nominal values and the value of the error in the readings of the angular velocity sensor due to the appearance of faults.

Mathematical modeling results confirm operability and efficiency of the synthesized observers.

Key words: fault, propeller, underwater robot, diagnosis, identification, observer.

В настоящее время важным направление повышения эффективности автономной эксплуатации различных подводных роботов (ПР) является использование методов функционального диагностирования [1, 2], которые позволяют обнаруживать возникающие в процессе работы роботов дефекты, а также методов идентификации [3], обеспечивающих точную оценку величин ошибок в сигналах, получаемых от датчиков, и оценку отклонений параметров от своих номинальных значений, обусловленных возникновением этих дефектов.

К числу компонентов ПР, от которых в существенной степени зависит их способность выполнять поставленные задачи, относятся их движители, обеспечивающие отработку предписанных траекторий движения. Появление любых дефектов, вызывающих отказ или изменение параметров движителей, приводит к существенному снижению показателей качества управления ПР, различным аварийным ситуациям или даже потере дорогостоящих аппаратов.

Сейчас существует несколько подходов к построению систем диагностирования движителей ПР. В частности, в работах [4-6] представлены методы, основанные на построении диагностических наблюдателей с использование моделей динамики ПР. Однако поскольку ПР описываются очень сложными многосвязными нелинейными дифференциальными уравнениями с переменными и неопределенными параметрами, то получаемые наблюдатели являются громоздкими и не позволяют обеспечить качественное обнаружение и идентификацию дефектов при высокоскоростном

движении аппаратов. Кроме того, многие из этих методов требуют использования специальных тестовых режимов движения ПР [6].

Можно выделить методы диагностирования, основанные на использовании нейронных сетей [7]. Недостатком этих методов является необходимость сложной процедуры обучения при использовании специальных тестовых движений ПР.

Одним из перспективных подходов к обнаружению и идентификации дефектов является использование диагностических наблюдателей, работающих в скользящем режиме [8]; для простоты будем далее называть такие наблюдатели скользящими (СН). Скользящие наблюдатели используются для решения задач идентификации дефектов в линейных [9] и нелинейных [10] системах, для обеспечения отказоустойчивого управления [11]. Однако во всех этих работах на исходную систему накладывается ряд существенных ограничений, а также предполагается построение наблюдателей полного порядка, что усложняет процедуру точной идентификации дефектов в движителях ПР.

Таким образом, проведенный анализ показал, что ввиду высокой сложности реализации получаемых наблюдателей или низкой точности идентификации большинство из указанных методов и подходов не может быть эффективно использовано при построении систем функционального диагностирования движителей ПР.

Описание объекта диагностирования и постановка задачи

Рассмотрим модель движителя ПР, построенного на основе вентильного электродвигателя постоянного тока, имеющего датчики угловой скорости и тока. Предполагается, что при автономном функционировании ПР в их движителях возможно возникновение следующих типовых дефектов:

1) дефект в датчике угловой скорости, приводящий к появлению постоянной или переменной ошибки $\tilde{\alpha}(t)$ в его показаниях; 2) перегрев двигателя или замыкание нескольких витков обмотки цепи якоря, что приводит к изменению номинального значения электрического сопротивления R на величину $\tilde{R}(t)$; 3) появление дополнительного внешнего моментного воздействия $\tilde{M}(t)$ на валу двигателя, обусловленного, например, намоткой водорослей на винт.

Наличие указанных дефектов существенно снижает качественные показатели работы движителей и точность движения ПР по предписанным траекториям. При наличии этих дефектов разомкнутую цепь каждого электродвигателя в матричной форме можно описать дифференциальным уравнением вида:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + W(t) + Dd(t), \\ y(t) &= Cx(t) + D_s d_s(t), \end{aligned} \qquad (1)$$

где

$$A = \begin{bmatrix} -k_{\text{в}}/J & k_{\text{м}}/J \\ -k_w/L & -R/L \end{bmatrix};\ B = \begin{bmatrix} 0 \\ k_{\text{у}}/L \end{bmatrix};\ C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix};\ W(t) = \begin{bmatrix} -M(t)/J \\ 0 \end{bmatrix};\ D = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix};\ D_s = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$x(t) = \begin{bmatrix} \omega(t) \\ I(t) \end{bmatrix};\ y(t) = \begin{bmatrix} \omega(t) \\ I(t) \end{bmatrix};\ u(t) = U(t);\ d(t) = \begin{bmatrix} d_1(t) \\ d_2(t) \end{bmatrix};\ d_1(t) = -\tilde{M}(t)/J;\ d_2(t) = -\tilde{R}(t)I(t)/L;$$

$d_s(t) = \tilde{\alpha}(t)$; $k_{\text{в}}$ – коэффициент вязкого трения; J – момент инерции ротора электродвигателя, $I(t)$, L – ток и индуктивность цепи якоря электродвигателя, соответственно; k_w - коэффициент противо-э.д.с.; $k_{\text{у}}$ – коэффициент усиления; $k_{\text{м}}$ – коэффициент крутящего момента; $\omega(t)$ – скорость вращения ротора; $M(t) = (k_1 + k_2\lambda + k_3\lambda^2 + k_4\lambda^3)\rho|\omega(t)|\omega(t)D^5$ – момент нагрузки, обусловленный воздействием вязкой среды на винт; ρ – плотность воды; D – диаметр винта; $\lambda = \upsilon(t)/\omega(t)D$; $\upsilon(t)$ - скорость движения ПА; k_1, k_2, k_3, k_4 – известные постоянные коэффициенты; $U(t)$ – напряжение на входе усилителя мощности.

В данном докладе ставится и решается задача создания метода синтеза систем функционального диагностирования для движителей ПР, обеспечивающих своевременное обнаружение и локализацию возникающих дефектов (т.е. определение факта и времени появления в системе (1) конкретных функций $d_1(t)$, $d_2(t)$ и $d_s(t)$), а также идентификацию величин ошибки $\tilde{\alpha}(t)$ в сигнале, получаемом от датчика скорости, и отклонений параметров движителей от их номинальных значений $\tilde{R}(t)$ и $\tilde{M}(t)$, обусловленных появлением дефектов.

Для решения поставленной задачи в работе предложен новый метод, включающий два основных этапа.

1. Построение банка диагностических наблюдателей (ДН) для обнаружения и локализации возникающих дефектов. При этом каждый наблюдатель здесь строится по специальной процедуре таким образом, чтобы быть чувствительным к различному набору функций $d_1(t)$, $d_2(t)$ и $d_s(t)$.

2. Построение дополнительных СН для точной оценки величин ошибки в сигнале, получаемом от датчика, и отклонений параметров движителей от их номинальных значений, обусловленных появлением дефектов. При этом, в отличие от существующих решений, предлагается использовать редуцированную (имеющую меньшую размерность) модель исходной системы (1) при построении указанных наблюдателей. Далее последовательно будут рассмотрены указанные этапа синтеза.

Построение ДН для обнаружения и локализации дефектов

Для обнаружения и локализации возникающих дефектов строится банк ДН, имеющих следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{x}_*(t) &= A_* x_*(t) + B_* u(t) + W_*(t) + J_* y(t) + K_* r(t), \\ y_*(t) &= C_* x_*(t), \end{aligned} \qquad (2)$$

где x_* – вектор состояния ДН; $r(t) = R_* y(t) - y_*(t)$ невязка (при отсутствии дефектов $r(t) = 0$, а при их появлении $r(t) \neq 0$); A_*, B_*, C_*, W_*, K_*, R_* и J_* – матрицы, подлежащие определению; y_* – вектор выхода ДН.

Предполагается [2], что при отсутствии дефектов выполняются равенства $x_*(t) = \Phi x(t)$ и $y_*(t) = R_* y(t)$ для некоторых матриц Φ и R_*, удовлетворяющих условиям

$$\Phi A = A_* \Phi + J_* C, \quad R_* C_* = C\Phi, \quad B_* = \Phi B, \quad W_*(t) = \Phi W(t) \qquad (3)$$

Далее рассмотрим процедуру построения ДН (2), чувствительных различному набору функций $d_1(t)$, $d_2(t)$ и $d_s(t)$. Отметим, что чувствительность к функциям $d_1(t)$ и $d_2(t)$ задается условием $\Phi D_j \neq 0$ ($j = \overline{1,2}$), а чувствительность к ошибкам в показаниях датчика скорости – условием $J_* D_s \neq 0$ или $R_* D_s \neq 0$.

Для решения задачи матрицы A_* и C_* размеров $k \times k$ и $1 \times k$ (где k – размерность ДН) соответственно ищутся в канонической форме. В этом случае, как показано в [2], уравнения (3) могут быть приведены к одному уравнению

$$R_* C A^k = J_{*1} C A^{k-1} + J_{*2} C A^{k-2} + \ldots + J_{*k} C, \qquad (4)$$

где J_{*_i} – i-я строка матрицы J_*.

Для дальнейшего построения ДН необходимо определить матрицы B_*, W_*, J_*, Φ и R_* по следующему алгоритму.

1. Принять $k = 1$.

2. Решить уравнение (4). Отметим, что фактически это уравнение является системой линейных алгебраических уравнений, при этом количество неизвестных может быть больше количества уравнений. В таком случае некоторые элементы вектора R_* и матрицы J_* будут являться свободными переменными и могут быть подобранны исходя из необходимости обеспечения чувствительности либо нечувствительности ДН к определённым функциям $d_1(t)$, $d_2(t)$ и $d_s(t)$.

Если решения уравнения (4) не существует, положить $k := k + 1$ и повторить к п.2.

3. Определить строки матрицы Φ по соотношениям

$$\Phi_1 = R_* C, \quad \Phi_{i+1} = \Phi_i A - J_{*i} C, \quad i = 1, 2, \ldots, k$$

4. Определить матрицы B_* и W_* по соотношениям $B_* = \Phi B$, $W_*(t) = \Phi W(t)$.

5. Выбрать матрицу K_* так, чтобы $A_{**} = A_* - K_* C_*$ стала устойчивой матрицей. Поскольку матрицы A_* и C_* ищутся в каноническом виде, матрица K_* всегда существует.

В результате использования предложенной процедуры для модели движителя ПР (1) были синтезированы следующие ДН, описанные ниже матрицами:

1. ДН$_1$ первого порядка, чувствительный к $d_2(t)$ и $d_s(t)$ и инвариантный к $d_1(t)$:

$$A_* = 0,\ C_* = 1,\ R_* = \Phi = \begin{bmatrix}0 & 1\end{bmatrix},\ J_* = \begin{bmatrix}-k_w / L & -R / L\end{bmatrix},$$
$$B_* = k_{\text{у}} / L,\ W_*(t) = 0,\ K_* = 0.1; \tag{5}$$

2. ДН$_2$ первого порядка, чувствительный к $d_1(t)$ и $d_s(t)$ и инвариантный к $d_2(t)$:

$$A_* = 0,\ C_* = 1,\ R_* = \Phi = \begin{bmatrix}0 & 1\end{bmatrix},\ B_* = 0,\ J_* = \begin{bmatrix}-k_{\text{в}} / J & k_{\text{м}} / J\end{bmatrix}$$
$$W_*(t) = -M(t) / J,\ K_* = 0.1; \tag{6}$$

3. ДН$_3$ второго порядка, чувствительный к $d_1(t)$ и $d_2(t)$ и инвариантный к $d_s(t)$:

$$A_* = \begin{bmatrix}0 & 1\\ 0 & 0\end{bmatrix},\ C_* = \begin{bmatrix}1 & 0\end{bmatrix},\ R_* = \begin{bmatrix}0 & 1\end{bmatrix},\ J_* = \begin{bmatrix}0 & -\dfrac{k_{\text{в}}}{J} - \dfrac{R}{L}\\ 0 & -\dfrac{k_{\text{м}}k_w}{JL} - \dfrac{k_{\text{в}}R}{JL}\end{bmatrix},$$
$$K_* = \begin{bmatrix}2\\ 1\end{bmatrix},\ B_* = \begin{bmatrix}k_{\text{у}} / L\\ k_{\text{в}}k_{\text{у}} / JL\end{bmatrix},\ \Phi = \begin{bmatrix}0 & 1\\ -k_w / L & k_{\text{в}} / J\end{bmatrix},\ W_*(t) = \begin{bmatrix}0\\ M(t)k_w / LJ\end{bmatrix}. \tag{7}$$

Построенные наблюдатели ДН$_1$, ДН$_2$ и ДН$_3$ позволяют осуществлять определение факта и времени появления неизвестных ненулевых функций $d_1(t)$, $d_2(t)$ и $d_s(t)$ в системе (1). Решение о локализации конкретного дефекта принимается на основе следующих правил: 1) если $r_1(t) = 0$, $r_2(t) \neq 0$ и $r_3(t) \neq 0$, то возник дефект $d_1(t)$; 2) если $r_1(t) \neq 0$, $r_2(t) = 0$ и $r_3(t) \neq 0$, то возник дефект $d_2(t)$; 3) если $r_1(t) \neq 0$, $r_2(t) \neq 0$ и $r_3(t) = 0$, то возник дефект $d_s(t)$. Здесь $r_1(t)$, $r_2(t)$ и $r_3(t)$ – невязки, формируемые ДН$_1$, ДН$_2$ и ДН$_3$, соответственно.

Построение дополнительных СН для идентификации дефектов

Решение задачи точной оценки величин ошибки в сигнале, получаемом от датчика скорости, и отклонений параметров движителей от их номинальных значений, обусловленных появлением дефектов, предлагается осуществлять с помощью дополнительных СН. При этом указанные наблюдатели должны строиться на основе редуцированных моделей [12, 13] исходной системы (1), что позволит снизить сложность реализации СН по сравнению с известными работами [9, 11].

Величины неизвестных функций $d_1(t)$ и $d_2(t)$ могут быть определены с использованием ДН$_2$ и ДН$_1$, соответственно. Таким образом, целесообразно осуществлять построение редуцированных моделей исходной системы, беря за основу именно эти наблюдатели. В общем виде полученные модели первого порядка будут иметь вид [12]

$$\dot{x}_*(t) = B_*u(t) + J_*y(t) + W_*(t) + \Phi Dd(t),$$
$$y_*(t) = x_*(t). \tag{8}$$

СН для модели (8) ищется как

$$\dot{\hat{x}}_*(t) = B_*u(t) + J_*y(t) + W_*(t) + \Phi Dv(t) + K_*\hat{e}_y(t),$$
$$\hat{y}_*(t) = \hat{x}_*(t), \tag{9}$$

где $v(t) = \begin{cases} g\dfrac{\hat{e}_y(t)}{\left\|\hat{e}_y(t)\right\|}, & \text{если } \hat{e}_y(t) \neq 0, \\ 0 & \text{в противном случае,}\end{cases}$ $\hat{e}_y(t) = y_*(t) - \hat{y}_*(t)$

В работе [12] показано, что при выборе скаляра $g > \|d(t)\|$ ошибка оценивания $\hat{e}(t) = x_*(t) - \hat{x}_*(t)$ асимптотически устойчива, что обеспечивает существование скользящего режима, при этом величина $d(t)$ оценивается с высокой степенью точности с помощью следующего выражения: $d(t) = v_{\text{э}}(t) = g\dfrac{\hat{e}_y(t)}{\left\|\hat{e}_y(t)\right\| + \delta}$, где δ – малое положительное число [9].

Таким образом, с учетом (5) и (6) были получены следующие СН:

1. СН$_1$ для идентификации величины $\tilde{M}(t)$:

$$\dot{\hat{x}}_*(t) = -\frac{k_{\text{в}}}{J}y_1(t) + \frac{k_{\text{м}}}{J}y_2(t) - \frac{M(t)}{J} + 0.1\hat{e}_y(t) + v_{\text{э}}(t),$$
$$\hat{y}_*(t) = \hat{x}_*(t),\quad \hat{e}_y(t) = y_1(t) - \hat{y}_*(t),$$
$$g = 10000,\quad \delta = 1,\quad \tilde{M}(t) = -v_{\text{э}}(t)J; \tag{10}$$

2. $СН_2$ для идентификации величины $\widetilde{R}(t)$:

$$\begin{gathered}\dot{\hat{x}}_*(t) = -\frac{k_w}{L} y_1(t) - \frac{R}{L} y_2(t) + \frac{k_y}{L} U(t) + 0.1\hat{e}_y(t) + v_э(t), \\ \hat{y}_*(t) = \hat{x}_*(t), \quad \hat{e}_y(t) = y_2(t) - \hat{y}_*(t), \\ g = 100, \quad \delta = 0.1, \quad \tilde{R}(t) = -v_э(t)L / I(t);\end{gathered} \tag{11}$$

Идентификация величины функции $d_s(t)$, а следовательно, и оценка ошибки в показаниях датчика скорости движителя ПР может быть проведена с использованием следующей редуцированной модели [13], построенной на основе ДН1:

$$\begin{gathered}\dot{x}_*(t) = B_* u(t) + J_* y(t) + W_*(t) - J_* D_s d_s(t), \\ y_*(t) = x_*(t).\end{gathered} \tag{12}$$

По аналогии $СН_3$ для модели (12), обеспечивающий оценку величины $\tilde{\omega}(t)$ имеет вид:

$$\begin{gathered}\dot{\hat{x}}_*(t) = -\frac{k_w}{L} y_1(t) - \frac{R}{L} y_2(t) + \frac{k_y}{L} U(t) + 0.1\hat{e}_y(t) + \frac{k_w}{L} v_э(t), \\ \hat{y}_*(t) = \hat{x}_*(t), \quad \hat{e}_y(t) = y_2(t) - \hat{y}_*(t), \\ g = 1, \quad \delta = 0.1, \quad \tilde{\omega}(t) = v_э(t).\end{gathered} \tag{13}$$

Таким образом, за счет использования $СН_1$, $СН_2$ и $СН_3$ удается обеспечить оценку величин ошибок в сигналах, получаемых от датчиков, и отклонений параметров движителей от их номинальных значений, обусловленных появлением дефектов. Важно отметить, что использование редуцированных моделей (8) и (12) позволило обеспечить построение простых наблюдателей первого порядка.

Результаты численных исследований.

Для проверки работоспособности и эффективности предлагаемого метода синтеза было проведено моделирование работы системы функционального диагностирования движителя ПР со следующими параметрами: $k_в$ = 67.5610·10-5 Нмс/рад; J = 0,00025 кгм2 ; R = 0.65 Ом; L=0.00026 Гн; k_w = 0.135 Вс/рад; $k_у$ = 27.71; $k_м$ = 0.135 Нм/А; D=0.178 м; $\eta(t)$=1 м/с; k_1=0.015; k_2=0.02; k_3 =0.0002; k_4=-0.02.

На движитель подавалось управление $U(t) = 1{,}5 + \sin(t)$, а одиночные дефекты имитировались введением внешнего момента $\widetilde{M}(t) = 0.2\sin((t-3)\pi/4)$ Нм в период времени 3÷7 с, плавным изменением величины активного сопротивления на 0.1 Ом в период времени 5÷10 с, а также введением постоянной ошибки $\tilde{\omega}(t) = 0.2$ рад/с в показания датчика скорости в период времени 4÷10с.

На рис. 1 представлены графики функции $\widetilde{M}(t)$ (кривая 1) и ее оценки (кривая 2) с помощью предложенных наблюдателей.

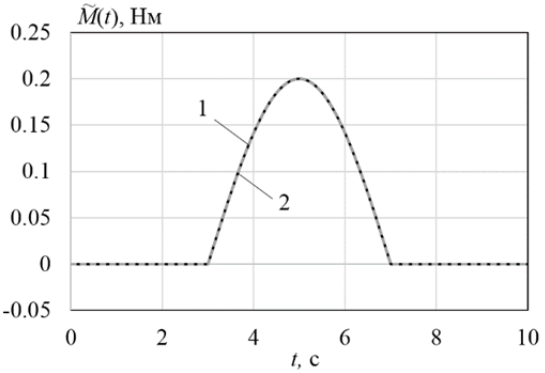


Рисунок 1 – Функция $\widetilde{M}(t)$ (кривая 1) и результат ее идентификации (кривая 2)

На рис. 2 и 3 представленные аналогичные графики для функций $\widetilde{R}(t)$ и $\tilde{\omega}(t)$. Из представленных рисунков можно видеть, что построенные наблюдатели позволяют своевременно определить моменты времени появления ошибок $\widetilde{M}(t)$, $\widetilde{R}(t)$ и $\tilde{\omega}(t)$, а также обеспечить достаточно точную оценку величин этих ошибок. Ошибка идентификации во всех трех случаях не превышала 0.1%

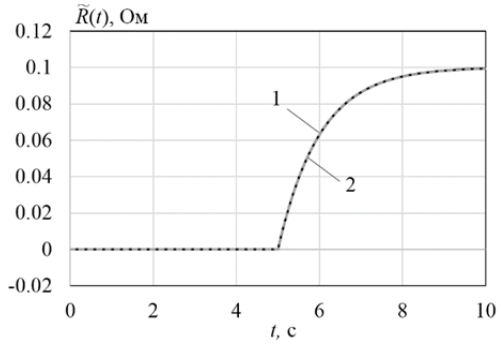


Рисунок 2 – Функция $\widetilde{R}(t)$ (кривая 1) и результат ее идентификации (кривая 2)

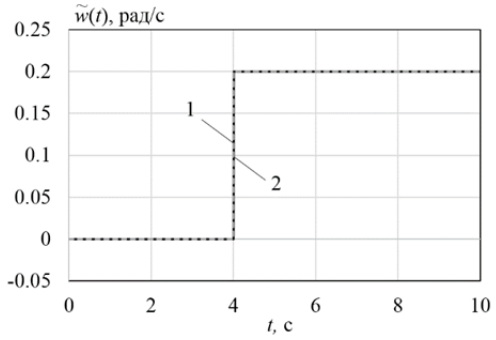


Рисунок 3 – Функция $\widetilde{\alpha}(t)$ (кривая 1) и результат ее идентификации (кривая 2)

Таким образом, результаты проведенных исследований показали безусловную работоспособность и высокое качество синтезированных наблюдателей. Во всех рассмотренных случаях удалось своевременно обнаружить факт появления дефекта, а также обеспечить определение его величины. На основе рассмотренного подхода к построению систем диагностирования движителей ПР могут быть созданы высоконадежные системы управления ПР.

В докладе описывается новый метод построения систем функционального диагностирования движителей ПР. Эти системы обеспечивают не только своевременное обнаружение и локализацию возникающих типовых дефектов с помощью банка ДН, но также точную оценку величин ошибок в сигналах, получаемых от датчиков, и отклонений параметров движителей от их номинальных значений, обусловленных появлением этих дефектов. Результаты моделирования подтверждают работоспособность и высокое качество синтезированных наблюдателей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №18-79-00143).

Литература

1 Мироновский Л.А. Функциональное диагностирование динамических систем. М.-СПб.: МГУ-ГРИФ, 1998.

2 Шумский А.Е., Жирабок А.Н. Методы и алгоритмы диагностирования и отказоустойчивого управления динамическими системами. Владивосток: ДВГТУ, 2009.

3 Simani S., Fantuzzi C., Patton R. Model-based Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Identification. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2002.

4 Zhang M., Wu J., Wang Y. Simultaneous Faults Detection and location of Thrusters and Sensors for Autonomous Underwater Vehicle // Proc. of the Fourth International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, 2011. P. 504-507.

5 Wang J. Fault Diagnosis of Underwater Vehicle with FNN // Proc. of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2012. P. 2931-2934.

6 Zhao B., Skjetne R., Blanke M., Dukan F. Particle Filter for Fault Diagnosis and Robust Navigation of Underwater Robot // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2014. Vol. 22. № 6. P. 2399-2407.

7 Wang J., Wu G., Wan L., Sun Y., Jiang D. Recurrent Neural Network Applied to Fault Diagnosis of Underwater Robots // Proc. of the IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems, 2009. P. 593-598.

8 Уткин В.И. Скользящие режимы и их применение в системах с переменной структурой. М.: Наука, 1974.

9 Edwards C., Spurgeon S., Patton R. Sliding Mode Observers for Fault Detection and Isolation // Automatica. 2000. Vol. 36. P. 541-553.

10 He J., Zhang C. Fault Reconstruction Based on Sliding Mode Observer for Nonlinear Systems // Mathematical Problems in Engineering. 2012. Vol. 2012. P. 1-22.

11 Alwi H., Edwards C. Fault Tolerant Control Using Sliding Modes with On-line Control Allocation // Automatica. 2008. Vol. 44. P. 1859-1866.

12 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.

13 Жирабок А.Н., Зуев А.В., Шумский А.Е. Идентификация дефектов в датчиках технических систем с использованием скользящих наблюдателей // Измерительная техника. 2019. № 10. С. 21-28.

А.В. Зуев[1,2], А.Н. Жирабок[2], А.Е. Шумский[3]

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ИДЕНТИФИКАЦИИ ДЕФЕКТОВ В ДАТЧИКАХ МЕХАТРОННЫХ ОБЪЕКТОВ

[1]Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток, [2]Институт проблем морских технологий ДВО РАН, г. Владивосток, [3]Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, zuev@dvo.ru, zhirabok@mail.ru, a.e.shumsky@yandex.com

Аннотация

В докладе решается задача идентификации (определения величины) дефектов в датчиках различных мехатронных объектов (МО) в присутствии внешних возмущений неизвестного характера, действующих на динамику системы. Для этого используются наблюдатели, работающие в скользящем режиме. Предложен новый подход, который базируется на идее построения редуцированной (имеющей меньшую размерность) модели МО, обладающей избирательной чувствительностью по отношению к дефектам и возмущению, когда модель нечувствительна к возмущению и чувствительна к определенным дефектам. Показано, что использование такой модели позволяет уменьшить сложность средств идентификации и ослабить ограничения, накладываемые на исходную систему, по сравнению с известными методами.

Ключевые слова: дефект, датчик, мехатронный объект, ошибка, идентификация, скользящий наблюдатель.

A.V. Zuev[1,2], A.N. Zhirabok[2], A.Ye. Shumsky[3]

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR FAULT IDENTIFICATION IN SENSORS OF MECHATRONIC OBJECTS

[1]Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok, [2]Institute of Marine Technology Problems, Vladivostok, [3]Far Eastern Federal University, Vladivostok, zuev@dvo.ru, zhirabok@mail.ru, a.e.shumsky@yandex.com

Abstract

The report solves the problem of identification (determining the magnitude) of errors in the sensors of various mechatronic objects (MO) in the presence of external disturbances of an unknown nature acting on the dynamics of the system. For this purpose, observers working in sliding mode are used. A new approach is proposed, which is based on the idea of constructing a reduced (having a smaller dimension) MO's model that has selective sensitivity to errors and disturbance, when the model is insensitive to disturbances and sensitive to certain errors. It is shown that the use of such a model allows reducing the complexity of identification tools and easing the restrictions imposed on the original system, in comparison with the known methods. Mathematical modeling results confirm operability and efficiency of the synthesized observers.

Key words: fault, sensor, mechatronic objects, error, identification, sliding mode observer.

Одним из элементов управления МО является информационно-измерительная система, существенная часть которой представлена измерительными преобразователями (датчиками). Последние в силу своих конструктивных особенностей нередко являются самыми ненадежными элементами таких МО. Дефекты, возникающие в датчиках, приводят к искажению их показаний, что отражается на качестве управления МО. Если величину этих искажений удается оценить, то искаженные показания могут быть скорректированы и качество управления системой будет восстановлено [1].

Методом, дающим наибольшую информацию об искажениях, вызванных дефектами, является идентификация. Последние годы для ее реализации активно применяется подход, основанный на наблюдателях, работающих в скользящем режиме (скользящие наблюдатели) [2-8].

Сейчас скользящие наблюдатели применяются для решения задачи идентификации дефектов в линейных [2, 3] и нелинейных [4-6] системах, для обеспечения отказоустойчивого управления [7, 8], а также ряде практических приложений [9, 10]. Во всех этих работах на исходную систему накладывается ряд ограничений.

В настоящем докладе метод на основе скользящих наблюдателей используется для решения задачи оценки величины дефектов в МО, описываемых линейными моделями при действии на них возмущений. В основе предлагаемого подхода лежит идея использования редуцированной (имеющей меньшую размерность) модели МО, что дает возможность уменьшить сложность скользящих наблюдателей по сравнению с известным работами [2-5], где строятся наблюдатели полного порядка.

Построение редуцированных моделей МО

Рассмотрим РТО, описываемые линейной моделью

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Fx(t) + Gu(t) + L\rho(t), \\ y(t) &= Hx(t) + \sum\nolimits_{i=1}^{l} D_i d_i(t), \end{aligned} \tag{1}$$

где $x(t) \in R^n$, $u(t) \in R^m$, $y(t) \in R^l$ – векторы состояния, управления и измерений; $F \in R^{n \times n}$, $G \in R^{n \times m}$, $L \in R^{n \times q}$ и $H \in R^{l \times n}$ – известные постоянные матрицы; $\rho(t) \in R^q$ – неизвестная функция времени, описывающая действующие на систему возмущения; $d_i(t) \in R$ – функция, описывающая дефекты в i -м датчике: при их отсутствии $d_i(t) = 0$, при появлении дефекта $d_i(t)$ становится неизвестной функцией времени, $i = \overline{1,l}$; матрицы D_1, …, D_l связывают дефекты с соответствующими компонентами вектора измерений: $D_1 = (1\ 0\ \ldots\ 0)^{\mathrm{T}}$, …, $D_l = (0\ 0\ \ldots\ 1)^{\mathrm{T}}$ Предполагается, что известны и ограничены нормы $\|d_i(t)\|$ и $\|\rho(t)\|$ функций $d_i(t)$ и $\rho(t)$.

Для простоты рассмотрим случай, когда дефекты возможны только в одном датчике с соответствующими элементами D и $d(t)$. Решение поставленной задачи опирается на редуцированную модель системы (1), аналогичную модели, традиционно используемой при решении задачи диагностики [11], которая в общем случае описывается уравнением

$$\dot{x}_*(t) = F_* x_*(t) + G_* u(t) + J_* Hx(t) + L_* \rho(t), \quad y_*(t) = H_* x_*(t) + D_* d(t), \tag{2}$$

где $x_* \in R^k$ – вектор состояния размерности $k < n$, F_*, G_*, J_*, H_* и L_* – постоянные матрицы. Предполагается [11], что при отсутствии дефектов и возмущений выполняются равенства $x_*(t) = \Phi x(t)$ и $y_*(t) = R_* y(t)$ для некоторых матриц Φ и R_*, удовлетворяющих условиям $\Phi F = F_* \Phi + J_* H$, $R_* H = H_* \Phi$, $G_* = \Phi G$, $L_* = \Phi L$, $D_* = R_* D$.

Ниже предполагается, что существуют матрицы Φ и R_*, удовлетворяющие условиям $\Phi F = F_* \Phi + J_* H$ и $R_* H = H_* \Phi$, такие, что $\Phi L = 0$; последнее означает существование модели, не чувствительной к возмущениям, когда возможна точная идентификация функции $d(t)$.

Для построения модели (2) минимальной размерности необходимо использовать матрицы F_* и H_* размеров $k \times k$ и $1 \times k$ в канонической форме (k – размерность модели). При этом для построения скользящего наблюдателя необходимо выполнить условие $R_* D = 0$. Для учета этого условия вводится матрица D^0 максимального ранга такая что $D^0 D = 0$; тогда $R_* = MD^0$ для некоторой матрицы M. В результате можно сформировать итоговое уравнение, решая которое могут быть найдены элементы матриц J_* и Φ:

$$(M \quad -J_{*1} \quad \ldots \quad -J_{*k})(V^{(k)}\ B^{(k)}) = 0, \tag{3}$$

где $V^{(k)} = \begin{pmatrix} D^0 HF^k \\ HF^{k-1} \\ \vdots \\ H \end{pmatrix}$, $B^{(k)} = \begin{pmatrix} D^0 HL & D^0 HFL & D^0 HF^2 L & \ldots & D^0 HF^{k-1} L \\ 0 & HL & HFL & \ldots & HF^{k-2} L \\ 0 & 0 & HL & \ldots & HF^{k-3} L \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ 0 & 0 & 0 & \ldots & 0 \end{pmatrix}$.

Таким образом с использованием (3) удается построить редуцированные модели МО, которые являются чувствительными к дефектам, но инвариантными к действующим на систему возмущениям.

Построение скользящего наблюдателя

Предполагаем, что уравнение (3) имеет решение и существует модель (2), не чувствительная к возмущениям. По аналогии с [5] построим на основе этой модели скользящий наблюдатель [12-14] при условии, что $J_*D \neq 0$:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}_*(t) &= F_*\hat{x}_*(t) + G_*u(t) + J_*y(t) - J_*Dv(t) - Ke_y,\\ \hat{y}_*(t) &= H_*\hat{x}_*(t),\end{aligned} \tag{4}$$

где разрывная функция $v(t)$ ищется в виде $v(t) = \begin{cases} g\dfrac{Qe_y(t)}{\left\|Qe_y(t)\right\|}, & \text{если } e_y(t) \neq 0,\\ 0 & \text{в противном случае,}\end{cases}$ матрица K выбирается так, чтобы $F_{**} = F_* - KH_*$ стала устойчивой матрицей, $e_y(t) = \hat{y}_*(t) - y_*(t) = \hat{y}_*(t) - R_*y(t)$ – ошибка по выходу; правила выбора матрицы Q и скаляра g обсуждаются ниже.

Введем ошибку по состоянию $e(t) = \hat{x}_*(t) - x_*(t)$. Учитывая, что $R_*H = H_*\Phi$ и $R_*D = 0$, то $e_y(t) = H_*e(t)$. Запишем уравнение динамики ошибки $e(t)$:

$$\begin{aligned}\dot{e}(t) &= F_*e(t) + J_*(y(t) - Hx(t)) - J_*Dv(t) - Ke_y(t) =\\ &= F_{**}e(t) + J_*Dd(t) - J_*Dv(t) = F_{**}e(t) + J_*D(d(t) - v(t)).\end{aligned} \tag{5}$$

Так как матрица F_{**} устойчива, то для произвольной симметрической положительно определенной матрицы W существует симметрическая положительно определенная матрица P такая, что $F_{**}^{\mathrm{T}}P + PF_{**} = -W$. По аналогии с [5] предполагается, что существует матрица Q, удовлетворяющая условию $PJ_*D = H_*^{\mathrm{T}}Q^{\mathrm{T}}$.

Скаляр g выбирается из условия $g > \left\|d(t)\right\|$. При указанном выборе матрицы Q и скаляра g наблюдатель сходится асимптотически, т.е. $e(t) \to 0$.

Для доказательства рассмотрим функцию Ляпунова $V(t) = e^{\mathrm{T}}(t)Pe(t)$ и, используя (5), найдем ее производную по времени:

$$\begin{aligned}\dot{V}(t) &= (F_{**}e(t) + J_*D(d(t) - v(t)))^{\mathrm{T}}Pe(t) + e^{\mathrm{T}}(t)P(F_{**}e(t) + J_*D(d(t) - v(t))) =\\ &= e^{\mathrm{T}}(t)(F_{**}^{\mathrm{T}}P + PF_{**})e(t) + (J_*D(d(t) - v(t)))^{T}Pe(t) + e^{T}(t)PJ_*D(d(t) - v(t)) =\\ &= -e^{\mathrm{T}}(t)We(t) + 2e^{\mathrm{T}}(t)P(J_*D(d(t) - v(t))) =\\ &= -e^{\mathrm{T}}(t)We(t) + 2e^{\mathrm{T}}(t)PJ_*Dd(t) - 2e^{\mathrm{T}}(t)PJ_*Dg\frac{Qe_y(t)}{\left\|Qe_y(t)\right\|} =\\ &= -e^{\mathrm{T}}(t)We(t) + 2(QH_*e(t))^{\mathrm{T}}d(t) - 2g(QH_*e(t))^{T}\frac{QH_*e(t)}{\left\|QH_*e(t)\right\|} =\\ &= -e^{\mathrm{T}}(t)We(t) + 2(QH_*e(t))^{\mathrm{T}}d(t) - 2g\left\|QH_*e(t)\right\| \le\\ &\le -e^{\mathrm{T}}(t)We(t) + 2\left\|QH_*e(t)\right\|(\left\|d(t)\right\| - g) < 0;\end{aligned}$$

в последнем неравенстве учтено, что W – симметрическая положительно определенная матрица и $g > \left\|d(t)\right\|$. Неравенство $\dot{V}(t) < 0$ означает, что $e(t) \to 0$.

Известно [2-5], что скользящий режим обеспечивает равенства $e(t) = 0$ и $\dot{e}(t) = 0$ за конечное время τ. При этом разрывная функция $v(t)$ может быть заменена на эквивалентную непрерывную функцию $v_{eq}(t) = g\dfrac{Qe_y(t)}{\left\|Qe_y(t)\right\| + \delta}$, где δ – малое положительное число. Поэтому из уравнения (5) следует $0 = J_*D(d(t) - v_{eq}(t))$, $t \ge \tau$, и функция $d(t)$ может быть оценена в виде $d(t) = g\dfrac{Qe_y(t)}{\left\|Qe_y(t)\right\| + \delta}$.

Исследование работы скользящих наблюдателей

Рассмотрим линеаризованную модель МО (трехбакового объекта), описываемую следующими уравнениями:

$$\dot{x}_1 = -a_1(x_1 - x_2) + a_2u_1,$$

$$\dot{x}_2 = a_1(x_1 - x_2) - a_3(x_2 - x_3) + a_4u_2,$$

$$\dot{x}_3 = a_3(x_2 - x_3) - a_5x_3,$$

$$y_1 = x_1 + d_1, \quad y_2 = x_2 + d_2,$$

где коэффициенты $a_1 \div a_5$ зависят от конструктивных особенностей объекта, $x_1 \div x_3$ – уровни жидкости в баках. Для простоты примем $L = 0$, а также $a_1 = ... = a_5 = 1$, что дает следующие матрицы:

$$F = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 1 & -2 & 1 \\ 0 & 2 & -2 \end{pmatrix}, \; G = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \; H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \; D_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \; D_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Начнем с более простого случая дефекта во втором датчике, для которого $D^0 = (1 \;\; 0)$, а уравнение (3) при $k = 1$ принимает вид $(M \quad -J_*)\begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} = 0$ и имеет решение $M = 1$, $J_* = (-1 \;\; 1)$. В результате $R_* = (1 \;\; 0)$, $\Phi = (1 \;\; 0 \;\; 0)$, $G_* = (1 \;\; 0)$ и модель (2) принимает вид

$$\dot{x}_* = -(H_1x - H_2x) + u_1,$$

$$y_* = x_* = y_1.$$

Поскольку $J_*D_2 = 1$ и $H_* = 1$, то можно принять $P = 1$ и $Q = 1$. Полагая $K = b > 0$, строим скользящий наблюдатель:

$$\dot{\hat{x}}_* = u_1 - (y_1 - y_2) - v - be_y,$$

$$\hat{y}_* = \hat{x}_*,$$

где $v(t) = \begin{cases} g\dfrac{e_y(t)}{\|e_y(t)\|}, & \text{если } e_y(t) \neq 0, \\ 0 \;\; \text{в противном случае,} \end{cases}$ $e_y(t) = \hat{y}_*(t) - R_*y(t) = \hat{y}_*(t) - y_1(t)$, $g > \|d_2(t)\|$. В результате функция $d_2(t)$ может быть оценена в виде $d_2(t) = g\dfrac{e_y(t)}{\|e_y(t)\| + \delta}$.

Можно показать, что для первого датчика этот метод неприменим из-за невыполнимости условия $PJ_*D = H_*^{\mathrm{T}}Q^{\mathrm{T}}$; эвристический подход с $x_{*1} = x_2$, $x_{*2} = x_3$ и $R_*y = y_2$ дает модель

$$\dot{x}_{*1} = H_1x - 2H_2x + x_{*2} + u_2,$$

$$\dot{x}_{*2} = 2y_2 - 2x_{*2},$$

$$y_* = x_{*1} = y_2,$$

которая удовлетворяет необходимым требованиям: измерение, подверженное дефектам, входит только в первую компоненту вектора $x_*(t)$, вторая компонента которого устойчива. Построим скользящий наблюдатель:

$$\dot{\hat{x}}_{*1} = y_1 - 2y_2 + \hat{x}_{*2} + u_2 - v - be_y,$$

$$\dot{\hat{x}}_{*2} = 2y_2 - 2\hat{x}_{*2},$$

$$\hat{y}_* = \hat{x}_{*1},$$

где $v(t) = \begin{cases} g\left\|J_{*1}D_1\right\| \dfrac{P_1 e_y(t)}{\left\|P_1 e_y(t)\right\|}, & \text{если } e_y(t) \neq 0, \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$ $e_y(t) = \hat{y}_*(t) - y_2(t)$, $e_y(t) = H_* e(t) = e_1(t)$,

$J_* = \begin{pmatrix} 1 & -2 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}$, $g > \left\|d_1(t)\right\|$. Так как $P_1 = 1$ и $J_{*1}D_1 = 1$, функция $d_1(t)$ может быть оценена в виде $d_1(t) = g\dfrac{e_y(t)}{\left\|e_y(t)\right\| + \delta}$.

В ходе моделирования использовались следующие управляющие воздействия: $u_1(t) = \sin(t)$, $u_2(t) = \sin(0{,}3t)$. Дефекты имитировались появлением сигнала $d_1(t) = \sin(\pi t/2 - \pi)$ на интервале времени 2-6 с и сигнала $d_2(t) = \sin(\pi t - 2\pi)$ на интервале 4-8 с.

На рис. 1 представлен график оценки функции $d_1(t)$, на рис. 2 – график ошибки идентификации $\Delta\, d_1(t)$ этой функции; видно, что она не превышает 1%. На рис. 3 представлен график оценки функции $d_2(t)$, ошибка ее идентификации также не превышает 1%. Из рисунков видно, что построенные наблюдатели обеспечивают достаточно точную оценку величин рассматриваемых функций.

Таким образом, результаты моделирования на примере идентификации типовых дефектов показали работоспособность и высокую эффективность предложенного метода робастного поиска и идентификации дефектов на основе скользящих наблюдателей.

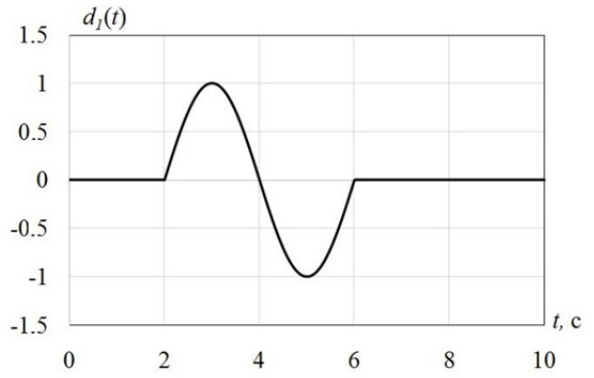


Рисунок 1 – Результат идентификации функции $d_1(t)$

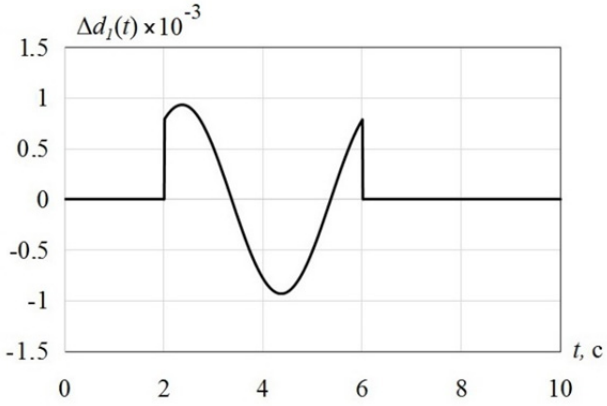


Рисунок 2 – Ошибка идентификации величины $d_1(t)$

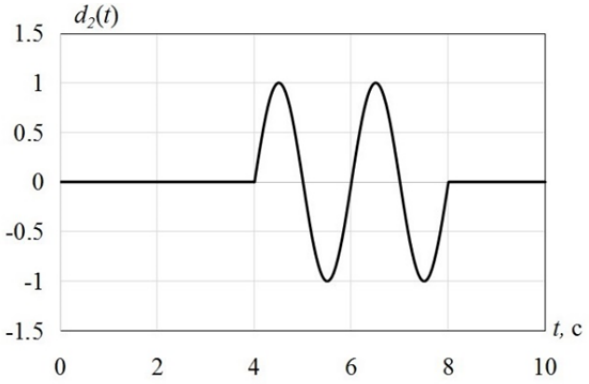


Рисунок 3 – Результат идентификации величины $d_2(t)$

В работе для решения задачи идентификации дефектов в датчиках МО использован метод на основе скользящих наблюдателей. Предложенная модификация этого метода позволила ослабить ограничения, накладываемые на условия его реализации, для решения указанных задач при наличии возмущений и уменьшить сложность средств диагностирования по сравнению с известными методами. Полученная оценка величины дефекта может быть использована для обеспечения свойства отказоустойчивости системы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект №18-79-00143.

Литература

1 Мироновский Л.А. Функциональное диагностирование динамических систем. М.-СПб.: МГУ-ГРИФ, 1998.

2 Edwards C., Spurgeon S., Patton R. Sliding Mode Observers for Fault Detection and Isolation // Automatica. 2000. V. 36. P. 541-553.

3 Floquet T., Barbot J., Perruquetti W., Djemai M. On the Robust Fault Detection via a Sliding Mode Disturbance Observer // International J. Control. 2004. V. 77. P. 622-629.

4 Yan X., Edwards C. Nonlinear Robust Fault Reconstruction and Estimation Using Sliding Mode Observers // Automatica. 2007. V. 43. P. 1605-1614.

5 He J., Zhang C. Fault Reconstruction Based on Sliding Mode Observer for Nonlinear Systems // Mathematical Problems in Engineering. 2012. V. 2012. ID 451843. P. 1-22.

6 Filaretov V., Zhirabok A., Protcenko A., Zuev A. Fault Identification in Nonlinear Dynamic Systems // Proc. 5th International Conference on Systems and Control. 2016. P. 273-277.

7 Alwi H., Edwards C. Fault Tolerant Control Using Sliding Modes with On-line Control Allocation // Automatica. 2008. V. 44. P. 1859-1866.

8 Filaretov V., Zhirabok A., Zuev A., Procenko A. Synthesis method of fault tolerant control system for manipulators // Advanced Materials Research. Vol. 717. 2013. P. 551-556.

9 Capisani L., Ferrara A., Ferreira de Loza A., Fridman L. Manipulator Fault Diagnosis via Higher Order Sliding-Mode Observers // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2012. Vol. 59. Iss. 10. P. 3979-3986.

10 Xia J., Guo Y., Dai B., Zhang X. Sensor Fault Diagnosis and System Reconfiguration Approach for an Electric Traction PWM Rectifier Based on Sliding Mode Observer // IEEE Transactions on Industry Applications. 2012. Vol. 59. Iss. 10. P. 4768-4778.

11 Жирабок А.Н., Шумский А.Е., Павлов С.В. Диагностирование линейных динамических систем непараметрическим методом // Автоматика и телемеханика. 2017. № 7. С. 3-21.

12 Zhirabok A.N., Shumsky A.E., Zuev A.V. Sliding Mode Observers for Fault Detection in Linear Dynamic Systems // IFAC-PapersOnLine. 2018. Vol. 51. Iss. 24. P. 1403-1408.

13 Жирабок А. Н., Шумский А. Е., Зуев А. В. Подход к диагностированию линейных систем на основе скользящих наблюдателей // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Том 18, №11. С. 728-733.

14 Жирабок А.Н., Зуев А.В., Шумский А.Е. Методы диагностирования линейных систем на основе скользящих наблюдателей // Известия РАН. Теория и системы управления. 2019. № 4. С. 120-136.

А.Ю. Коноплин[1,2], В.А. Денисов[2], Т.Н. Даутова[2], А.Л. Кузнецов[2], А.В. Московцева[2]

ТЕХНОЛОГИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТНПА ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ГЛУБОКОВОДНЫХ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ОПЕРАЦИЙ

[1]Институт проблем морских технологий ДВО РАН, Владивосток, [2]Национальный научный центр морской биологии им. А.В. Жирмунского ДВО РАН, Владивосток, konoplin@marine.febras.ru

Аннотация

Доклад посвящен технологии использования телеуправляемого необитаемого подводного аппарата (ТНПА) рабочего класса Comanche 18, позволяющей эффективно выполнять глубоководные исследовательские операции в условиях сильных придонных течений и сложного рельефа подводных гор. Приведены особенности планирования подводных работ, пилотирования ТНПА, организации погружений и взаимодействий с экипажем судна-носителя. Описаны созданные средства пробоотбора, обеспечивающие качественный сбор научного материала, а также разработанное программное обеспечение, предназначенное для интеллектуальной и информационной поддержки деятельности операторов ТНПА. Представлены результаты комплексных исследований экосистем океанических поднятий на примере гайотов и гор Императорского хребта (северная часть Тихого океана), выполненных с помощью ТНПА Comanche 18 в глубоководной научно-исследовательской экспедиции Национального научно-исследовательского центра морской биологии в Тихом океане в 2019 году.

Ключевые слова: телеуправляемый необитаемый подводный аппарат, глубоководные исследования, морская экспедиция, мониторинг морских донных экосистем, подводные операции, навигационный комплекс, программное обеспечение.

A.Yu. Konoplin[1,2], V.A. Denisov[2], T.N. Dautova[2], A.L. Kuznetsov[2], A.V. Moskovtseva[2]

TECHNOLOGY OF THE ROV USING FOR PERFORMING OF DEEP-WATER RESEARCH OPERATIONS

[1]Institute of Marine Technology Problems FEB RAS, Vladivostok, [2]National Scientific Center of Marine Biology named A.V. Zhirmunsky FEB RAS, Vladivostok, konoplin@marine.febras.ru

Abstract

The report is devoted to the technology of the working-class remotely operated underwater vehicle (ROV) Comanche 18 usage. This technology provides efficiently performing of deep-sea research operations in extreme conditions of strong bottom currents and complex topography of seamounts. Features of the underwater operations planning, ROV operating and interactions with control center on the carrier vessel are presented. Created sampling tools are described that provide high-quality collection of scientific material. The developed software designed for intellectual and informational support of ROV operators' activities of is also described. The report describes the results of comprehensive research of marine ecosystems of mountains of the Emperor Chain (northern part of the Pacific Ocean). These studies were carried out with the help of the ROV Comanche 18 in the deep-sea research expedition of the National Research Center for Marine Biology in the Pacific Ocean in 2019.

Key words: remotely operated underwater vehicle, deep-sea research, sea expedition, monitoring of marine bottom ecosystems, underwater operations, navigation system, software.

Бесконтактный мониторинг морских донных экосистем с использованием телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (ТНПА) являются одними из передовых методов глубоководных исследований настоящего времени. Эти аппараты незаменимы для картирования донных биоценозов и учета численности гидробионтов без их изъятия из экосистемы. Проведение комплексных биологических исследований уязвимых морских экосистем (совместно с гидрофизическими, геологическими и другими работами) в районе Императорского хребта необходимо для получения новых данных о состоянии биологических и других ресурсов северной части Тихого океана [1]. Это позволит внести существенный вклад как в работу Северо-Тихоокеанской Комиссии по рыболовству, так и в международное научное сотрудничество для решения большого ряда научных вопросов и продовольственно-ресурсных проблем в регионе.

Для достижения поставленных целей научных исследований с помощью ТНПА необходимо решать важные задачи обследования больших глубоководных полигонов. При этом требуется выполнять высококачественную видео и фотосъемку, профилирование, а также отбор проб воды, осадочных слоев грунта, образцов геологических пород и животных на всем протяжении маршрутов движения аппарата в условиях сложного рельефа подводных гор и сильных придонных течений.

Опыт экспедиционных работ Национального научного центра морской биологии ДВО РАН (ННЦМБ ДВО РАН) в Японском, Охотском и Беринговом морях с ТНПА рабочего класса Sub-Atlantic Comanche 18, базирующимся на НИС «Академик М.А. Лаврентьев», показал, что перемещение этого аппарата и его депрессора по глубоководным маршрутам является очень сложной задачей [2-4]. Операторам приходится принимать решения, анализируя большой объем информации и учитывая особенности сразу нескольких динамических объектов, а также условия выполнения подводных работ: течения, рельеф дна и желаемый маршрут перемещения ТНПА. При этом человеческий фактор может стать причиной снижения качества и увеличения времени выполнения научно-исследовательских подводных операций, не исключая даже аварийные ситуации.

В результате для решения обозначенной проблемы и эффективного выполнения глубоководных исследовательских операций в докладе предложена технология использования ТНПА [5], описанная на примере ТНПА рабочего класса Comanche 18, с помощью которого в 2019 году были выполнены комплексные исследования экосистем подводных гор Императорского хребта.

Оснащение ТНПА Comanche 18 пробоотборниками и программным обеспечением

Для выполнения глубоководных экспедиционных исследований ННЦМБ ДВО РАН используется серийный ТНПА рабочего класса Sub-Atlantic Comanche 18, спроектированный для выполнения осмотровых и технологических операций. Он оснащен фото- и видеоаппаратурой, гидролокационным оборудованием, профилографом, доплеровским лагом, а также набором датчиков, измеряющих параметры окружающей водной среды, что позволяет использовать этот аппарат для решения широкого круга исследовательских задач.

Кроме того, ТНПА Comanche 18 оборудован многозвенным манипулятором Schilling Orion 7P, способным с высокой точностью выполнять технологические манипуляционные операции. Но эффективный сбор научного материала невозможен без специальных контейнеров для образцов и пробоотборников, причем эти приспособления не должны загораживать обзор видео- и фотокамер, а также не осложнять управление ТНПА и манипулятором. Для решения этой проблемы был изготовлен «скид» (см. рис 1), имеющий форму короба и закрепляемый снизу на раме аппарата. Скид позволяет разместить держатель семи грунтоотборных трубок с обратными клапанами на верхних концах и контейнер для биологических образцов, которые выдвигаются в рабочее положение с помощью гидроцилиндров, подключенных к гидравлическому распределителю ТНПА. Гидроцилиндры дистанционно управляются посредством графического интерфейса оператора программы SubCAN. Использование выдвигающихся контейнеров позволяет собирать множество проб в процессе длительных погружений и неповрежденными доставлять их на поверхность.

Рисунок 1 – ТНПА Comanche 18, оборудованный скидом с пробоотборниками

Поскольку сбор схватом манипулятора очень подвижных, мелких и хрупких животных является сложной и не всегда решаемой задачей, для деликатного пробоотбора было изготовлено всасы-

вающее устройство [5], являющееся аналогом прибора слэп-ган. В основу этого устройства положен оснащенный пропеллером вращательный гидропривод, прокачивающий воду через герметичный контейнер, в котором животные удерживаются сетчатыми перегородками. Этот гидропривод также подключен к гидравлическому распределителю ТНПА и дистанционно управляется оператором. К другой стороне контейнера присоединен гофрированный шланг, конец которого закреплен на схвате манипулятора (см. рис. 1). Такое крепление позволяет легко чередовать способы сбора проб, например, отрывать схватом кораллы или актинии от камней и сразу же (навису) всасывать их через шланг в контейнер. С помощью созданного устройства удается собрать неповрежденными таких животных как: голотурии, офиуры, морские лилии, гидроидные и коралловые полипы и др. После завершения работы ТНПА контейнер извлекается из корпуса скида и отдается научной группе для разбора и фиксации отобранных проб.

Кроме того, для сбора двустворчатых моллюсков, мелких камней и сыпучего грунта были изготовлены сачки разных размеров, которые берутся схватом манипулятора и после отбора проб убираются в выдвигаемый контейнер скида. Для прицельного отбора проб воды из гидротермальных источников на втором манипуляторе Orion 4R закрепляются два батометра. Такое расположение позволяет подносить эти батометры к самому жерлу горячего источника [2]. Оснащение ТНПА Comanche 18 созданными устройствами пробоотбора позволило значительно повысить эффективность сбора научного материала.

Для обеспечения операторов ТНПА Comanche 18 наглядными рекомендациями и предупреждениями, формируемыми на основе информации, получаемой с различных датчиков, сенсоров и навигационных систем разных производителей, разработана система интеллектуальной поддержки деятельности операторов ТНПА [3, 7]. Эта система реализует алгоритмы управления согласованными перемещениями судна-носителя, ТНПА и его депрессора [8, 9]. Программная реализация указанной системы создана на основе подхода, предложенного в работе [4], при этом использованы современные средства среды .NET Framework и язык программирования C#, который позволяет эффективно разрабатывать высокопроизводительное многозадачное программное обеспечение для наиболее распространенных компьютеров под управлением ОС Windows 8, 8.1, 10.

Созданная система взаимодействует с маяками-ответчиками ТНПА и депрессора, обменивается данными с судовой навигационной системой, содержащей GPS и компас, а также - с гидроакустическим навигационным комплексом, имеющим ультракороткую базу Sonardyne Fusion. Это позволяет ей с помощью графического интерфейса оператора одновременно отображать на мониторе местоположение обеспечивающего судна-носителя и направление его движения, расположение депрессора относительно этого судна, а также маршрут движения ТНПА. Текущие данные, получаемые от датчиков и внешних устройств, сопоставляются с данными базы формализованных представлений безопасности: аварийное натяжение гибкого кабеля, сложный рельеф морского дна, возможный контакт депрессора с дном или ТНПА, выход ТНПА из желаемого сегмента его рабочей зоны и др. При этом выявляется возможность возникновения аварийных ситуаций, а также формируются рекомендации и сигналы для операторов.

Для удобства использования системы интеллектуальной поддержки деятельности операторов ТНПА реализована возможность сохранения карт, треков, целевых точек и маршрутов для дальнейшего предоставления заказчикам подводных работ, а также возможность их загрузки в систему для выполнения повторных погружений ТНПА с целью поиска и дополнительного обследования найденных ранее подводных объектов. Дополнительно была реализована возможность сохранения и загрузки состояний системы. Причем каждое изменение ее состояния: поступление различных данных, команды операторов ТНПА, сигнализация и т.п. автоматически сохраняются в файл. Эта возможность впоследствии позволяет анализировать процесс выполнения уже завершенных погружений ТНПА с целью выявления ошибок как в работе системы, так и в действиях операторов.

Особенности выполнения подводных работ

С 2011 г. ТНПА Comanche 18 прошел 7 экспедиций ННЦМБ ДВО РАН в Японском, Охотском и Беринговом морях, а также в Тихом океане (Императорский хребет) и провел под водой более 500 часов. За это время был накоплен большой опыт работы с ТНПА, и была выработана определенная технология выполнения подводных работ.

Перед погружением ТНПА в районе работ выполняются промеры судовым эхолотом, и на основе этих измерений строится уточненная карта глубин интересующих полигонов. Эта карта загружается в программу поддержки деятельности операторов и используется в процессе управления ТНПА. Проводится проверка работоспособности всех подсистем ТНПА и надводного управляющего комплекса.

После выхода судна в заданную точку полигона определяется возможность удержания судна в этой точке в условиях дрейфа, обусловленного ветром и течением. Если погодные условия позволяют судну удерживаться, то начинается спуск ТНПА в воду. Особенностью НИС «Академик М.А. Лаврентьев» является то, что гребной винт напрямую связан с главным двигателем, а регулировка скорости и направления движения судна осуществляется посредством поворота лопастей винта регулируемого шага. Запуск и остановка главного двигателя на НИС «Академик М.А. Лаврентьев» занимает 25-30 минут. При погружении ТНПА с вращающимся винтом есть опасность затягивания гибкого кабеля на лопасти этого винта, но при спуске с неработающим двигателем теряется много времени на возвращение судна в исходную точку, поскольку, как показала практика, судно может снести до 1.5 миль. Поэтому была выработана следующая методика спуска.

Кормовой П-рамой на жестком кабель-тросе опускается депрессор и погружается в воду на глубину 1-2 м. Затем с правого борта судна краном опускается сам аппарат и по поверхности отводится от судна за корму. Оператор наблюдает за перемещениями ТНПА с помощью палубной системы наружного видеонаблюдения. В процессе отхода ТНПА от борта судна гибкий кабель вручную выдается с палубы таким образом, чтобы не допустить слабины и попадания на вращающиеся лопасти винта. Когда ТНПА полностью вытягивает гибкий кабель, начинается одновременное заглубления аппарата и депрессора.

Взаимное расположение ТНПА и депрессора определяется с помощью установленных на них маяков гидроакустической навигационной системы с ультракороткой базой Sonardyne Fusion, антенна которой размещается и фиксируется в шахте кормовой лаборатории НИС «Академик М.А. Лаврентьев» с помощью изготовленной разборной штанги.

Использование ТНПА в гидробиологических целях предполагает его работу вблизи дна с посадками на грунт, при этом неизбежно поднимается ил и ухудшается видимость, что мешает фото и видеосъемке, а также пробоотбору. Поэтому необходимо планировать работу таким образом, чтобы ТНПА был сориентирован и перемещался против течения, не возвращаясь на отработанные места, особенно в условиях сильно заиленного грунта. Чтобы при всплытии ТНПА не взмучивал придонные слои воды, он должен иметь положительную плавучесть, то есть при отключении вертикальных движителей аппарат самостоятельно всплывает, в противном случае вертикальные движители поднимают облака мути. При движении над грунтом вертикальные движители ТНПА работают на прижим, то есть создают поток воды, идущий вверх, что способствует снижению взмучивания воды вблизи грунта. При планировании работы ТНПА в условиях подводных гор выбирается направление движения вверх по склону, поскольку основные сенсоры, видеокамеры, фонари и манипуляторы ТНПА расположены в его передней полусфере. Это позволяет устранять столкновения аппарата с дном, улучшить обзор зоны работ, а также выполнять операции с манипуляторами в режиме зависания ТНПА вблизи донной поверхности в случае большой крутизны склона и невозможности приземлить аппарат.

Работа с ТНПА требует тесного взаимодействия с экипажем судна – носителя. При перемещении аппарата к месту работы и одновременно к границам его рабочей зоны депрессор необходимо перемещать в сторону ТНПА, что требует передвижения судна. Кроме того, для исключения касаний дна депрессором и гибким кабелем, депрессор нужно удерживать выше ТНПА на некотором расстоянии, которое определяется экспериментально в зависимости от рельефа дна. Для осуществления этих операций налажена связь с мостиком судна и оператором спускоподъемного устройства (лебедки), на котором находится жесткий кабель. В процессе управления перемещениями ТНПА вблизи донной поверхности с поста управления аппаратом даются необходимые команды экипажу судна-носителя для перемещения этого судна в заданном направлении на заданное расстояние, а также команды на подъем или опускание депрессора с помощью лебедки.

НИС «Академик М.А. Лаврентьев» имеет ограниченные средства позиционирования (главный двигатель и носовое подруливающее устройство), при этом многолетний опыт экспедиционных работ показал, что даже в условиях ограниченной маневренности таких судов все же возможно перемещение депрессора ТНПА с точностью, достаточной для выполнения исследовательских операций [2, 3]. Однако в условиях течений и при воздействиях сильного ветра даже под управлением опытного экипажа обеспечивающего судна без точной системы его динамического позиционирования могут возникать существенные трудности перемещения депрессора в направлении ТНПА. В указанной ситуации целесообразно задавать желаемые направление и скорость движения судна и перемещать ТНПА вслед за этим судном, таким образом, чтобы он все время находился в передней полусфере своей рабочей зоны, то есть перед депрессором. Такое взаиморасположение ТНПА и его депрессора дает возможность аппарату остановиться вблизи обнаруживаемых объектов и успевать выполнять заданные операции, не требуя моментальной остановки судна-

носителя. Кроме того, при движениях вверх по склону указанное взаиморасположение позволяет избежать запутывания гибкого кабеля и соударений депрессора с дном.

После окончания подводных работ дается команда на всплытие ТНПА, лебедка поднимает депрессор, наматывая жесткий кабель, при этом оператор регулирует скорость всплытия аппарата его вертикальными движителями. Начинается процедура остановки главного двигателя судна, чтобы при достижении депрессором глубины 80-100 м лопасти винта не вращались. После остановки двигателя депрессор поднимается на палубу, а ТНПА своим ходом перемещается в зону захвата судового крана, при этом на палубу выбирается слабина гибкого кабеля. При подходе к борту на ТНПА вешается замок – фиксатор, и аппарат поднимается на борт, спускоподъемная команда обеспечивает безопасный спуск на палубу. Сразу после спуска на палубу проводится проверка работы ТНПА, затем раздается добытый научный материал, аппарат опресняется, раскрепляется, и судно готовится к переходу к новому месту работы.

Результаты экспедиционных исследований

Предложенные технологические решения были использованы в глубоководной научно-исследовательской экспедиции ННЦМБ ДВО РАН, при участии Института проблем морских технологий ДВО РАН, по исследованию подводных гор и гайотов Императорского хребта (северо-западная часть Тихого океана) на НИС «Академик М. Лаврентьев» (рейс № 86) в июле–августе 2019 года. Целью этой экспедиции являлось комплексное исследование экосистем океанических поднятий с помощью ТНПА Comanche 18. В ходе 19 рабочих погружений аппарата было впервые проведено комплексное исследование глубоководных экосистем подводных гор, распределение типичных подводных ландшафтов и ключевых обитателей уязвимых морских экосистем вершин и верхней части склонов подводных гор Коко, Джингу, Оджин и Нинтоку в диапазоне глубин от 338 до 2182 м.

Всего в процессе решения задач экспедиции ТНПА провел 52 часа вблизи дна при выполнении подводных работ. Получено 1789 высококачественных фотографий разрешением 5Мп и 49 часов видеозаписей глубоководных экосистем в формате Full HD. С помощью установленных на ТНПА Comanche 18 многозвенного манипулятора Schilling Orion 7P и специальных пробоотборников выполнено 158 станций для отбора бентосных организмов, донных осадков и образцов геологических пород, при этом было отобрано 679 отдельных проб животных (см. рис. 2). В ходе экспедиции было отобрано и законсервировано 253 пробы уникальных биобразцов, которые будут снабжены обширным информационным паспортом, размещенным на сайте «Морского биобанка» (http://marbank.dvo.ru), и будут перспективным материалом для дальнейших исследований, а также качественным референсным материалом.

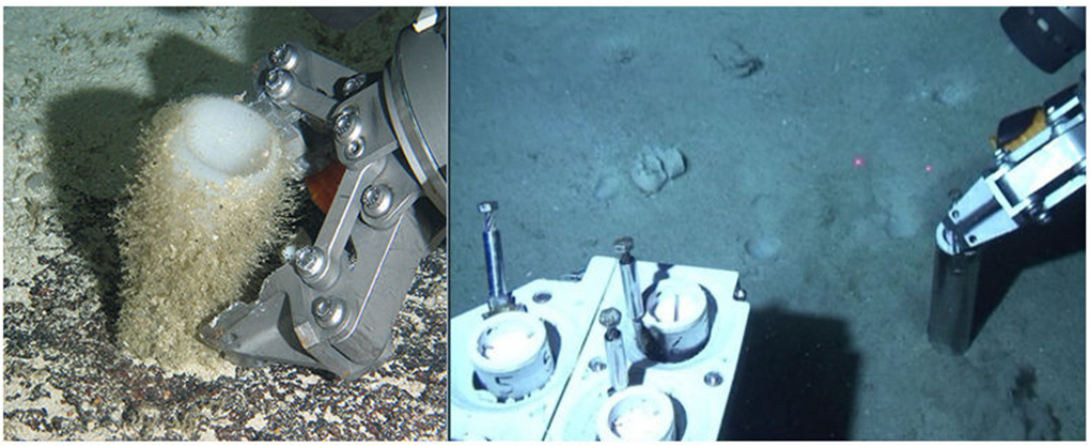


Рисунок 2 – Отбор проб манипулятором ТНПА

В результате применения ТНПА было впервые изучено биоразнообразие и распределение кораллов Octocorallia и губок Hexactinellidae, значительно расширен список родов морских перьев Pennatulacea Императорского хребта, сделаны уникальные и важные для биогеографии находки видов-индикаторов уязвимых морских экосистем. Получены новые данные о биоразнообразии макробентоса исследованной группы подводных гор и гайотов. Впервые показано изменение фауны кораллов в широтном направлении в районе Императорского хребта [1]. Использование ТНПА не только обеспечило щадящий бесконтактый мониторинг донных сообществ, но и увеличило возможности целенаправленного сбора донных организмов. Необходимо отметить, что исследова-

ния показали как перспективность фаунистических и биогеографических исследований в данном районе, так и крайне малую степень его изученности.

Результаты экспедиционных работ показали, что предложенная технология использования ТНПА рабочего класса Comanche 18 позволяет этому аппарату успешно решать поставленные научно-исследовательские задачи обследования больших глубоководных полигонов. При этом на всем протяжении маршрутов движения аппарата в условиях сложного рельефа подводных гор и сильных придонных течений качественно выполнялись операции: видео и фотосъемка; съемка гидролокатором кругового обзора; профилирование; отбор проб воды; отбор осадочных слоев грунта; отбор образцов геологических пород; отбор животных.

Выражаем благодарность капитану В.Б. Птушкину и экипажу НИС «Академик М.А. Лаврентьев» за высокопрофессиональное обеспечение глубоководных работ ТНПА. Мы благодарим коллектив Отдела глубоководного оборудования ННЦМБ ДВО РАН за оснащение ТНПА Comanche 18 устройствами для пробоотбора и успешное выполнение сложных подводных операций этим аппаратом. Также выражаем благодарность Н.Ю. Коноплину за программную реализацию системы поддержки деятельности операторов ТНПА.

Разработка и программная реализация системы интеллектуальной поддержки деятельности операторов ТНПА выполнены при финансовой поддержке РНФ (проект №17-79-10064). Алгоритмы управления согласованными перемещениями ТНПА и депрессора разработаны при финансовой поддержке РФФИ (проекты 16-29-04195 офи м и 18-08-01204 а). Тестирование программного обеспечения системы выполнено при финансовой поддержке программы Президиума РАН №7 «Новые разработки в перспективных направлениях энергетики, механики и робототехники». Экспедиция ННЦМБ ДВО РАН на борту НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (июль - август 2019 г.) профинансирована Минобрнауки России.

Литературра

1 Даутова Т.Н., Галкин С.В., Табачник К.Р., Минин К.В., Киреев П.А., Московцева А.В, Адрианов А.В. Первые сведения о структуре уязвимых морских экосистем Императорского хребта – индикаторные таксоны, ландшафты, биогеография // Биология моря. 2019. Т.45. №6. С.374-383

2 Галкин С. В., Виноградов Г. М. Видим дно! // Природа. 2019. №. 6. С. 16–22.

3 Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю., Коноплин Н.Ю. Разработка и натурные испытания системы интеллектуальной поддержки деятельности операторов ТНПА // Подводные исследования и робототехника. 2018. №2 (26). С. 12-20.

4 Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю., Коноплин Н.Ю. Подход к разработке информационно-управляющей системы для телеуправляемых подводных аппаратов // Подводные исследования и робототехника. 2017. № 1(23). С. 44-49.

5 Коноплин А.Ю., Денисов В.А., Даутова Т.Н., Кузнецов А.Л., Московцева А.В. Технология использования ТНПА для комплексного исследования глубоководных экосистем // Подводные исследования и робототехника. 2019. №4 (30). С. 4-12.

6 Денисов В.А., Серинов Ю.М. Устройство для сбора гидробионтов с помощью водного потока // Патент России № 88511. 2009. Бюл. № 32.

7 Filaretov V.F., Konoplin A.Yu., Konoplin N.Yu. Development of Intellectual Support System for ROV Operators // IOP Conference Series Earth and Environmental Science, Vol.272 (032101), 2019. DOI: 10.1088/1755-1315/272/3/032101.

8 Vladimir Filaretov, Alexander Konoplin, Nikita Konoplin. System for cooperative movements of ROV and its supporting vessel // Proceedings of the 28th DAAAM International Symp. Zadar, Croatia. 2017. P. 0513-0516.

9 Коноплин А.Ю. Разработка алгоритмов управления перемещениями ТНПА и блоком-заглубителем // Сборник трудов IX Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Робототехника и искусственный интеллект». Железногорск, Россия. 2018. С. 44-49.

В.Ф. Филаретов[1,2], А.Ю. Коноплин[1,3], А.В. Зуев[1,3], Н.А. Красавин[2,3]

СИСТЕМА ВЫСОКОТОЧНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯМИ ПОДВОДНОГО МАНИПУЛЯТОРА

[1]Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, [2]Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, [3]Институт проблем морских технологий ДВО РАН, Владивосток, konoplin@marine.febras.ru

Аннотация

В докладе рассмотрено решение задачи синтеза комбинированной системы, обеспечивающей высокоточное управление перемещениями рабочих органов многозвенных манипуляторов, установленных на подводных аппаратах. Предложенная система за счет введения самонастраивающихся корректирующих устройств электроприводов манипуляторов компенсирует негативные взаимовлияния между степенями подвижности многозвенника, возникающие при его перемещениях с высокой скоростью в водной среде, а также моменты сухого и вязкого трений в этих приводах. Поскольку с помощью рекуррентного алгоритма решения обратной задачи динамики невозможно точно определить параметры силового воздействия вязкой среды на движущиеся звенья манипуляторов, то в используемые системы управления предложено вводить дополнительные наблюдатели для идентификации и последующей компенсации неучтенных внешних моментов на валах соответствующих электроприводов. Выполнено численное моделирование работы синтезированной системы, позволяющей значительно повысить точность выполнения в пространстве различных технологических операций.

Ключевые слова: подводный многозвенный манипулятор, подводный аппарат, идентификация, высокая точность, наблюдатель.

V.F. Filaretov[1,2], A.Yu. Konoplin[1,3], A.V. Zuev[1,3], N.A. Krasavin[2,3]

SYSTEM OF HIGH-PRECISION MOVEMENTS CONTROL OF UNDERWATER MANIPULATOR

[1]Institute for Automation and Control Processes, FEB RAS, Vladivostok, [2]Far Eastern Federal University, Vladivostok, [3]Institute of Marine Technology Problems FEB RAS, Vladivostok, konoplin@marine.febras.ru

Abstract

The paper deals with synthesis of system of high-precision movements control of underwater manipulator mounted on underwater vehicle. Described control system allows to compensate negative torques in joints of the manipulator which appear due to high-speed movements of underwater manipulators in fluid environment, and due to dry friction and viscous friction moments in link's electric drive units. This task is achieved due to using of self-adjusting corrective devices of manipulator's electric drive units. Because of recurrent algorithm for solving the inverse problem of dynamics doesn't allow to accurately determine effects of a viscous friction influence on manipulator's moving links, here is suggested to use observers to determine and then take into account unaccounted moments for each manipulator's electric drive unit. Numerical simulation of synthesized system was performed. It showed that described system significantly improves dynamic accuracy of high-speed movement of the manipulator's gripper.

Key words: underwater multilink manipulator, underwater vehicle, identification, high-precision, observer.

Решение проблемы высокоточного управления многозвенными манипуляторами (ММ), установленными на подводных аппаратах, необходимо для расширения областей применения подводной робототехники при выполнении конкретных рабочих операций. Эта проблема обусловлена тем, что на движущиеся звенья ММ оказываются значительные и трудно определяемые динамические воздействия со стороны окружающей водной среды [1, 2], изменяющие параметры объектов управления. Это существенно снижает точность перемещения рабочих инструментов при выполнении манипуляционных работ.

В настоящее время известен рекуррентный алгоритм [1] решения обратной задачи динамики (ОЗД) для расчета в реальном масштабе времени взаимовлияний между степенями подвижности подводных ММ и иных внешних воздействий со стороны вязкой среды. Однако точность аналитического расчета этих взаимовлияний и воздействий невелика по причине большой сложности точного априорного определения параметров воздействий вязкой среды на все звенья ММ и величин присоединенных к этим звеньям масс жидкости. При этом манипуляторы часто перемещают подводные объекты с априорно неизвестными параметрами. Кроме того, в процессе эксплуатации подводных ММ может происходить непредвиденное увеличение моментов вязкого и сухого трений в используемых электроприводах (из-за изменения свойств и загрязнений смазки, трений в герметизирующих разъемах и т.п.). В результате на выходных валах приводов ММ возникают дополнительные переменные моменты, которые невозможно определить, используя только расчеты, полученные с помощью алгоритма решения ОЗД.

Идентификация внешних моментов на выходных валах электроприводов ММ возможна с использованием фильтра Калмана [3] и диагностических наблюдателей [4-6]. Но фильтры Калмана в основном применимы для линейных систем с постоянными или медленно изменяющимися параметрами и внешними воздействиями. Поэтому они не могут быть эффективно использованы для идентификации быстро изменяющихся внешних моментов в приводах подводных ММ, описываемых сложными нелинейными дифференциальными уравнениями с существенно и быстро изменяющимися параметрами. В отличие от фильтров специальные диагностические наблюдатели позволяют не только обнаруживать появления неучтенных моментов на выходных валах приводов ММ, но и определять их величины. Но, как показали исследования, точность их работы во многом определяется величинами идентифицируемых функций. В подводных ММ параметры их приводов и внешних воздействий могут изменяться в больших диапазонах (особенно при их быстрых перемещениях), что в конечном итоге приводит к значительным ошибкам идентификации и, как следствие, к существенному снижению точности движения рабочих органов (РО) манипуляторов по предписанным траекториям.

В докладе поставлена и решена задача разработки нового метода синтеза комбинированных систем высокоточного управления перемещениями РО подводных ММ. Этот метод содержит три этапа. На первом с помощью рекуррентного алгоритма [1] решения ОЗД выполняется аналитический расчет моментов, возникающих во всех степенях подвижности ММ при их движении в водной среде. Поскольку этот расчет является весьма приближенным по причине сложности точного описания и определения параметров взаимодействия всех звеньев ММ и груза с водной средой, то на втором этапе с использованием динамических моделей электроприводов каждой степени подвижности ММ, включающих приближенно рассчитанные на первом этапе внешние моменты, по известной процедуре, описанной в работах [5, 6], строятся дополнительные диагностические наблюдатели. Эти наблюдатели за счет использования формируемой ими невязки не только обнаруживают факт появления дополнительных (неучтенных) моментов, обусловленных переменным взаимодействием движущегося ММ с вязкой средой, но и достаточно точно определяют их величину, а также величины непредвиденных изменения моментов вязкого и сухого трения в самих электроприводах. Все определенные на первом и втором этапах внешние моментные воздействия на электроприводы всех степеней подвижности ММ на третьем этапе компенсируются с помощью синтезированных самонастраивающихся корректирующих устройств (СКУ) [7], обеспечивая их точную стабилизацию на номинальном уровне.

Для вычисления и последующей компенсации негативных взаимовлияний между всеми степенями подвижности ММ, возникающих при его перемещениях с произвольной скоростью в водной среде, можно использовать рекуррентный алгоритм решения ОЗД [1], в котором полагается, что каждая элементарная часть звена i ММ длиной δh_i^* может иметь различную скорость движения относительно покоящейся жидкости не только по величине, но и по направлению. Кроме того, сила, действующая на эту элементарную часть со стороны вязкой среды, может иметь линейную или квадратичную зависимости от величины скорости движения этой части в водной среде. Поэтому каждое звено n – степенного манипулятора в предложенном алгоритме разбито на N элементарных частей, а суммарная сила, действующая на звено i, определяется как сумма сил, приложенных к каждой элементарной части $j = \overline{1,N}$ этого звена.

Алгоритм решения ОЗД для подводного ММ имеет вид [1]:

$$\omega_i = A_i^{i-1} \cdot \omega_{i-1} + e_i \cdot \dot{q}_i \cdot \bar{\sigma}_i, \omega_0 = \omega_0^*, i = \overline{1,n};$$

$$\dot{\omega}_i = A_i^{i-1} \cdot \dot{\omega}_{i-1} + \left[\left(A_i^{i-1} \cdot \omega_{i-1}\right) \times e_i \cdot \dot{q}_i + e_i \cdot \ddot{q}_i\right] \cdot \bar{\sigma}_i, \dot{\omega}_0 = \dot{\omega}_0^*, i = \overline{1,n};$$

$$\ddot{P}_i' = A_i^{i-1} \cdot \left(\ddot{P}_{i-1}' + \delta_{i-1} \cdot p_{i-1}^*\right) + \left(2 \cdot \dot{q}_i \cdot \omega_i \times e_i + \ddot{q}_i \cdot e_i\right) \cdot \sigma_i, \ddot{P}_0' = P_0'^*, i = \overline{1,n};$$

$$\ddot{r}_{mi} = \ddot{P}_i' + \delta_i \cdot r_i^*, i = \overline{1,n};$$

$$\mathrm{v}_i = A_i^{i-1} \cdot (\mathrm{v}_{i-1} + \omega_{i-1} \times p_{i-1}^*), \mathrm{v}_1 = \mathrm{v}_0, i = \overline{2,n};$$

$$\mathrm{v}_{Ai} = \mathrm{v}_i + \omega_i \times r_i^*, \varphi_i = \text{?r??os}\frac{\mathrm{v}_{Ai} \cdot p_i^*}{|\mathrm{v}_{Ai}| \cdot |p_i^*|}, i = \overline{1,n};$$

$$\alpha_i^* = \text{?r??os}\frac{\mathrm{v}_i \cdot p_i^*}{|\mathrm{v}_i| \cdot |p_i^*|}, \beta_i^* = \text{?r??os}\frac{\omega_i \cdot p_i^*}{|\omega_i| \cdot |p_i^*|}, i = \overline{1,n};$$

$$r_{pi} = r_i^* + K_{Ai} \cdot \mathrm{v}_{Ai}, i = \overline{1,n};$$

$$\mathrm{v}_j^* = \mathrm{v}_i + \omega_i \times h_j^*, \omega_{Li} = |\omega_i| e_{Li} \text{?os}\,\beta_i^*, i = \overline{1,n}, j = \overline{1,N};$$

$$\mathrm{v}_{Li}^* = |\mathrm{v}_i| e_{Li} \text{?os}\,\alpha_i^*, \mathrm{v}_{pj}^* = \mathrm{v}_j^* - \mathrm{v}_{Li}^*, i = \overline{2,n}, j = \overline{1,N};$$

$$\mathrm{Re}_{Li} = \frac{\rho \mathrm{v}_{Li}^* l_i}{\eta}, i = \overline{n,1};$$

если $\mathrm{Re}_{Li} \le 10^3$, то $F_{RLi} = k_{Li} \eta \mathrm{v}_{Li}^*, i = \overline{n,1};$

если $\mathrm{Re}_{Li} > 10^3$, то $F_{RLi} = \frac{1}{2} \rho k_{Li} s_i {\mathrm{v}_{Li}^*}^2, i = \overline{n,1};$

$$\mathrm{Re}_{pj} = \frac{\rho \mathrm{v}_{pj}^* r_i}{\eta}, i = \overline{n,1}, j = \overline{1,N};$$

если $\mathrm{Re}_{pj} \le 10^3$, то $F_{Rpj} = k_i^* \eta \mathrm{v}_{pj}^*, i = \overline{n,1}, j = \overline{1,N};$

если $\mathrm{Re}_{pj} > 10^3$, то $F_{Rpj} = \frac{1}{2} \rho k_i^* r_i \delta h_i^* {\mathrm{v}_{pj}^*}^2, i = \overline{n,1}, j = \overline{1,N};$

$$F_{Rpi} = \sum_{j=1}^{N} F_{Rpj}, i = \overline{n,1}, j = \overline{1,N}; \qquad M_{Rpj} = h_j^* \times F_{Rpj}, j = \overline{1,N};$$

$$M_{Rpi} = \sum_{j=1}^{N} M_{Rpj}, i = \overline{n,1}, j = \overline{1,N}; \qquad M_{Li} = k_{Li}^* \eta r_i \omega_{Li}, i = \overline{n,1};$$

$$F_i = A_i^{i+1} \cdot F_{i+1} + (m_i + \Pi_{mi}) \cdot \ddot{r}_{mi} + F_{RLi} + F_{Rpi}, F_{n+1} = 0, i = \overline{n,1};$$

$$M_i = A_i^{i+1} \cdot M_{i+1} + p_i^* \times \left(A_i^{i+1} \cdot F_{i+1}\right) + r_i^* \times (m_i \cdot \ddot{r}_{mi}) + r_{pi} \times (\Pi_{mi} \cdot \ddot{r}_{mi}) + (\tau_i + T_i) \cdot \dot{\omega}_i + \omega_i \times$$
$$\times \left((\tau_i + T_i) \cdot \omega_i\right) + M_{Rpi} + M_{Li}, M_{n+1} = 0, i = \overline{n,1};$$

где $\delta_i = \begin{bmatrix} -\left(\omega_{i(2)}^2 + \omega_{i(3)}^2\right) & \omega_{i(1)} \cdot \omega_{i(2)} - \dot{\omega}_{i(3)} & \omega_{i(1)} \cdot \omega_{i(3)} + \dot{\omega}_{i(2)} \\ \omega_{i(1)} \cdot \omega_{i(2)} + \dot{\omega}_{i(3)} & -\left(\omega_{i(1)}^2 + \omega_{i(3)}^2\right) & \omega_{i(2)} \cdot \omega_{i(3)} - \dot{\omega}_{i(1)} \\ \omega_{i(1)} \cdot \omega_{i(3)} - \dot{\omega}_{i(2)} & \omega_{i(2)} \cdot \omega_{i(3)} + \dot{\omega}_{i(1)} & -\left(\omega_{i(1)}^2 + \omega_{i(2)}^2\right) \end{bmatrix}$ (нижний индекс в круглых скобках указывает на номер в соответствующих векторах); $\mathrm{v}_i \in R^3$ – линейная скорость движения шарнира i; $\omega_i \in R^3$ – угловая скорость вращения звена i; $p_i^* \in R^3$ – вектор, совпадающий с продольной осью звена i, определяющий положение шарнира $(i+1)$ относительно шарнира i; $e_{Li} \in R^3$ – единичный вектор, направленный вдоль продольной оси звена i; $h_i^* \in R^3$ – вектор, определяющий центр масс элементарной части j звена i длиной δh_j^* относительно шарнира i; l_i и r_i – соответственно, длина и радиус звена i; A_i^{i-1} – матрица перевода векторов из $(i-1)$-й в -ю систему координат; $e_i = (0\ 0\ 1)^T$ – единичный вектор, направленный вдоль оси шарнира i; $\mathrm{v}_0 \in R^3$ – линейная скорость точки крепления ММ к подводному аппарату, $\omega_i^* \in R^3$ – угловая скорость вращения аппарата; q_i – обобщенная координата i ММ; $\mathrm{v}_j^* \in R^3$ – вектор линейной скорости движения центра масс каждого элемента j звена i; $\mathrm{v}_{Li}^* \in R^3$ и $\mathrm{v}_{pj}^* \in R^3$ – соответственно продольная и поперечная составляющие вектора v_j^*; Re_{Li} и Re_{pj} – соответственно числа Рейнольдса при движении звеньев ММ параллельно и перпендикулярно их продольным осям; ρ и η – соответ-

ственно плотность и вязкость жидкости; k_{Li}^*, k_i^* и k_{Li} – экспериментально определяемые КВТ; s_i – площадь основания цилиндрического звена i; $F_{Rpj} \in R^3$ – составляющая силы вязкого трения, действующая на соответствующую элементарную часть j звена i, направленная перпендикулярно продольной оси этого звена; $F_{RLi} \in R^3$ – составляющая силы вязкого трения, направленная вдоль продольной оси звена i ММ; $M_{Rpj} \in R^3$ – момент, создаваемый силой F_{Rpj}; $F_{Rpi} \in R^3$ – суммарная сила, создаваемая силами F_{Rpj}; $M_{Rpi} \in R^3$ – момент, создаваемый силой F_{Rpi}; $\mathrm{v}_{Ai} \in R^3$ – линейная скорость центра величины звена i; $\sigma_i = 1$, если шарнир i поступательный и $\sigma_i = 0$, если он вращательный ($\bar{\sigma}_i = 1 - \sigma_i$); m_i – масса звена i; $\dot{\omega}_i \in R^3$ – угловое ускорение звена i; $\omega_{Li} \in R^3$ – составляющая угловой скорости ω_i, параллельная продольной оси звена i; $M_{Li} \in R^3$ – момент, создаваемый вращением звена i со скоростью ω_{Li}; Π_{mi} – присоединенные к звену i массы жидкости; $\ddot{r}_{mi} \in R^3$ – линейное ускорение центра масс звена i; $r_{pi} \in R^3$ – вектор, задающий положение центра массы Π_{mi} относительно шарнира i; r_i^* - вектор, задающий положение центра масс звена i относительно шарнира i; K_{Ai} - параметр, зависящий от $|\mathrm{v}_{Ai}|$ и угла φ_i; $\tau_i \in R^{3\times3}$ – тензор инерции звена i относительно его центра масс; $T_i \in R^{3\times3}$ – тензор инерции массы жидкости, присоединенной к звену i; $F_i, M_i \in R^3$ –сила и момент этой силы, действующие в шарнире i, соответственно; $P_0'^* = -g + \ddot{P}'_{\text{ПА}}$, если центры масс всех звеньев ММ не совпадают с их центрами величины; $P_0'^* = g\left(\frac{w_i}{m_i} - 1\right) + \ddot{P}'_{\text{ПА}}$, если центры масс всех звеньев совпадают с их центрами величины; $\ddot{P}'_{\text{ПА}} \in R^3$ – линейное ускорение основания ММ; g – ускорение свободного падения тела; w_i – масса жидкости, вытесненной звеном i; $(\times)$ и $(\cdot)$ – соответственно, векторное и скалярное произведения векторов.

В результате рассчитанный внешний момент P_i, действующий на выходной вал редуктора i-го электропривода ММ, будет определяться равенством $P_i = M_{i(3)}$, где нижний индекс 3 в круглых скобках указывает на номер элемента в соответствующем векторе M_i. Далее для простоты введенных обозначений индексы i, обозначающие номер соответствующей степени подвижности ММ, будем опускать.

Как было отмечено выше, точное априорное определение параметров ММ, их приводов и вязкой среды, а тем более перемещаемых объектов практически всегда затруднено. Кроме того, в процессе выполнения работ может происходить их непредвиденное изменение. В результате не удается обеспечивать качественное управление ММ, используя только приведенный выше алгоритм решения ОЗД. Для более точного определения особенностей внешнего воздействия на электроприводы ММ на втором этапе следует синтезировать и использовать дополнительные диагностические наблюдатели, рассмотренные ниже.

Уравнения электроприводов подводных ММ с учетом введения фазовых координат $x_1(t) = q(t)$, $x_2(t) = \dot{\alpha}(t)$, $x_3(t) = I(t)$, измеряемых соответствующими датчиками, и рассчитанного выше значения P, можно представить в матричном виде

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + G\big(x_2(t), P^*(t)\big) + Dd(t), \qquad (1)$$

где $A = \begin{bmatrix} 0 & 1/i_{\text{р}} & 0 \\ 0 & -k_{\text{в}}/J_\Sigma & k_{\text{м}}/J_\Sigma \\ 0 & -k_\omega/L & -R/L \end{bmatrix}$; $x(t) = \begin{bmatrix} q(t) \\ \dot{\alpha}(t) \\ I(t) \end{bmatrix}$; $B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ k_{\text{у}}/L \end{bmatrix}$; $\mathrm{G}(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{-M_{\text{стр}}(x_2(t)) - P^*(t)}{J_\Sigma} \\ 0 \end{bmatrix}$; $D = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$;

$q(t)$ – угол поворота выходного вала редуктора электропривода; $\dot{\alpha}(t)$ – скорость вращения ротора электродвигателя; R, L, $I(t)$ – активное сопротивление, индуктивность и ток цепи якоря соответственно; k_ω, $k_{\text{м}}$, $k_{\text{у}}$ – коэффициенты противо-э.д.с., крутящего момента и усиления усилителя; $u(t)$ – входное напряжение; J_Σ – момент инерции ротора электродвигателя и вращающихся частей редуктора, приведенный в этому ротору; $k_{\text{в}}$ – номинальный коэффициент вязкого трения; $M_{\text{стр}}$ – номинальный момент сухого трения электродвигателя и редуктора; $M_{\text{стр}} = \begin{cases} M_{\text{тр}} sign(x_2(t)), \text{ при } x_2(t) \neq 0 \\ 0, \text{ при } x_2(t) = 0 \end{cases}$; $M_{\text{тр}}$ – величина момента сухого трения движения; $P^*(t) = P/i_{\text{р}}$ – момент P, приведенный к ротору; $i_{\text{р}}$ – передаточное отношение редуктора.

В уравнении (1) функция $d(t)$ определяет неизвестное суммарное моментное воздействие, описываемое выражением

$$d(t) = -\frac{1}{J_\Sigma}\big[\tilde{k}_{\text{в}} x_2(t) + \widetilde{M}_{\text{стр}}\big(x_2(t)\big) + \tilde{P}^*(t)\big],$$

где $\tilde{k}_{\text{в}}$, $\widetilde{M}_{\text{стр}}(x_2(t))$, $\tilde{P}^*(t)$ – величины отклонений коэффициента вязкого трения и момента сухого трения от своих номинальных значений, а также $\tilde{P}^*(t)$ от рассчитанного значения $P^*(t)$, соответственно.

Для идентификации величины $d(t)$ можно использовать диагностические наблюдатели, синтезированные с помощью известных методов, описанных в работах [5, 6]. Уравнение искомого наблюдателя удобно представить в виде

$$\dot{x_*}(t) = A_* x_*(t) + B_* u(t) + G_* + J_* y(t) - k e_y(t) + D_* v(t), \quad (J_* \in R^3), \quad (2)$$

где символом «*» снизу отмечены матрицы и векторы, описывающие рассматриваемый наблюдатель, элементы которых отличаются от соответствующих элементов матриц и векторов моделей приводов (2); k – положительная константа; $e_y(t) = \Phi \text{x}(t) - \text{x}_*(t) \in R^3$– невязка, которая позволяет установить отличия параметров соответствующих электроприводов ММ от их номинальных значений в системе (2) (при $e_y(t) \neq 0$ и $d(t) \neq 0$); $\Phi \in R^3$– вектор, подлежащий определению; функция $v(t)$ имеет вид

$v(t) = \begin{cases} -g_* \frac{e_y(t)}{|e_y(t)|}, \text{если } e_y(t) \neq 0, \\ 0 \text{ в противном случае,} \end{cases}$, g^* – положительная константа.

При синтезе наблюдателя, определяющего появление в системе (1) ненулевой функции $d(t)$, следует определить матрицы A_*, B_* и векторы J_*, Ф. Вводя известное условие [6] ФD ≠ 0 чувствительности невязки к $d(t)$, вектор Ф можно сформировать в виде $\Phi = [0\ 1\ 0]$.

Задачу построения диагностических наблюдателей целесообразно решать в канонической форме Кронекера [6]. В этом случае с учетом размерности синтезируемых наблюдателей справедливо равенство A_*= 0. С учетом этого равенства и справедливости соотношений $J_* = \Phi A$, $B_* = \Phi B$, $G_* = \Phi G$, $D_* = \Phi D$ [6] искомый наблюдатель может быть описан уравнением

$$\dot{x}_*(t) = -\frac{k_{\text{в}}}{J_\Sigma}\dot{\alpha}(t) + \frac{k_{\text{м}}}{J_\Sigma} I(t) - \frac{M_{\text{стр}}(x_2(t))}{J_\Sigma} - \frac{P^*(t)}{J_\Sigma} - k e_y(t) + v(t). \quad (3)$$

Известно [5], что при выборе $g_* > |d(t)|$ наблюдатель (3) сходится асимптотически, т.е. ошибка оценивания $e_y(t) = \Phi x(t) - x_*(t) \to 0$ при $t \to \infty$. При этом величина $d(t)$ может быть оценена с высокой точностью при использовании фильтра низких частот [8]: $\hat{d}(t) = v_{\text{э}}(t)$, где $\hat{d}(t)$ - полученная наблюдателем (3) оценка функции $d(t)$; $v_{\text{э}}(t)$ – величина функции $v(t)$, пропущенная через фильтр низких частот.

Таким образом, использование дополнительных наблюдателей (4) для электроприводов каждой степени подвижности ММ обеспечивает обнаружение и оценку величин неучтенных моментов, появляющихся ввиду неточности расчета величины $P^*(t)$, а также отклонений моментов вязкого и сухого трения в этих приводах от своих номинальных значений.

На третьем этапе решения поставленной задачи осуществляется синтез СКУ для всех электроприводов ММ, обеспечивающих стабилизацию их динамических свойств, а, следовательно, и качественных показателей работы при быстром изменении внешних приведенных моментов, а также при наличии изменяющихся моментов сухого и вязкого трений в этих приводах. Эти СКУ предлагается синтезировать с помощью подхода, основанного на стабилизации параметров дифференциальных уравнений, описывающих электроприводы ММ [7]. Для этого дифференциальное уравнение каждого нагруженного электропривода (1) перепишем с учетом того, что при их движении справедливо равенство $\dot{M}_{\text{стр}} = 0$

$$u(t) k_{\text{у}} k_{\text{м}} = L J_\Sigma \dddot{\alpha}(t) + (k_{\text{в}} L + J_\Sigma R)\ddot{\alpha}(t) + (R k_{\text{в}} + k_\omega k_{\text{м}})\dot{\alpha}(t) + L\left(\dot{P}^*(t) + \dot{\hat{d}}(t)\right) +$$

$$+ R\left(P^*(t) + \hat{d}(t) + M_{\text{стр}}\right). \quad (4)$$

Желаемое линейное дифференциальное уравнение каждого электропривода с номинальными постоянными параметрами и стабильными динамическими свойствами имеет вид:

$$\hat{u}(t) k_{\text{у}} k_{\text{м}} = L J_\Sigma \dddot{\alpha}(t) + J_\Sigma R \ddot{\alpha}(t) + k_\omega k_{\text{м}} \dot{\alpha}(t), \quad (5)$$

где $\hat{u}(t)$ – сигнал управления, поступающий на вход СКУ.

Выразив из уравнения (5) значение старшей производной $\dddot{\alpha}(t)$ и подставив его в исходное уравнение (4), несложно получить желаемый закон управления. Учитывая, что в современных электроприводах ММ электрическая постоянная времени обычно пренебрежимо мала ($\frac{L}{R} \ll 1$), то этот закон будет иметь вид:

$$u(t) = \frac{1}{k_{\text{у}} k_{\text{м}}}\left[k_{\text{в}} R\dot{\alpha}(t) + R\left(P^*(t) + \hat{d}(t)\right) + M_{\text{стр}} R\right] + \hat{u}(t). \quad (6)$$

Для исследования особенностей функционирования синтезированной системы управления в среде Matlab Simulink было выполнено моделирование работы трехстепенного ММ с кинематической схемой PUMA [9], имеющей только три переносные степени подвижности. Его РО перемещался по синусоидальной траектории $f_y(x^*) = 0.5\sin(10x) + 0.05$, $f_z(x^*) = 0.01$, задаваемой с помощью блока формирования траектории [10], с постоянной скоростью движения, равной 0.6 м/с.

При моделировании работы были использованы параметры ММ, описанные в работе [9]. Полагалось, что во всех степенях подвижности ММ установлены одинаковые электроприводы с двигателями постоянного тока независимого возбуждения или постоянными магнитами, имеющие следующие параметры: $J_\Sigma = 0.0001$ кгм^2, $R = 0.2$ Ом, $k_{\text{у}} = 35$, $i_p = 100$, $k_\omega = 0.02$ Вс, $k_{\text{м}} = 0.02$ Нм/А, $k_{\text{в}} = 0.005$ Нмс/рад, $M_{\text{тр}} = 0.06$ Нм, $L = 0.002$ Гн. Для каждого электропривода использовались наблюдатели (3) с параметрами: $k = 10$ и $g_* = 7000$. Во всех электроприводах использовались СКУ вида (6), а также типовые дополнительные корректирующие устройства – ПИД регуляторы со следующими коэффициентами: $k_P = 10, k_I = 0.01, k_D = 0.4$.

Для моделирования дополнительных внешних моментов $\tilde{P}^*(t)$, возникающих в электроприводах ММ, в алгоритме решения ОЗД использовались на 20% увеличенные значения величин КВТ, присоединенных масс и моментов инерции жидкости. Вычисляемые таким образом моменты $(P^*(t) + \tilde{P}^*(t))$ подавались на электроприводы ММ. Кроме того, в момент времени $t = 2$ с в электроприводах всех степеней подвижности ММ увеличивались коэффициенты вязкого трения и моменты сухого трения на 20 % от своих номинальных значений.

На рис. 1 изображены величины динамических ошибок $\varepsilon(t)$ движения РО по заданной программной траектории: без использования в электроприводах ММ синтезированных СКУ (кривая 1), при введении СКУ (6) (кривая 2), учитывающих только расчетные значения $P^*(t)$, а также с использованием дополнительных наблюдателей (3) (кривая 3).

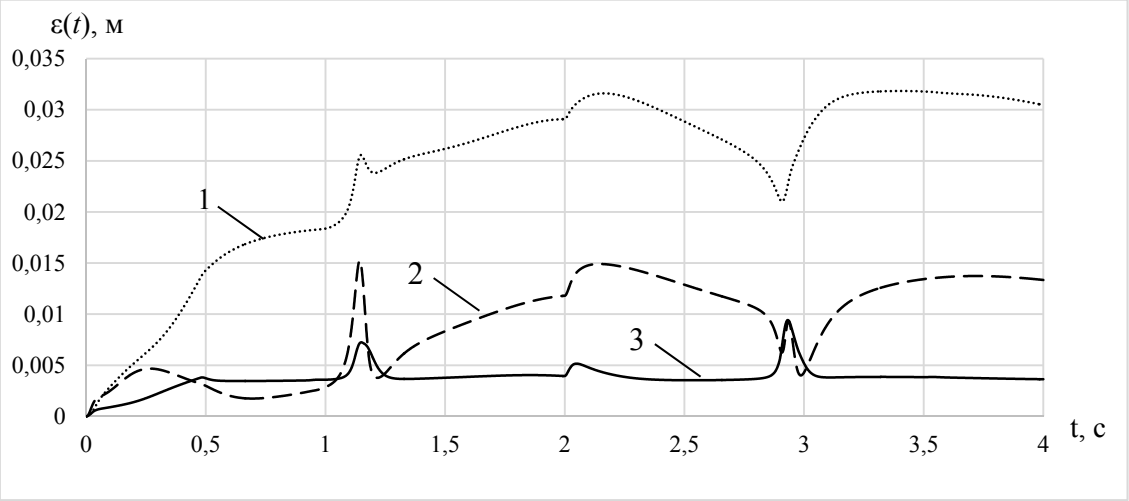


Рисунок 1 – Величины динамических ошибок движения РО ММ по заданной траектории

Из представленных графиков видно, что величина $\varepsilon(t)$ без использования СКУ достигает 32 мм, а с использованием СКУ эта ошибка не превышает 15 мм. При этом использование дополнительных наблюдателей, позволяющих учесть величины $\tilde{P}^*(t)$, $\tilde{k}_{\text{в}}$ и $\tilde{M}_{\text{стр}}(x_2(t))$, приводит к снижению динамической ошибки движения РО ММ до 0.9 мм.

Таким образом, результаты численного моделирования подтвердили работоспособность синтезированной системы, позволяющей значительно повысить точность выполнения подводным ММ различных технологических операций с высокой скоростью.

В докладе описан новый трехэтапный метод синтеза комбинированных систем высокоточного управления перемещениями РО подводных ММ. На первом этапе предложенного метода с помощью рекуррентного алгоритма решения ОЗД выполняется приближенный расчет моментов, возникающих во всех степенях подвижности ММ при их движении в водной среде. На втором этапе с использованием динамических моделей электроприводов каждой степени подвижности ММ, включающих приближенно рассчитанные внешние моменты, строятся дополнительные наблюда-

тели. Использование этих наблюдателей обеспечивает обнаружение и оценку величин неучтенных моментов, возникающих в степенях подвижности ММ при его движении в вязкой среде, а также отклонений моментов вязкого и сухого трения в приводах от своих номинальных значений. Все определенные на первом и втором этапах внешние моментные воздействия на выходные валы роторов электроприводов всех степеней подвижности ММ на третьем этапе компенсируются с помощью СКУ, в результате чего сохраняется высокая точность движения РО ММ по пространственным траекториям в водной среде.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 20-38-70161, № 19-08-00347_А, № 18-08-01204_А).

Литература

1. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю. Система автоматической стабилизации подводного аппарата в режиме зависания при работающем многозвенном манипуляторе. Часть 1 // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. №6. С. 53-56.

2. Куафе Ф. Взаимодействие робота с внешней средой. М.: Мир, 1985. 285 с.

3. Zhang Q. Adaptive Kalman filter for actuator fault diagnosis // Automatica. 2018. Vol. 93. P. 333-342.

4. He J., Zhang C. Fault reconstruction based on sliding mode observer for nonlinear systems // Mathematical Problems in Engineering. 2012. V. 2012. ID 451843. P. 1-22.

5. Zhirabok A., Zuev A., Shumsky A. Sliding Mode Observers Based Fault Identification in Mechatronic Systems // Proc. of the IEEE Industrial Electronics Conference. 2019. P. 161-166.

6. Жирабок А.Н., Усольцев С.А. Линейные методы при диагностировании нелинейных систем // Автоматика и телемеханика. 2000. № 7. С. 149-159.

7. Филаретов В.Ф. Самонастраивающиеся системы управления приводами манипуляторов. Владивосток: Изд-во ДВГТУ. 2000. 304 с.

8. Уткин В.И. Скользящие режимы и их применение в системах с переменной структурой. М.: Наука, 1974.

9. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю. Система автоматической коррекции программной траектории движения многозвенного манипулятора, установленного на подводном аппарате // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 1. С. 40-45.

10.Филаретов В.Ф., Зуев А. В., Губанков А. С. управление манипуляторами при выполнении различных технологических операций. М.: Наука. 2018. 232 с.

А.Ю. Коноплин[1,2], А.П. Юрманов[2,3], П.А. Пятавин[2,3]

МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИЙ ПОДВОДНОГО МАНИПУЛЯТОРА ДЛЯ СУПЕРВИЗОРНОГО ВЫПОЛНЕНИЯ ОПЕРАЦИЙ

[1]Институт проблем морских технологий ДВО РАН, Владивосток,[2] Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток,[3] Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, konoplin@marine.febras.ru

Аннотация

В докладе описан новый метод супервизорного управления многозвенным манипулятором, установленным на подводном аппарате, с обеспечением визуального контроля выполнения манипуляционных операций. Предложенный метод позволяет строить сложные пространственные траектории движения рабочего органа многозвенного манипулятора по поверхности объекта работ, используя данные, полученные от бортовых многолучевых сонаров или систем технического зрения, на основе целеуказаний оператора, определяющего вид траектории, ее положение и ориентацию в зоне выполнения работ. Для формирования целеуказаний и визуального наблюдения за движением рабочего органа манипулятора по заданной траектории используется телекамера, изменяющая пространственную ориентацию своей оптической оси. Разработанный метод реализован на языке программирования C++, а также проведено численное моделирование супервизорного управления многозвенным подводным манипулятором в виртуальной среде V-REP. Для визуализации работы метода написана графическая оболочка при помощи «OpenGL Core».

Ключевые слова: супервизорное управление, подводный робот, многозвенный манипулятор, облако точек, математическая модель, глубоководные исследования, пространственная траектория, подводные операции, система управления.

A.Yu. Konoplin[1,2], A.P. Yurmanov[2,3], P.A. Pyatavin[2,3]

METHOD FOR TRAJECTORY FORMING OF UNDERWATER MANIPULATOR FOR SUPERVISORY IMPLEMENTATION OF OPERATIONS

[1]Institute of Marine Technology Problems FEB RAS, Vladivostok, [2]Institute for Automation and Control Processes, FEB RAS, Vladivostok, [3]Far Eastern Federal University, Vladivostok, konoplin@marine.febras.ru

Abstract

The report describes a new method of supervisory control of a multi-link manipulator installed on an underwater vehicle, providing visual control of the manipulation operations. The proposed method allows to build complex spatial movement trajectories of a multi-link manipulator working tool on the surface of the work object, using data obtained from onboard multibeam sonars or technical vision systems. Target designations of the operator determine the type of trajectory, its position and orientation in the work area. To form target designations and visual of a multi-link underwater manipulator in a virtual V-REP environment. To observation of manipulator working tool movements along a given trajectory, a TV camera is used that changes the spatial orientation of its optical axis. The developed method is implemented in the C++ programming language, as well as numerical simulation of supervisory control visualize the method, a graphical shell is written using «OpenGL Core».

Key words: supervisory control, underwater robot, multi-link manipulator, point cloud, mathematical model, deep-sea research, spatial trajectory, underwater operations, control system.

В настоящее время для исследования и освоения Мирового Океана активно используются подводные роботы (ПР), оснащаемые многозвенными подводными манипуляторами (ПМ). Большинство манипуляционных операций выполняются под контролем операторов этих ПР в ручном или супервизорном режимах [1]. При этом операторы ориентируются только на видеоизображения, не имея прямого контакта с объектом манипулирования, что часто приводит к быстрой утомляемости, неизбежным ошибкам и снижению качества выполнения технологических и исследовательских работ. Для повышения эффективности выполнения манипуляционных операций с поверхностями объектов работ (взятие поверхностного слоя грунта грунтоотборным боксом, бесконтактная

очистка протяженных конструкций от заиливания и обрастаний при помощи гидромонитора) в докладе ставится и решается задача создания метода супервизорного выполнения манипуляционных операций ПМ, установленными на ПР. Этот метод должен обеспечивать проецирование любых сложных пространственных траекторий движения рабочих инструментов (РИ) ПМ на поверхности объектов работ, используя данные, полученные от бортовых многолучевых сонаров или систем технического зрения, на основе целеуказаний оператора, определяющего вид траекторий, их положение и ориентацию в зоне выполнения работ. При этом указанные траектории могут быть заданы в виде аналитических выражений, множеств точек или другими способами, определяющими желаемую последовательность точек, по которым должен перемещаться РИ ПМ. Если объект работ имеет известную форму, то траектория движения по его поверхности может быть сформирована заранее [2] и спроецирована на реальную поверхность подводного объекта с помощью предложенного метода.

Кроме того, во время проведения манипуляционных работ в супервизорном режиме управления оператору необходимо иметь визуальный контроль выполнения операции, т.е. оптическая ось телекамеры, закрепленной на поворотной платформе ПР, должна всегда быть направлена на РИ ПМ.

Формирование траекторий ПМ для супервизорного выполнения операций

В процессе выполнения манипуляционных операции ПР находится в режиме зависания над объектом работ, который оказывается в зоне сканирования бортовых сонаров. Вначале с помощью известных методов [3, 4] и систем технического зрения строится триангуляционная поверхность дна или подводного объекта. Затем оператор наводит на объект работ оптическую ось установленной на ПР телекамеры, которая может изменять свою пространственную ориентацию, и задает начальную A_1 и конечную A_2 точки, принадлежащие этому объекту и определяющие начало и конец движения РИ по траектории. Проецирование желаемой траектории движения РИ ПМ на участок объекта работ, заключенный между точками A_1 и A_2, начинается с вычисления координат этих целевых точек.

Если телекамера наведена на точку A_i, где $i = 1,2$, то в системе координат (СК) *xyz*, где *x*, *y* и *z* – оси связанной СК, начало которой - *O* расположено в центре величины (водоизмещения) ПР, ось *x* совпадает с горизонтальной - продольной осью ПР, ось *z* - с его вертикальной осью, а ось *y* составляет с ними правую тройку, положение этой камеры определяется заранее заданной точкой $P_i = [P_{ix}, P_{iy}, P_{iz}]$, расположенной на оптической оси, а ее ориентация - единичным вектором $\vec{d}_i = [d_{ix}, d_{iy}, d_{iz}]$. В этом случае оптическая ось телекамеры, совпадающая с вектором $\vec{d}_i$, выходящим из точки P_i в направлении поверхности объекта работ, описывается выражением [1]:

$$A_i = P_i + t_i \vec{d}_i, \tag{1}$$

где t_i – параметр, изменяющийся в пределах $[0, \infty)$.

Модель объекта, построенная с использованием алгоритма триангуляции Делоне, представляет собой множество треугольных пластин, сшитых между собой. Каждый *k*-й треугольник в этой триангуляции задается в СК *xyz* координатами трех вершин V_{k0}, V_{k1}, $V_{k2} \in R^3$, где $k = \overline{1, g}$, g - количество треугольников.

Для нахождения в этой СК координат каждой целевой точки A_i на пересечении оптической оси телекамеры и полученной триангуляционной поверхности вначале необходимо определить, какой из всех *g* треугольников в текущий момент времени пересекается осью (1). Для этого используется алгоритм Моллера – Трумбора [5], который на основе информации о координатах точки P_i, элементах вектора $\vec{d}_i$, а также координатах вершин V_{k0}, V_{k1}, V_{k2} всех *g* треугольников позволяет определить *k*-й треугольник, через который проходит ось (1).

Треугольник *k* с вершинами V_{k0}, V_{k1} и V_{k2}, который пересекает ось (1), находится из условий [5]: $0 \le u_{ik} \le 1$, $0 \le v_{ik} \le 1$, $u_{ik} + v_{ik} \le 1$, где u_{ik}, v_{ik} – барицентрические координаты точки A_i относительно вершин *k*-го треугольника. При этом координаты точки A_i пересечения оптической оси телекамеры с треугольником *k* определяются выражением [1]:

$$A_i = P_i + \frac{((P_i - V_{k0}) \times (V_{k1} - V_{k0})) \cdot (V_{k2} - V_{k0})}{(\vec{d}_i \times (V_{k2} - V_{k0})) \cdot (V_{k1} - V_{k0})} \vec{d}_i. \tag{2}$$

Для наложения на поверхность объекта работ желаемой траектории движения РИ ПМ, которая в качестве примера может быть задана в аналитическом виде $y = f(x)$ в плоскости *Oxy* СК *xyz*, необходимо построить проецирующие лучи, выходящие из принадлежащих траектории точек b'_j,

где $j = \overline{1,c}$, c - количество проецирующих лучей, в направлении поверхности объекта. Указанное направление лучей определяется единичным вектором $\vec{o} \in R^3$, который в рассматриваемом случае направлен в сторону, противоположную направлению оси z СК xyz, поскольку желаемая траектория лежит в плоскости Oxy. Пересечения проецирующих лучей с триангуляционной моделью поверхности образуют последовательность точек B_j, которые сформируют траекторию движения РИ ПМ по поверхности объекта.

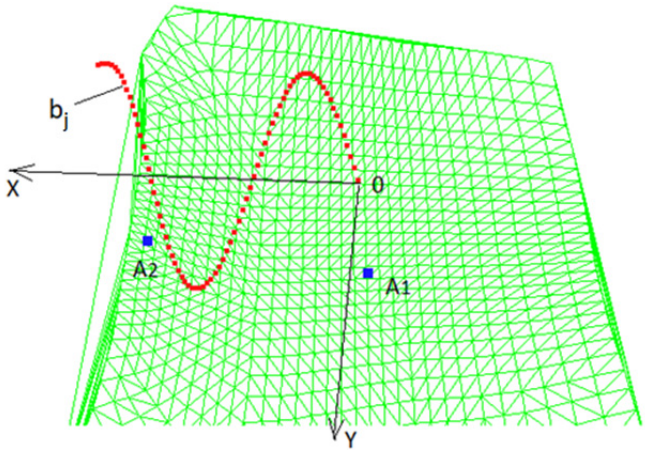


Рисунок 1 – Построение вспомогательных точек b_j

Для нахождения точек b'_j сначала определим координаты вспомогательных точек b_j (см. рис. 1), построенных на основе заданной (не смещенной к точке A_1) траектории, следующим образом:

$$\begin{aligned} b_{jx} &= b_{(j-1)x} + g, \\ b_{jy} &= f(b_{jx}), \\ b_{jz} &= 0, \end{aligned} \tag{3}$$

где $f(b_{jx})$-зависимость y от x согласно заданному аналитическому выражению $y = f(x)$, b_{1x}= 0; g - шаг по оси x, определяющий количество вспомогательных точек и задаваемый в зависимости от параметров этой траектории, а также от степени детализации сканирования подводного объекта. Увеличение количества точек b_j повышает точность сформированной траектории, однако увеличивает количество дальнейших вычислений.

Желаемая траектория РИ ПМ изначально задается в СК xyz, связанной с ПР, но начинает строиться от начала этой СК (b_{1x}= 0) вдоль оси x, поэтому необходимо ее так преобразовать, чтобы она располагалась между точками A_1, A_2. Для этого сначала производим поворот всех векторов, соединяющих начало O СК xyz с точками b_j, на угол $\angle(x; A_1A_2) = \varphi$ при помощи матрицы поворота вокруг оси z. Далее полученные векторы смещаются вдоль осей x и y на значения A_{1x} и A_{1y} соответственно. В результате координаты искомых точек b'_j будут определяться с помощью выражения:

$$\begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi & 0 \\ \sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{jx} \\ b_{jy} \\ b_{jz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_{1x} \\ A_{1y} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b'_{jx} \\ b'_{jy} \\ b'_{jz} \end{bmatrix}. \tag{4}$$

Координаты точек B_j, последовательность которых описывает расположенную между заданными оператором точками A_1, A_2 желаемую траекторию РМ ПМ, определяются с помощью алгоритма Моллера-Трумбора в виде:

$$B_j = b'_j + \frac{((b'_j - V_{k0}) \times (V_{k1} - V_{k0})) \cdot (V_{k2} - V_{k0})}{(\vec{o} \times (V_{k2} - V_{k0})) \cdot (V_{k1} - V_{k0})} \vec{o}. \tag{5}$$

В результате полученная последовательность точек B_j формирует траекторию движения РИ.

На рис. 2 показан пример сформированной синусоидальной траектории, которая проложена по поверхности трубопровода для его очистки. Траектория состоит из множества точек B_j.

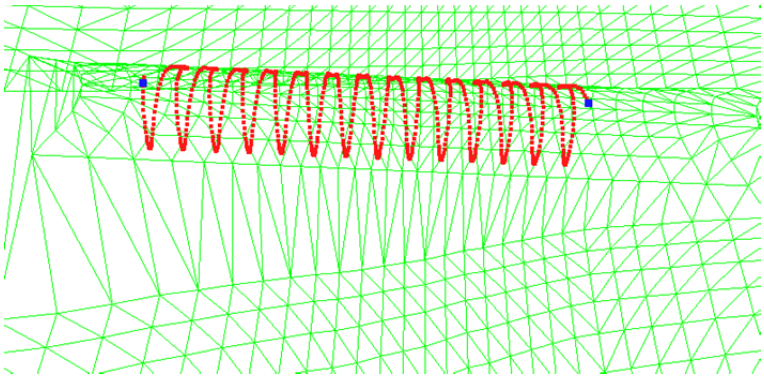


Рисунок 2 – Траектория движения РИ ПМ вдоль трубопровода

Программная реализация и моделирование метода супервизорного управления ПМ

Разработанный метод супервизорного управления ПМ реализован на языке программирования C++. Проведено моделирование в виртуальной среде V-Rep, где были сформированы различные объекты для выполнения манипуляционных операций с их поверхностями. В качестве ПМ был выбран трехстепенной манипулятор типа PUMA (см. рис. 3). Был сымитирован корпус ПР с закрепленной на него поворотной платформой телекамеры. Также моделировалась работа многолучевого гидроакустического сонара с разрешением 32*32 точки (см. рис. 3). Входными данными для созданной программы является множество принадлежащих поверхности дна точек, получаемых с помощью сонара.

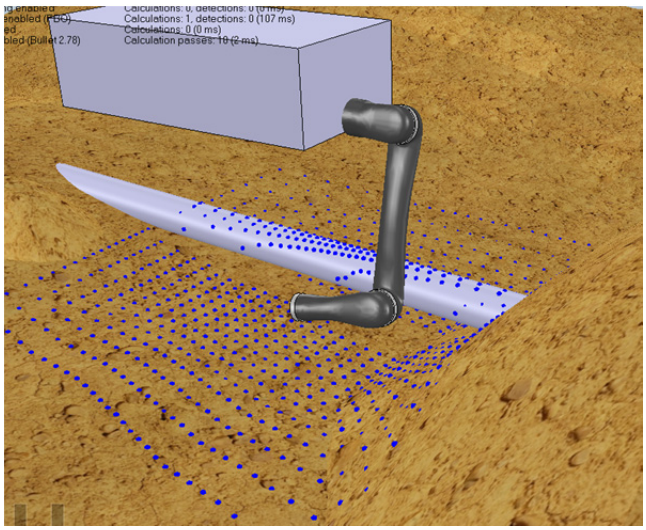
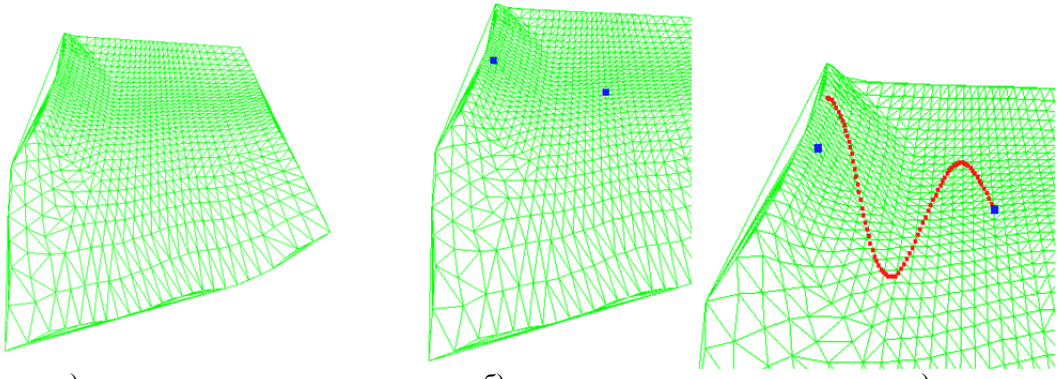


Рисунок 3 – Модель ПР, ПМ и объекта работ в V-Rep

Разработанная программа строит триангуляционную модель донной поверхности (см. рис. 4а), используя алгоритм [3]. Далее программа рассчитывает координаты целевых точек A_i (см. рис. 4б). Затем формируется массив начальных точек b'_j проецирующих лучей, и находятся точки пересечения этих лучей с поверхностью (см. рис. 4в).



а) б) в)

Рисунок 4 – а) – триангуляционную модель донной поверхности, б) – триангуляционная модель дна и целевые точки траектории, в) – найденные точки для траектории движения ПМ

Для поиска точки пересечения проецирующего луча с триангуляционной поверхностью объекта работ с помощью алгоритма Моллера-Трумбора требуется проверка наличия точек пересечения каждого луча со всеми треугольниками, формирующими поверхность. Если для каждого луча начинать поиск пересекающего треугольника с самого первого, то на поиск всех точек пересечения может уйти достаточно много времени из-за ограниченности вычислительных ресурсов, особенно при большом количестве проецирующих лучей и (или) треугольников. Для решения этой проблемы необходимо уменьшить количество ложных операций, то есть операций, при которых выбранный треугольник не будет иметь точек пересечения с лучом. В созданной программе был реализован алгоритм, позволяющий значительно уменьшить вычислительную сложность. Суть алгоритма заключается в том, что в памяти программы хранятся координаты вершин треугольника, в котором было найдено последнее пересечение (точка B_j). При поиске точки B_{j+1} сначала проверятся пресечение с треугольником, где находится точка B_j, если пересечение в этом треугольнике не находится, то начинается поиск нужного треугольника в обычном режиме, начиная с первого.

Для наглядного представления построенных триангуляционных поверхностей, а также последующего контроля за формированием траекторий была создана графическая оболочка с использованием библиотек «OpenGL Core». Графический интерфейс в реальном масштабе времени отображает поверхность объекта работ и полученную траекторию, для наглядности целевые точки также отображаются на этой поверхности.

Визуальный контроль выполнения манипуляционных операций

В режиме супервизорного управления оператору необходимо иметь визуальный контроль выполнения манипуляционной операции. То есть при движении ПМ по сформированной траектории его РИ всегда должен находиться в центре видеокадра. В работе [6] описан способ, обеспечивающий автоматическое наведение оптической оси телекамеры на среднюю точку РИ ПМ в процессе его работы. Указанный способ был реализован в виде системы, которая с учетом информации о текущих координатах местоположения РИ ПМ вычисляет и задает такие углы поворота степеней подвижности поворотной платформы телекамеры, при которых оптическая ось этой камеры пересекает среднюю точку РИ.

Программная реализация системы выполнена в среде V-Rep, а аппаратная реализация - на созданной лабораторной установке, включающей в себя с трехстепенной манипулятор типа PUMA, задающий репликатор и камеру, закрепленную на двухстепенной поворотной платформе (см. рис. 5). В качестве вычислительного устройства использовался контроллер Arduino Mega 2560, полученное с камеры видеоизображение в реальном времени выводилось на монитор компьютера.

При использовании этой системы оператору не приходится дополнительно управлять поворотной платформой телекамеры, что облегчает выполнение манипуляционных операций в ручном режиме, а также обеспечивает постоянный визуальный контроль и видеофиксацию перемещений РИ ПМ в супервизорном или автоматическом режимах.

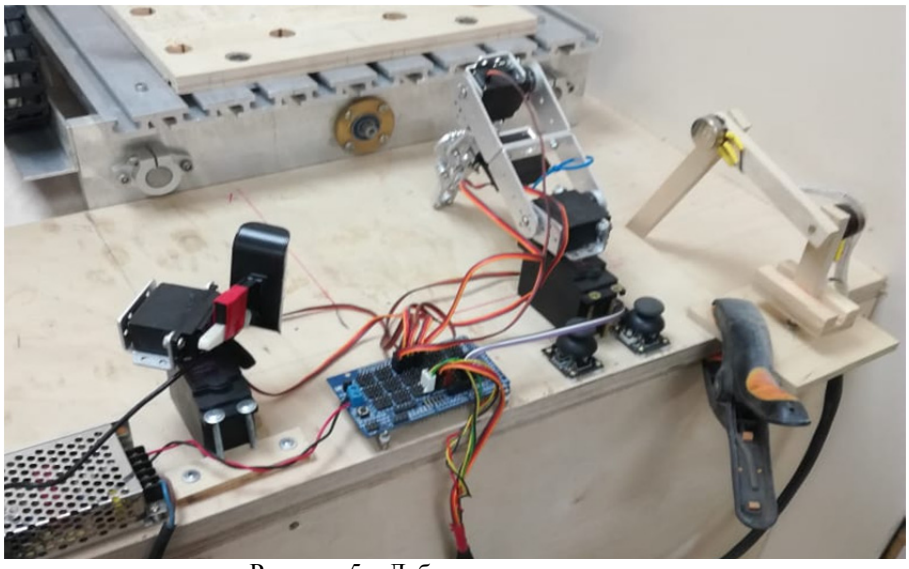


Рисунок 5 – Лабораторная установка

Представленный метод формирования траекторий движения РИ ПМ, установленных на ПР, позволяет в супервизорном режиме выполнять отбор проб грунта и очистку подводных конструкций с помощью гидромонитора, а также другие работы, где необходимо перемещение РИ ПМ по поверхностям подводных объектов. Этот метод реализован в виде программного обеспечения, позволяющего строить триангуляционные модели поверхностей объектов работ и проецировать на них желаемые пространственные траектории движения РИ ПМ на основе целеуказаний, задаваемых оператором. Кроме того, реализована система, обеспечивающая визуальный контроль и видеофиксацию выполнения манипуляционных операций за счет автоматического наведения оптической оси телекамеры, закрепленной на поворотной платформе ПР, на РИ ПМ. Результаты моделирования подтвердили работоспособность предложенного метода и возможность его использования в реальном масштабе времени.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проекты № 18-08-01204_А, № 20-38-70161, № 19-08-00347_А.

Литература

1 Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю., Коноплин Н.Ю. Метод супервизорного управления манипулятором подводного робота // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. №2. С. 95–99.

2 Коноплин А.Ю., Коноплин Н.Ю., Шувалов Б.В. Подход к выполнению АНПА технологических манипуляционных операций с различными подводными объектами // Подводные исследования и робототехника. 2019. №1. С. 31-37.

3 Marton Z., Rusu R. and Beetz M. On Fast Surface Reconstruction Methods for Large and Noisy Datasets. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2009, Kobe, Japan, pp. 3218-3223.

4 Point Cloud Library: Fast triangulation of unordered point clouds http://ns50.pointclouds.org/

5 Möller T. and Trumbore B. Fast, Minimum Storage Ray-Triangle Intersection. Journal of Graphics Tools (JGT), 2(1):21–28, October 1997. 254.

6 Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю. Способ автоматического наведения телекамеры // патент РФ № 2556441, Бюл. № 19 от 10.07.2015.

А.Ю. Волков, А.Н. Косенко, Д.С. Попов

МОДУЛЬНОЕ РЕШЕНИЕ АРХИТЕКТУРЫ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург, a.volkov@rtc.ru, a.kosenko@rtc.ru, d.popov@rtc.ru

Аннотация

В крупных робототехнических комплексах количество печатных плат и электронных узлов может достигать нескольких десятков. При таком количестве узлов с точки зрения скорости разработки, программирования и отладки на передний план выходят задачи модульного построения систем. Для эффективной компоновки электронных устройств разработано несколько стандартов, описывающих такие параметры, как габариты печатных плат, необходимые крепежные размеры, шаг соединительных разъемов.

В работе рассмотрен вариант построения системы управления с применением модульного подхода, основанного на стандартах МЭК 297 и VITA 48.2. Данный подход проиллюстрирован примером разработанного в ЦНИИ РТК макета системы управления робототехническим комплексом. Описан состав макета, технические характеристики и функционал печатных плат, рассмотрены основные преимущества и недостатки подхода.

Ключевые слова: робототехнические устройства, модульность, корпусирование, стандарт МЭК 297, стандарт VITA 48.2.

A.Y. Volkov, A.N. Kosenko, D.S. Popov

MODULAR SOLUTION FOR THE ARCHITECTURE OF ROBOTIC SYSTEMS

Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics Russian Federation, Saint-Petersburg, a.volkov@rtc.ru, a.kosenko@rtc.ru, d.popov@rtc.ru

Abstract

In large robotic complexes, the number of printed circuit boards and electronic blocks can reach several dozen. With such a large number of nodes, the tasks of modular system construction come to the fore in terms of development, programming, and debugging speed. For the efficient layout of electronic devices, several standards have been developed that describe such parameters as the dimensions of printed circuit boards, the required mounting dimensions, and the pitch of the connectors.

The paper considers a variant of building a control system using a modular approach based on the IEC 297 and VITA 48.2 standards. This approach is illustrated by an example of a layout of a control system for a robotic complex developed at RSSC RTC. The composition of the layout, technical characteristics and functionality of printed circuit boards are described, the main advantages and disadvantages of the approach are considered.

Key words: robotic devices, modularity, packaging, standard IEC 297, standard VITA 48.2.

При проектировании робототехнических устройств неотъемлемой частью разработки является программирование, отладка и сборка изделия. В связи с этим очень важно уделять внимание решениям, способным ускорить и упростить их на этапе разработки.

При разработке небольших робототехнических устройств или управляющих систем проблема решается использованием готовых конструктивных и электротехнических решений, из которых можно выбрать подходящие по требованиям и габаритам. Однако при разработке крупных робототехнических систем, когда количество плат достигает нескольких десятков, и каждая плата является отдельным функциональным узлом, предназначенным для решения конкретных задач робототехнического комплекса, удобным решением является разработка единой системы управления мобильным робототехническим комплексом (МРК), которая представляет собой единый блок со встраиваемыми модулями, выполняющими свои задачи. Данный подход обладает несколькими преимуществами. Во-первых, упрощается процесс разработки конструкции робототехнического комплекса, так как уже имеется один готовый блок управления. Во-вторых, упрощается ремонто-

пригодность системы. В случае выхода их строя одного модуля из состава системы управления необходимо просто заменить этот модуль. Это критически важно в условиях ремонта неквалифицированным персоналом в полевых условиях. В-третьих, единый стандарт унифицирует процесс разработки модулей с точки зрения электроники. То есть имеется возможность разработать разные по функционалу, но единые по конструктивному исполнению модули для применения в составе робототехнического комплекса. Тогда можно создавать систему управления с базовыми функциями, и менять или расширять функциональные возможности МРК по мере необходимости заменой отдельных модулей или добавлением новых.

Применение стандартов МЭК 297 и VITA 48.2

Для универсализации решения по корпусированию радиоэлектронных средств разработан стандарт МЭК 297. Данный стандарт описывает общую компоновку блочных каркасов под печатные платы, размеры блочных каркасов, расположение крепежных отверстий каркаса, габариты печатных плат (с возможностью оснащения средствами электромагнитного экранирования и защиты от электростатического разряда), устанавливаемых в блок, а также положение крепежных отверстий на платах. Базовым параметром модульных систем является ширина панели блока, определяющаяся в единицах U. Величина U равна 44,45 мм (1,75 дюйма). В табл. 1 представлены стандартные типоразмеры печатных плат.

Таблица 1 – Размеры печатных плат по МЭК 297-3

Обозначение	Высота, мм	Длина, мм
3U	100	100
		160
		220
		280
4U	144,45	100
		160
		220
		280
5U	188,90	100
		160
		220
		280
6U	233,35	100
		160
		220
		280

Типовые применяемые размеры: 100x160 мм, 100x220 мм, 233,35x160 мм, 233,35x220 мм (высота 3U и 6U). По необходимости глубину печатной платы можно увеличивать с шагом 60 мм. Высота печатной платы тоже может изменяться с шагом 1U. Центральную часть конструкции, в которую вставляются печатные платы, источники питания, различные электронные модули называют объединительной платой или кросс-платой. На рис. 1 приведена типовая компоновка блочного каркаса в соответствии с МЭК 297.

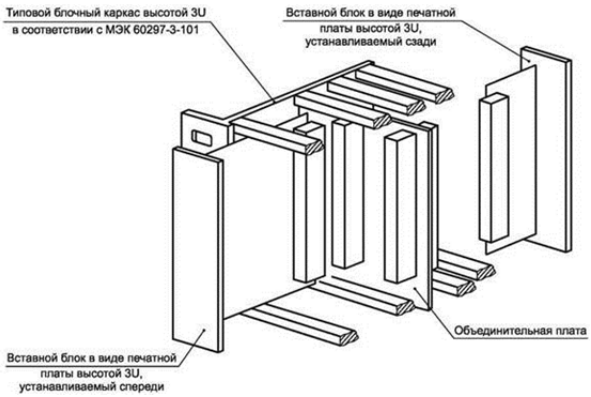


Рисунок 1 – Типовая компоновка блочного каркаса

Модули крепятся к каркасу с помощью крепежных отверстий. Согласно МЭК 297, отверстия располагаются на определенном расстоянии друг от друга. На рис. 2 представлено графическое отображение крепежных отверстий на передней панели. В табл. 2 представлены расстояния между крепежными отверстиями на передней панели.

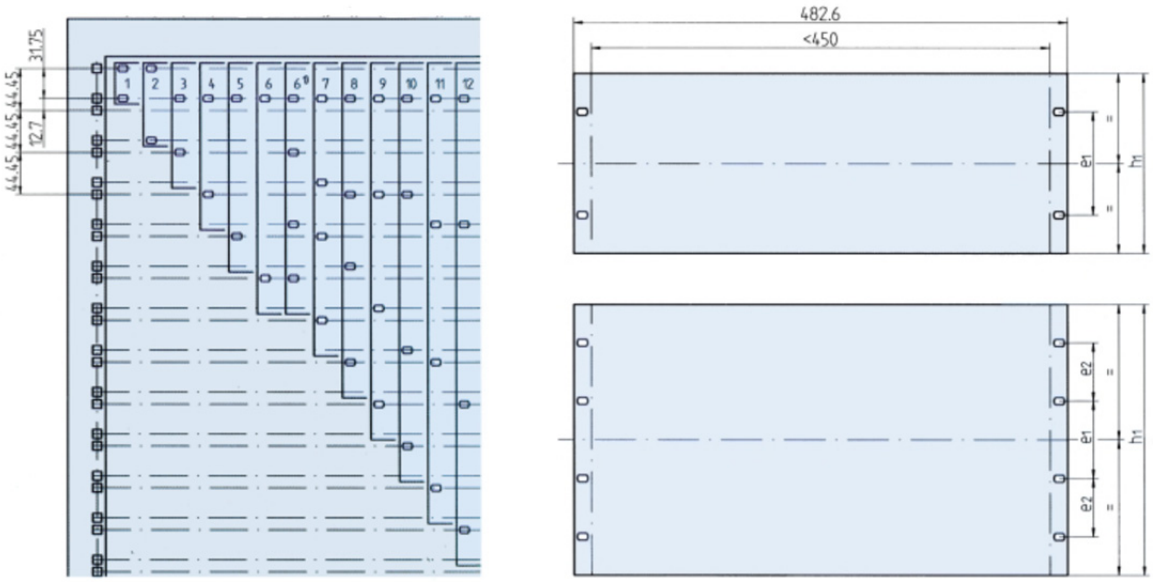


Рисунок 2 – Графическое отображение расположения крепежных отверстий на передней панели

Таблица 2 – Расстояния между крепежными отверстиями на передней панели

Размер, U	**Высота панели h1, мм**	**Расстояние между основными отверстиями e1, мм**	**Расстояние между основными и вспомогательными отверстиями e2, мм**
1	44,4	31,75	-
2	88,9	76,2	-
3	133,3	57,15	-
4	177,8	101,6	-
5	222,3	146,1	-
6	266,7	190,5	-
6	266,7	76,2	57,15
7	311,1	57,15	88,9
8	355,6	76,2	101,6
9	400	120,6	101,6
10	444,5	165,1	101,6
11	488,9	146,1	133,3
12	533,4	190,6	133,3

При разработке и отладке нередко необходимо подключаться к устройству в процессе его работы, для чего необходимо предусмотреть отладочные разъемы на передней панели модуля печатной платы. Кроме этого, необходимо предусмотреть вывод индикаторных светодиодов для отображения состояния модулей (отображение состояния работы или ошибки, передачи и приема данных). Для отдельных задач стоит осуществить возможность подключения дисплея и клавиатуры для отображения информации о состоянии устройства и возможности ручной настройки параметров системы.

Ориентирование на единый существующий стандарт позволяет решить проблему разработки различных форм-факторов печатных плат при разработке мобильных робототехнических систем, приводит систему к единому виду. На рис. 3 изображен пример корпусирования устройства согласно стандарту МЭК 297.

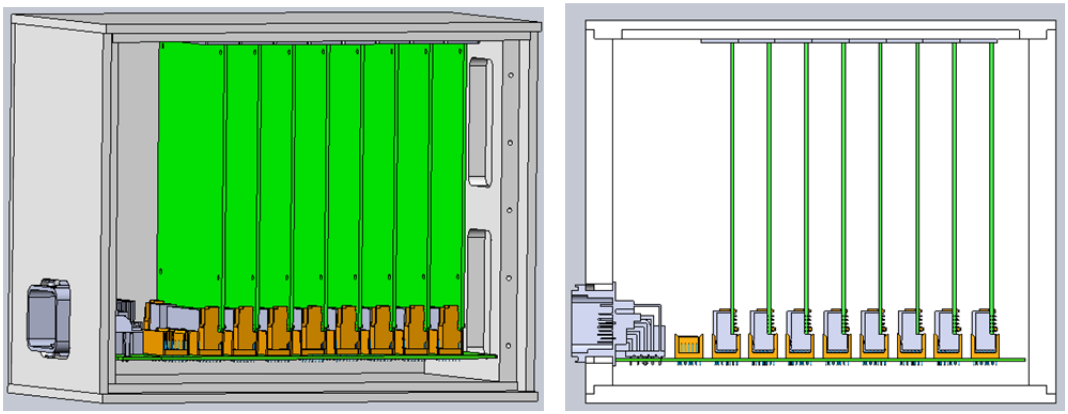


Рисунок 3 – Внешний вид центрального блока управления в стандартном корпусе

Использование данной архитектуры построения робототехнической системы увеличивает скорость отладки и программирования устройств, так как позволяет подключать и отключать любой блок независимо от других, при этом не нарушая работу других устройств.

Используя стандарт МЭК 297 и общую цоколёвку устройств, можно добиться того, чтобы каждое устройство работало независимо от других и являлось самодостаточным и законченным модулем со своими решаемыми задачами. При выходе одного устройства из строя, оно не нарушит работу остальных устройств и его можно будет быстро заменить точно таким же, не выключая систему, заранее предусмотрев возможность горячей замены.

Существует два вида модулей – открытые и закрытые. Открытые модули состоят из печатной платы, передней панели и соединителя, закрытые модули представляют собой печатную плату с соединителем, установленную во внешний корпус.

Использование закрытых модулей позволяет решить следующие проблемы:

- электромагнитная совместимость (ЭМС);
- отведение тепла от греющихся компонентов;
- жесткая фиксация плат в корпусе.

В робототехнических комплексах предъявляются высокие требования к виброустойчивости системы, защите от ударных нагрузок, прочности конструкции при работе в агрессивных средах или под воздействием иных факторов. Специально для рынка авиационно-космических и оборонных систем был разработан стандарт VPX, описывающий применение модульной архитектуры для построения систем. Основные конструктивные требования определяются стандартами ANSI/VITA 46.0 VPX: Base Specification (VITA 46.0) для корпусов и элементов системных платформ с воздушным охлаждением, ANSI/VITA 48.0 VPX REDI: Ruggedized Enhanced Design Implementation Mechanical Base Specification (VITA 48.0) для системных платформ с охлаждением на корпус. Данные стандарты используют два форм-фактора – 3U и 6U. На рис. 4 приведена типовая структура системы на основе спецификации VITA 48.2. Использование данной спецификации видится наиболее подходящей для мобильных робототехнических систем.

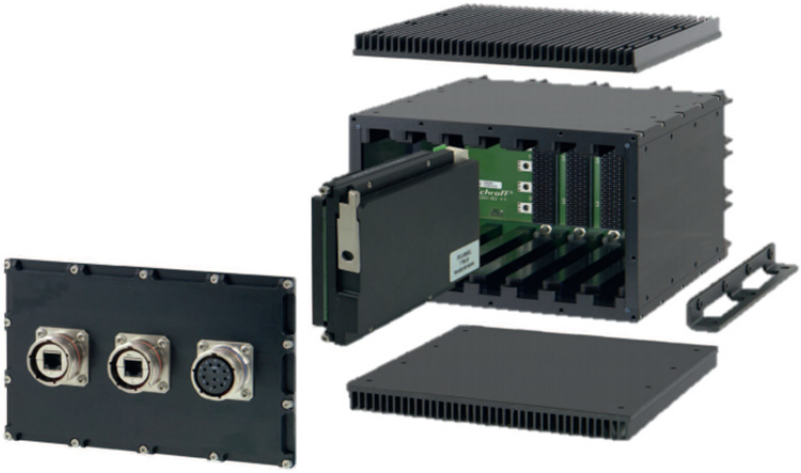


Рисунок 4 – Составные части системы на основе спецификации VITA48.2 – VPX REDI

Макет системы управления

На основе стандарта МЭК 297 и типовой архитектуры построения мобильных робототехнических систем в ЦНИИ РТК был разработан макет системы управления мобильным робототехническим комплексом. Данный блок управления может быть использован в составе тяжелых робототехнических систем (массой выше 800 кг). Он включает в себя все необходимые модули для осуществления управления мобильной платформой и обработки сигналов периферийных модулей МРК. В состав разработанного макета системы управления входят:

- центральный модуль управления;
- модуль подключения полезных нагрузок;
- модуль вторичных источников питания;
- модуль видеокоммутации;
- модуль приемо-передатчика;
- объединяющая плата.

Габариты плат составляют 100x160 (высота 3U). Разъемы для подключения печатных плат к объединяющей плате выбраны согласно стандарту МЭК 61076-4-101. Количество контактов подключения зависит от требуемого функционала, для разработанного макета был выбран разъем с 125 контактами, что является достаточным для реализации всех задач по управлению робототехнической системой. Данные контакты включают линии питания плат, интерфейсы управления (CAN, RS485, RS232, Ethernet), аудио и видеосигналы, сигналы общего назначения.

Центральный модуль управления

Центральный модуль управления производит основные вычислительные операции и их распределение по другим модулям в процессе управления комплексом. В основе этого устройства лежит плата управления, ключевым узлом которой является микроконтроллер STM32F407VGT. Внешний вид платы центрального модуля управления изображен на рис. 5. В табл. 3 представлены основные характеристики платы.

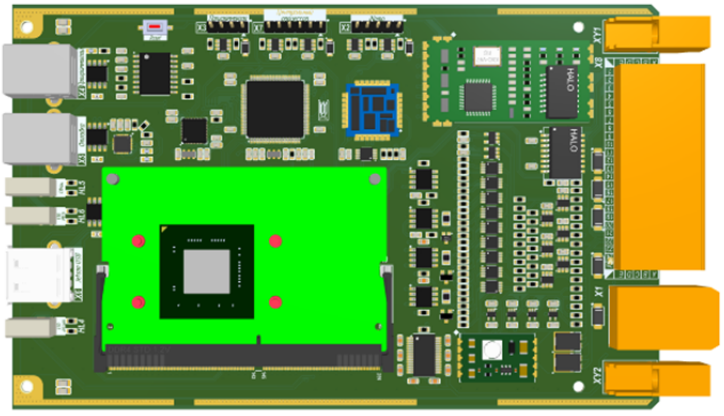


Рисунок 5 – Внешний вид платы центрального модуля управления

Таблица 3 – Технические характеристики платы центрального модуля управления

Наименование характеристики	Значение характеристики
Дискретные входные напряжения, В	+28,8, +5
Мощность, Вт	12
Интерфейсы передачи данных, (скорость передачи, Мбит/с)	CAN (1)
Отладочный интерфейс, (скорость передачи, Мбит/с)	Ethernet (10/100), UART (57.6), USB2.0

В задачи модуля входит:

– осуществление централизованного управления отдельными узлами комплекса по CAN шине;

– управление и мониторинг состояния работы бортового компьютера;

– управление блоком реле и предохранителей.

Для выявления неполадок и контроля состояния робота, возникающих во время его работы, в центральный модуль установлен бортовой компьютер Jetson Nano фирмы NVIDIA Corporation. Главная задача этого устройства заключается в считывании данных с Ethernet сети и записи их на SD-карту (журналирование данных). Кроме этого данный компьютер может осуществлять математические расчёты при решении обратной задачи кинематики (например, при перемещении манипулятора на робототехнической платформе), может осуществлять функции построения карты местности, анализировать видеопоток (поиск препятствий, распознавание объектов), выполнять задачи машинного обучения и иные задачи, которые требуют высоких вычислительных мощностей.

Модуль полезных нагрузок

Для подключения полезных нагрузок (таких как осветители видимого спектра, инфракрасные осветители, обогреватели, подсветка) разработана плата, внешний вид которой изображен на рис. 6. Технические характеристики представлены в табл. 4.

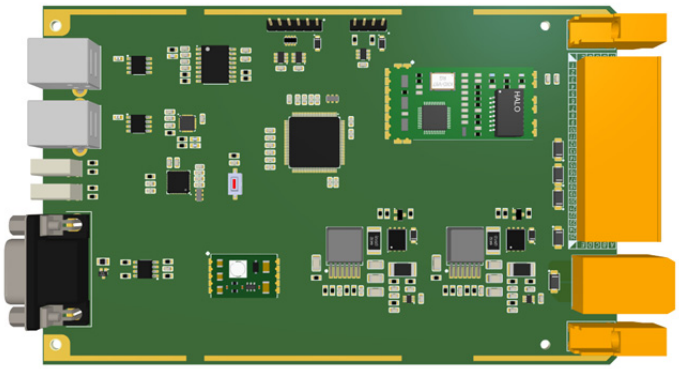


Рисунок 6 – Внешний вид платы модуля полезных нагрузок

Таблица 4 – Технические характеристики платы полезных нагрузок

Наименование характеристики	Значение характеристики
Дискретные входные напряжения, В	+28,8
Выходной ток канала 1, А	3
Выходной ток канала 2, А	3
Интерфейсы передачи данных, (скорость передачи, Мбит/с)	CAN (1)
Отладочный интерфейс, (скорость передачи, Мбит/с)	Ethernet (10/100), UART (57.6), USB2.0

В плате модуля полезных нагрузок разработаны две выделенные линии нагрузки. Работа линии осуществляется через токовый драйвер и контур измерения тока в линии. При подключении полезной нагрузки в линии фиксируется малый ток (единицы миллиампер, в зависимости от сопротивления полезной нагрузки), протекающий через токоизмерительный и одновременно токоограничивающий резистор. После этого система инициирует команду включения нагрузки, ток номиналом до 3 А протекает параллельно резистору через силовой ключ. После получения команды выключения обходной ключ закрывается и происходит повторный замер тока через резистор в линии.

Плата вторичных источников питания

Модуль вторичных источников питания состоит из платы, предназначенной для получения набора напряжений, необходимых для питания модулей и блоков, входящие в состав робототехнического комплекса. Внешний вид платы представлен на рис. 7. Технические характеристики представлены в табл. 5.

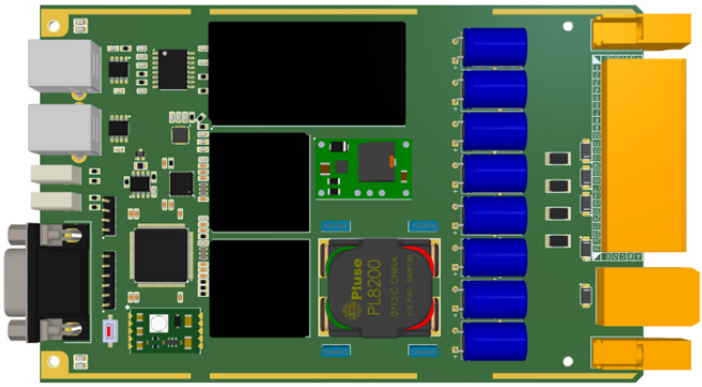


Рисунок 7 – Внешний вид платы вторичных источников питания

Таблица 5 – Технические характеристики платы полезных нагрузок

Наименование характеристики	Значение характеристики
Входные напряжения, В	+28,8
Выходное напряжение, В (выходной ток, А)	+5 (7)
Выходные напряжения для питания аналоговых цепей, В (выходной ток, А)	+5 (6), +12 (5), -5 (3)

Для контроля характеристик силовых линий, на плате реализованы схемы измерения тока и напряжения. Так же реализована гальваническая развязка по питанию для защиты от помех и сглаживания входного напряжения от аккумулятора или сети.

Модуль видеокоммутации

Модуль видеокоммутации предназначен для возможности управления аудио- и видеоинформацией, получаемой с нескольких видеокамер, для дальнейшей передачи в канал радиосвязи. Максимально возможное количество подключаемых камер равно 12. Внешний вид предполагаемого устройства коммутации представлен на рис. 8. Технические характеристики платы представлены в табл. 6.

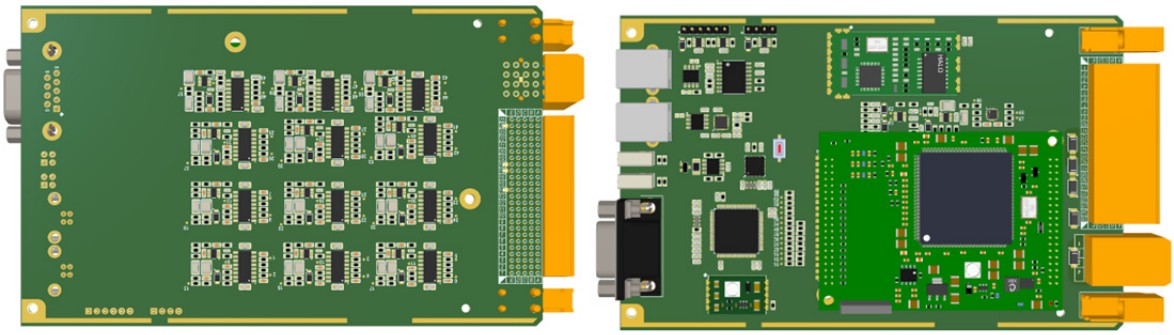


Рисунок 8 – Внешний вид платы модуля коммутации

Таблица 6 – Технические характеристики платы видеокоммутации

Наименование характеристики	Значение характеристики
Аналоговые входные напряжения, В	+5, -5
Дискретные входные напряжения, В	+28,8
Интерфейсы передачи данных, (скорость передачи, Мбит/с)	CAN (1)
Отладочный интерфейс, (скорость передачи, Мбит/с)	Ethernet (10/100), UART (57.6), USB2.0

Модуль видеокоммутации позволяет работать с видеосигналами стандарта SD, AHD, TVI, CVI форматов PAL и NTSC. Кроме этого, модуль реализует множество функций обработки видеосигнала, коммутации и мультиплексирования изображений, в том числе:

– антибликовую фильтрацию и аналого-цифровое преобразование цветного видеосигнала различных цветовых стандартов,

– функции временного мультиплексирования изображений, в том числе «картинка в картинке», видеоквадратор, последовательное переключение каналов и прочее,

– функцию индикации дополнительной информации OSD (on-screen display).

Модуль приемопередачи

Для подключения средств приемопередачи разработана плата, представленная на рис. 9. Технические характеристики модуля представлены в табл. 7. Данная плата осуществляет прием команд управления с внешнего поста управления от оператора и передачу аудио- и видеосигналов и данных телеметрии о состоянии робототехнического комплекса к оператору.

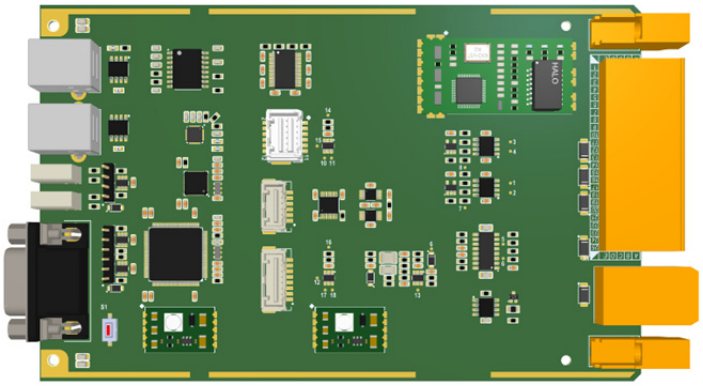


Рисунок 9 – Внешний вид платы приемо-передатчика

Таблица 7 – Технические характеристики платы приемопередачи

Наименование характеристики	Значение характеристики
Аналоговые входные напряжения, В	+5, +12
Дискретные входные напряжения, В	+28,8
Интерфейсы передачи данных, (скорость передачи, Мбит/с)	CAN (1)
Отладочный интерфейс, (скорость передачи, Мбит/с)	Ethernet (10/100), UART (57.6), USB2.0

Объединяющая плата

Коммутация печатных плат осуществляется через объединяющую плату (кросс-плату), приведенную на рис. 10. Разъемы для подключения печатных плат к объединяющей плате выбираются согласно стандарту МЭК 61076-4-101. Для точного позиционирования и фиксации печатных плат, встраиваемых в кросс-плату, используются жесткие направляющие штифты. Реализована возможность подключения 7 модулей к объединяющей плате. При этом каждый модуль может подключаться к любому разъему объединяющей платы.

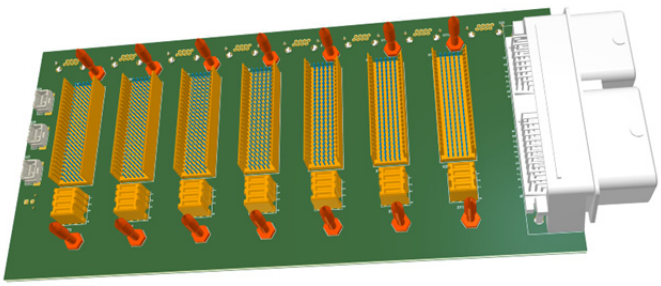


Рисунок 10 – Объединяющая плата

Использование модульного подхода при разработке мобильных робототехнических комплексов обладает многими преимуществами. Использование модулей упрощает процесс разработки робототехнического комплекса в части электроники, требует гораздо меньше времени по сравнению с подходом, когда все платы разрабатываются индивидуально для каждого узла в своем форм-факторе. Удешевляется стоимость печатных узлов комплекса, так как закупка единого набора комплектующих и единых плат выйдет дешевле покупки отдельных различных плат с раздельными наборами комплектующих на каждую. Использование модульного подхода позволяет существенно расширять функционал робототехнического комплекса путем добавления дополнительных модулей. Упрощается и ускоряется процесс отладки МРК.

Для крупных робототехнических комплексов наилучшим решением выглядит единый блок управления, представляющий собой каркас, состоящий из отдельных функциональных модулей единого типоразмера. Такой подход существенно упрощает ремонт изделия неквалифицированным персоналом в неподходящих условиях, так как позволяет просто заменить вышедший из строя модуль, не трогая остальную систему.

Для унификации решений по модульному построению робототехнических систем оптимальным решением является использование стандарта МЭК 297, который определяет габариты печатных плат, расположение крепежных отверстий и размеры блочного каркаса для фиксации модулей с печатными платами в стойке. В основании корпуса находится объединяющая плата, к которой подключаются периферийные модули с определенным функционалом. Схемотехническая реализация позволяет осуществлять горячую замену модулей в процессе работы устройства.

Важно отметить, что в первую очередь данные решения предназначены для использования в стационарных устройствах, например, в серверных блоках или пультах дистанционного управления. Для применения подхода в составе робототехнических систем с ударными и вибронагрузками, в условиях агрессивных сред и других внешних факторов рекомендуется ориентироваться на стандарт VITA 48.0 VPX REDI, определяющий конструктивные требования к системам с корпусным охлаждением для применения в оборонных или авиационно-космических комплексах.

На основании стандартов МЭК 297 и VITA 48.0 VPX REDI в ЦНИИ РТК разработан макет системы управления мобильными робототехническими платформами с модульной архитектурой с возможностью применения в крупных робототехнических платформах. Из основных недостатков стоит отметить большие габариты блока (у разработанного макета габариты составляют 132,5x280x180 мм) и большую массу за счет теплоотводящих кожухов печатных плат и радиаторов на корпусе.

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 075-01195-20-01.

Литература

1. ГОСТ Р МЭК 60297-3-101 – 2006. Блочные каркасы и связанные с ними вставные блоки. Размеры конструкции серии 482,6 мм (19 дюймов).

2. ГОСТ Р МЭК 60297-3-104 – 2009. Размеры блочных каркасов и вставных блоков, зависящие от серии применяемых разъемов. Размеры конструкции серии 482,6 мм (19 дюймов).

3. ГОСТ Р МЭК 60917-1 – 2011. Модульный принцип построения базовых несущих конструкций для электронного оборудования.

4. ГОСТ Р МЭК 61076-4-101 – 2001. Соединители для электронного оборудования. Соединители для печатных плат.

5. ANSI/VITA 48.0 – 2020 VPX REDI: Ruggedized Enhanced Design Implementation Mechanical Base Specification.

С.П. Кульгина, Д.С. Попов, И.Р. Черемный

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ АРХИТЕКТУРЫ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ МОБИЛЬНОГО РОБОТА С УЧЁТОМ РАЗДЕЛЕНИЯ НА ПОДСИСТЕМЫ МЯГКОГО И ЖЁСТКОГО РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург, sofa221098@yandex.ru, d.popov@rtc.ru, i.cheremnyy@rtc.ru

Аннотация

На сегодняшний день с увеличением объёма обрабатываемой информации существенно возросли требования к производительности бортовых вычислителей мобильных роботов. Прослеживается тенденция к увеличению числа используемых в роботе процессоров и вычислительных блоков.

В работе рассматриваются принципы разработки архитектуры распределенной информационно-управляющей системы мобильного робота, основанной на распределении решаемых задач между вычислительными блоками, с учетом разделения на подсистемы «мягкого» и «жесткого» реального времени. Для этого разобраны и описаны примеры решаемых подсистемами задач, представлена обобщенная структурно-функциональная схема информационно-управляющей системы, рассмотрены варианты построения подсистем в зависимости от класса мобильного робота.

Для иллюстрации подхода приведена функциональная схема материнской платы мобильного робота сверхлегкого класса на основе гетерогенного микропроцессора STM32MP157AAC3.

Ключевые слова: информационно-управляющая система, мобильный робот, «мягкое» реальное время, «жесткое» реальное время, система на кристалле, программируемая логическая интегральная схема.

S.P. Kulgina, D.S. Popov, I.R. Cheremnyy

FEATURES OF BUILDING THE ARCHITECTURE OF A DISTRIBUTED INFORMATION AND CONTROL SYSTEM OF A MOBILE ROBOT, TAKING INTO ACCOUNT THE DIVISION INTO SUBSYSTEMS OF SOFT AND HARD REAL TIME

Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics Russian Federation, Saint-Petersburg, sofa221098@yandex.ru, d.popov@rtc.ru, i.cheremnyy@rtc.ru

Abstract

Today, with the increase in the volume of processed information, the requirements for the performance of on-board computers of mobile robots have significantly increased. There is a tendency to increase the number of processors and computing units used in a robot.

The paper discusses the principles of developing the architecture of a distributed information and control system of a mobile robot, based on the distribution of tasks to be solved between computing units, taking into account the division into subsystems of «soft» and «hard» real time. For this purpose, examples of problems solved by subsystems are analyzed and described, a generalized structural and functional scheme of the information and control system is presented, options for building subsystems depending on the class of the mobile robot are considered.

To illustrate the approach, a functional diagram of the motherboard of an ultralight class mobile robot based on the STM32MP157AAC3 heterogeneous microprocessor is shown.

Key words: information and control system, mobile robot, «soft» real time, «hard» real time, system on chip, programmable logic integrated scheme.

Одной из важнейших и актуальных задач развития техники на сегодняшний день является создание мобильных роботов с целью использования их в различных областях жизни человека [1, 2]. В современном мире мобильные роботы играют значительную роль, поскольку они широко применяются в промышленности, медицине, образовании, сельском хозяйстве, автомобилестроении и других важных для человечества сферах. Помимо прочего, в настоящее время активно разрабатываются мобильные роботы, прямым назначением которых является устранение последствий различной степени тяжести техногенных и природных катастроф, то есть работа в крайне опасных

условиях для жизни человека, а также роботы, используемые в космонавтике и военно-промышленном комплексе.

К мобильным роботам, решающим стратегически важные, ответственные задачи, в зависимости от узконаправленной специализации каждого подкласса, предъявляются различные требования, касающиеся наличия на борту необходимой аппаратуры, продолжительности работы робота в условиях автономности, производительности бортового компьютера, габаритов, скорости передачи данных и прочего.

Задачи и состав информационно-управляющей системы

Диапазон функциональных возможностей мобильного робота определяется в первую очередь его информационно-управляющей системой (ИУС). ИУС – это цифровая система контроля и управления некоторым реальным объектом [3]. В области роботостроения ИУС состоит из информационно-измерительной системы, системы связи и непосредственно системы управления.

В связи с отмечаемым в работе [4] серьезным ростом требований к производительности бортовых вычислителей роботов в настоящее время существует необходимость усовершенствования ИУС. Наблюдаемая тенденция к увеличению числа используемых в роботе процессоров приводит к идее создания архитектуры ИУС, основанной на распределении решаемых задач между процессорами, каждый из которых несет ответственность за выполнение определенного перечня задач.

Одной из задач, решаемых мобильными роботами, в силу своей специфики, является задача перемещения в заданную целевую локацию. Одним из наиболее очевидных вариантов решения данной задачи является навигация в режиме телеуправления человеком-оператором с использованием бортовых средств телемеханики. Сигнал, получаемый с бортовых сенсорных систем, обрабатывается бортовым процессором и отсылается на пульт управления посредством каналов связи – кабелей или эфиров радиосвязи. Данный подход можно назвать достаточно эффективным, поскольку все управление производится человеком-оператором. Однако, по ряду причин, его нельзя назвать универсальным решением.

Во-первых, как каналы радиосвязи с оператором, так и кабели, чрезвычайно чувствительны к разного рода воздействиям извне, таким как шумы, помехи и наводки. Более того, на качестве радиоэфира серьезно сказывается наличие преград, не способных пропускать радиосигнал. Также существует возможность столкнуться с попытками сознательного подавления радиосигнала системами радиоэлектронной борьбы. В силу вероятности потери радиосвязи возникает необходимость присутствия на борту систем, позволяющих роботу самостоятельно вернуться в зону стабильной связи. Если же обмен данными с роботом осуществляется по кабелю связи, то стоит отметить, что дальность перемещения робота в этом случае ограничивается длиной кабеля, а использование чрезвычайно длинных кабелей повлечет за собой серьезное увеличение нагрузки на двигатели, что необходимо учитывать при проектировании.

Во-вторых, человек-оператор должен быть сосредоточен на решении задач, касающихся стратегического уровня конкретной операции, как, например, анализ обстановки. Необходимость в постоянном контроле перемещения робота чревата упущениями со стороны оператора, что может повлечь серьезные ошибки и привести к негативным последствиям [5]. Следовательно, имеет смысл говорить о целесообразности реализации альтернативных режимов навигации робота, таких как полуавтономный и автономный режимы навигации.

Автономное планирование траектории движения мобильного робота позволяет обеспечить повышенную проходимость робота в условиях окружающей среды, препятствующих использованию режима телеуправления человеком-оператором. Автономность в данном контексте подразумевает планирование траектории движения силами бортовой аппаратуры робота. Полуавтономный же режим совмещает возможности автономного режима управления и режим телеуправления, что, как и в случае с автономным режимом, влечет за собой необходимость наличия на борту робота производительных вычислителей. Более того, специфика применения отдельных мобильных роботов, в частности, работы по разминированию территории, обуславливает превалирование критерия безопасности траектории над критерием эффективности распределения энергоресурсов, что также на порядок увеличивает требования к производительности бортовых вычислителей.

В контексте решения задачи безопасного передвижения робота в условиях неопределенности параметров внешней среды, а также для решения иных задач, встает вопрос о необходимости наличия на борту робота, в зависимости от специфики применения и назначения отдельно взятой модели, так называемых сенсорных систем, позволяющих осуществлять определение ориентации и положения робота в пространстве, различных параметров движения робота, систем, осуществляющих определение физических и химических свойств окружающего робота пространства, а

также систем, позволяющих получить информацию, касающуюся общей картины состояния окружающей робота обстановки.

К первой упомянутой группе относятся системы, выполняющие функцию получения информации с целью обеспечения управления движением и, если существует такая необходимость, силового воздействия на окружающую среду. Такими системами могут быть датчики перемещения, скорости, навигационные системы, акселерометры, гироскопы и прочие. Назначением второй группы систем является сбор данных о свойствах среды, в которой находится робот, с целью передачи этих данных оператору или самостоятельного вычисления стратегии поведения в изменяющихся условиях. К таким системам относятся датчики положения, датчики звука, света и освещенности, температурные датчики, и многие другие. Объединяющими факторами для двух описанных групп систем являются необходимость работать в так называемом «жестком» реальном масштабе времени и сравнительно невысокие требования к вычислительным мощностям бортового процессора.

Термин «реальный масштаб времени» подразумевает исполнение такого требования, предъявляемого к аппаратному и программному обеспечению, как своевременная реакция на внешние события. Под своевременной реакцией, в данном случае, подразумевается, что скорость формирования управляющего воздействия на объект внешней среды должна быть значительно выше скорости отправления запросов на изменение состояния данного объекта [6]. Определение «жесткое» реальное время, в свою очередь, накладывает ограничения на нарушение поставленных для исполнения задачи сроков. Например, выход за поставленные временные рамки может привести к критическому сбою системы.

Последняя же группа систем отличается тем, что обеспечивает робота наиболее полным объемом данных о внешней обстановке, которые не в состоянии предоставить устройства из ранее упомянутых групп систем. Сюда входят видеокамеры, устройства для сканирования пространства, тепловизоры. Поскольку к функционалу робота добавляется необходимость обработки данных, поступающих с этих устройств, наличие на борту робота представителей последней группы влечет за собой резкое возрастание уровня требований к производительности бортовых вычислителей робота.

Стоит отметить, что такие задачи, как обработка видеоинформации, также требуют своевременного решения, однако задержки, в данном случае, допустимы, поскольку не являются критичными. Для восстановления скорости реакции могут быть предприняты такие меры, как снижение количества кадров в видео. То есть, можно сделать вывод, что к таким задачам предъявляется требование «мягкого» реального времени.

Организация структуры ИУС мобильного робота

Принимая во внимание ширину диапазона и разнообразие решаемых мобильным роботом задач, а также требования, предъявляемые бортовыми системами робота, к уровню производительности бортовых вычислителей, проблему, решаемую в данной работе, можно сформулировать следующим образом: необходимость организации структуры ИУС мобильного робота, и построение архитектуры ИУС мобильного робота на основе полученной структуры.

Существует несколько принципов, которые заложены в базис построения ИУС робота [7]:

1. принцип адаптации к условиям изменяющейся внешней среды (способность робота приспосабливаться к динамично меняющимся условиям окружающей среды, вырабатывая целесообразную стратегию поведения и закрепляя ее в памяти);
2. принцип многоуровневой иерархической организации управления (различные функции управления, например, восприятие информации и ее обработка, распределяются по нескольким уровням приоритетности);
3. принцип блочности управления (принцип синергий, формирование и запоминание определенных блоков — взаимосвязанных действий, часть которых заложена изначально, а другая — выработана в процессе получения опыта).

В системах управления, как в наиболее важной составляющей ИУС, определяющей общую стратегию поведения робота, в зависимости от условий применения, могут реализовываться три различных принципа управления: программного (жестко программируемого), адаптивного и интеллектуального. Системы, в которых заложен принцип программного управления, требуют определенности и постоянства условий и параметров осуществляемой работы. Это значит, что рабочая среда робота должна быть организована строжайшим образом. Робот четко следует заложенной программе, которая содержит объем информации, никак не меняющийся в процессе сеанса работы. В отличие от жестко программируемых, системы, реализующие принцип адаптивного управ-

ления, содержат сенсоры, позволяющие в процессе работы корректировать движения робота на основе поступающей извне информации, однако адаптивные системы, как и жестко программируемые, следуют стратегии, изначально заложенной в программе. Интеллектуальные системы, в свою очередь, способны самостоятельно разрабатывать программу действий, ориентируясь лишь на поставленные цели, что дает возможность утверждать - интеллектуальные системы являются наиболее совершенными.

Следует отметить, что ИУС, в упрощенном виде, являет собой совокупность трех обширных элементов: программной части, аппаратной части и данных. В свою очередь, аппаратную часть можно условно разбить на электронную и механическую составляющую. Наибольший интерес представляет именно аппаратная часть, то есть физический базис ИУС, а точнее ее электронная составляющая, поскольку разработка архитектуры ИУС подразумевает разработку непосредственно электронной составляющей аппаратной части ИУС робота.

Апеллируя к специфике применения мобильных роботов, можно составить представление об универсальном функционале класса мобильных роботов. В обобщенный перечень возможностей мобильного робота должны входить:

- самостоятельное передвижение робота;
- возможность ориентации в пространстве, то есть умение проводить анализ окружающей обстановки с целью избегания столкновения с объектами-препятствиями;
- возможность фиксации и последующей обработки сенсорной информации, получаемой бортовой аппаратурой робота;
- возможность самостоятельного планирования траектории движения в заданную целевую локацию и выбора из числа полученных потенциальных траекторий наиболее безопасной;
- возможность получать команды и передавать данные человеку-оператору по каналам связи.

В соответствии с вышеизложенными соображениями, структурно-функциональная схема должна содержать следующие подсистемы, реализующие функциональные требования:

- непосредственно система управления;
- исполнительная система, получающая команды от системы управления и, на основе этих команд, исполняющая манипуляции во внешней среде;
- система передачи данных, позволяющая роботу получать команды оператора и отсылать ему данные;
- оператор, следящий за точностью исполнения команд и прочим;
- сенсорная система, занимающаяся сбором информации из окружающей робота среды;
- система обработки поступающей сенсорной информации;
- система, занимающаяся формированием траектории;
- навигационная система, отвечающая за местонахождение робота и его ориентацию в пространстве;
- система диагностики, реализующая анализ состояния робота.

Данные системы связаны следующим образом: человек-оператор с помощью системы передачи данных может отдавать команды системе управления напрямую и задает целевые локации системе формирования траектории движения робота. Сам же оператор, все через ту же систему передачи данных, получает данные с системы диагностики, системы обработки сенсорной информации и результаты расчетов системы формирования траектории движения робота. В свою очередь, система обработки сенсорной информации получает данные с сенсорной системы, которая берет данные из внешней среды. Принимая во внимание тот факт, что сенсорная система, в сущности, является некоторой совокупностью датчиков робота, то информация, поступающая с этой системы, может иметь разнообразное предназначение, то есть система обработки сенсорной информации может передавать полученные и обработанные данные таким системам, как навигационная система, система формирования траектории движения и напрямую в систему передачи данных. Навигационная система, получая информацию от системы обработки сенсорной информации, передает ее системе формирования траектории и системе диагностики. Система управления, получая результаты расчетов от системы формирования траектории движения, а также непосредственно от человека-оператора с помощью системы передачи данных, отдает команды на исполнительную систему, которая занимается их реализацией во внешней среде. Управляющие сигналы, поступают на систему диагностики, которая отсылает их человеку-оператору посредством системы передачи данных.

Обобщенная структурно-функциональная схема ИУС мобильного робота представлена на рис. 1.

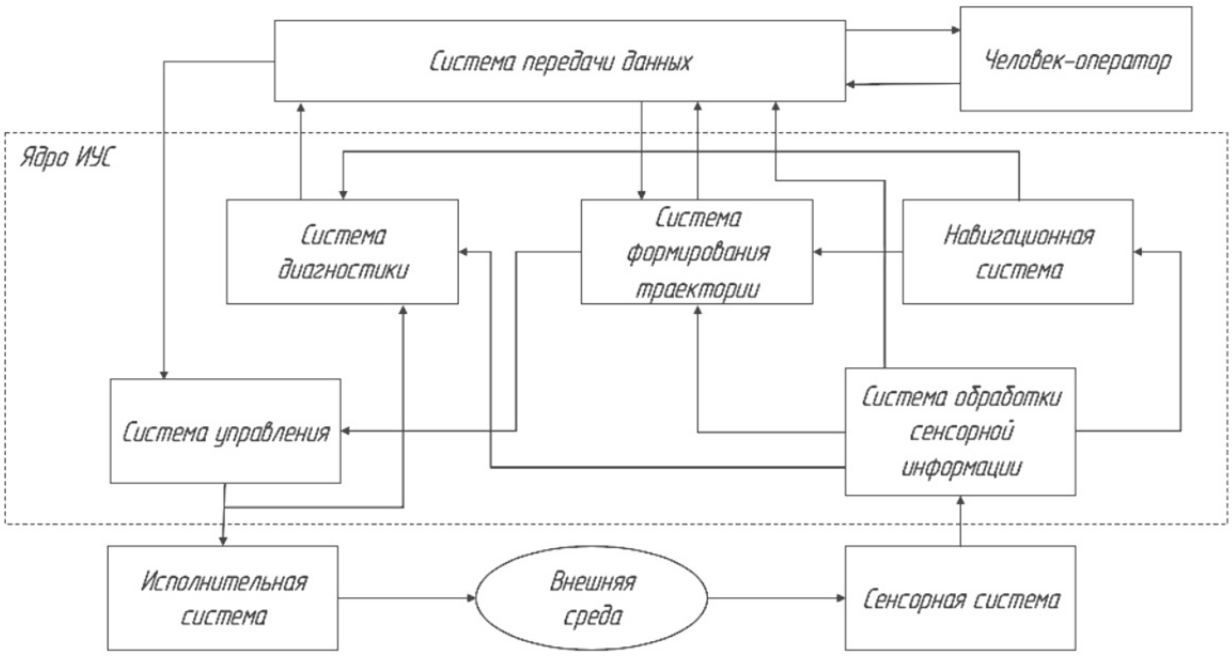


Рисунок 1 – Обобщенная структурная схема ИУС МР

С учетом масштаба времени, ядро структурно-функциональной схемы информационно-управляющей системы робота можно разделить на модуль, производящий управление в масштабе «жесткого» реального времени, и модуль, работающий с «мягким» реальным временем. На рис. 2 представлена реорганизованная структурно-функциональная схема робота, построенная с учетом необходимости работы в том или ином масштабе времени.

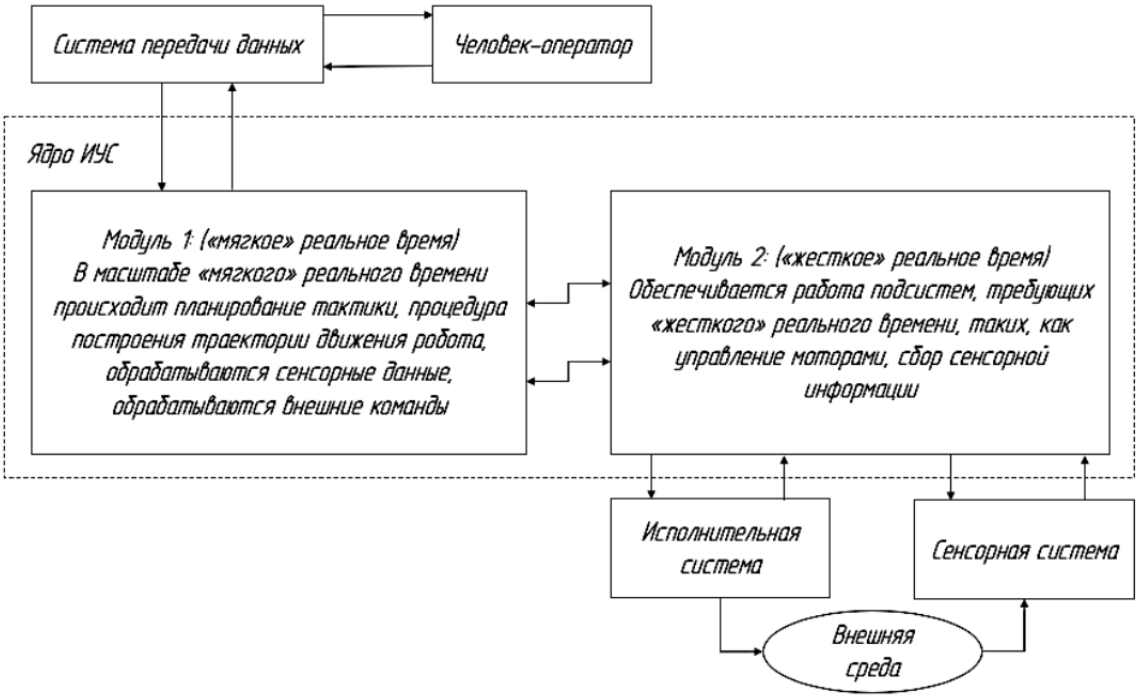


Рисунок 2 – Сокращенная структурно-функциональная схема ИУС МР

Первый модуль содержит подсистему мягкого реального времени, выполняющую обработку видеоинформации, решающую задачи автономной навигации и т. д. Он непосредственно связан с системой передачи данных и представляет собой верхний иерархический уровень структуры ядра информационно-управляющей системы мобильного робота.

Второй модуль включает подсистему жёсткого реального времени, отвечающую за низкоуровневое управление роботом (сенсорами, приводами, системой энергообеспечения) и подсистему жёсткого реального времени, отвечающую за низкоуровневое управление съёмным оборудовани-

ем, критичным к времени реагирования, например, манипулятором. Данный модуль является нижним уровнем иерархии ИУС, поскольку он непосредственно подчинен первому модулю.

Модульная организация структуры ядра информационно-управляющей системы мобильного робота подразумевает модульную организацию аппаратной части системы, а именно центрального элемента системы управления – вычислителя. Для построения вычислительного ядра мобильных роботов сверхлёгкого и лёгкого классов могут быть применены различные элементы, в том числе:

- микроконтроллеры, включая специализированные;
- процессоры цифровой обработки сигналов;
- одноплатные компьютеры;
- программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС);
- комбинированные чипы.

В составе крупных робототехнических комплексов вычислитель может состоять из нескольких логических блоков и включать в себя:

- высокопроизводительный промышленный компьютер, обеспечивающий решение общих высокоуровневых задач управления;
- специализированный компьютер, занимающиеся задачами технического зрения и обработки информации;
- сеть микроконтроллеров, обеспечивающую низкоуровневое управление в режиме жёсткого реального времени всеми приводами и периферийными устройствами.

Микроконтроллеры чрезвычайно востребованы в современном мире, поскольку они обеспечивают управление в различных бытовых приборах и офисной технике. В робототехнике микроконтроллеры применяются в тех случаях, когда необходимо решать четко определенные задачи, не требующие интеллектуального управления, такие как управление моторами и датчиками [8]. В крупных робототехнических комплексах, как уже было отмечено ранее, несколько объединенных в сеть микроконтроллеров, входящих в состав вычислителя, могут обеспечивать низкоуровневое управления периферийными устройствами, однако производительности микроконтроллеров недостаточно, чтобы решать такие задачи, как оцифровка видео. Иными словами, вычислительных мощностей микроконтроллеров может не хватить для решения всего спектра задач, стоящих перед мобильными роботами.

Одноплатные микрокомпьютеры представляют собой полностью готовое решение. Они поддерживает операционные системы, в частности, Linux, обладают широкой периферией и высокой вычислительной производительностью. Однако, принимая во внимание требование, предъявляемое к габаритам роботов легкого и сверхлегкого классов, стоит отметить, что использование готового одноплатного компьютера не является целесообразным, поскольку размеры платы, в данном случае, напрямую влияют на конечные габариты робота. Более того, готовый одноплатный компьютер предполагает наличие портов для широкого спектра интерфейсов, которые, для решения той или иной задачи, теоретически могут быть нужны пользователю. В условиях четко поставленного технического задания, некоторые периферийные узлы могут оказаться излишними, что недопустимо, когда речь идет о максимальном сокращении габаритов.

Программируемые логические интегральные схемы обладают преимуществом, поскольку отсутствие заданной производителем логики работы интегральной схемы позволяет создавать конфигурируемые цифровые электронные схемы, задаваемые пользователем с помощью программы [9]. Однако, в сравнении с готовыми микропроцессорами, именно необходимость программно задавать внутреннюю конфигурацию ПЛИС является недостатком, поскольку данное обстоятельство серьезно усложняет процесс разработки.

Для модульной организации структуры ядра мобильных роботов сверхлёгкого и лёгкого классов наилучшим образом подходят комбинированные решения, включающие высокопроизводительное процессорное ядро и программируемую логическую интегральную схему или микроконтроллерный блок (процессорное ядро и периферия). Такая внутренняя организация комбинированных систем дает возможность разделить ядро на аппаратном уровне, что позволяет добиться снижения трудозатрат на разработку и отладку программного обеспечения, что в конечном итоге упрощает процесс изготовления робота в целом.

В контексте исследования бионического метода адаптивного управления и разработки алгоритмической базы в рамках данного исследования, проведен анализ вычислительных платформ для интеграции данного метода в бортовые системы управления малогабаритных мобильных роботов [5]. По результатам анализа, сделан вывод, что для решения поставленной задачи наилучшим образом подходит сочетание технологий «система на кристалле» (SoC) и «программируемая логика» (ПЛИС). Такой выбор обусловлен возможностью реализации на базе программируемой

логики параллельной обработки данных в контексте решения задачи построения траектории движения робота и возможности реализации алгоритмов обработки сенсорных данных, поступающих с бортовых камер робота, на базе интегральных микросхем SoC, вычислительным ядром которых является процессор. Иными словами, такое решение позволяет реализовать всю предварительную высокоскоростную обработку данных на ПЛИС, тогда как логическая работа и поддержка высокоуровневых протоколов реализуется на процессоре, где запускается операционная система Linux, которая позволяет работать с любой высокоуровневой логикой.

Комбинация ПЛИС и микропроцессора обладает преимуществом, поскольку отсутствие заданной производителем логики работы интегральной схемы позволяет создавать конфигурируемые цифровые электронные схемы, задаваемые пользователем с помощью программ, таких как VHDL или Verilog. Также стоит отметить, что такое решение является удачным с точки зрения производительности вычислительного ядра [10].

Комбинация двух различных типов процессоров сочетает в себе процессор с высокой вычислительной мощностью, позволяющий осуществлять обработку данных в режиме «мягкого» реального времени на базе операционной системы Linux, и подчиненный микроконтроллерный блок, способный осуществлять управление приводами и датчиками в «жестком» реальном масштабе времени, что для робототехнических систем является важным аспектом. Многоядерная архитектура и распределение задач между процессорами повышает гибкость и производительность системы. Также стоит отметить, что наличие двух разновидностей процессоров обуславливает наличие режимов энергопотребления за счет разделения задач между процессорами [11].

Помимо прочего, комбинация микропроцессора с микроконтроллером не требует дополнительного вмешательства пользователя для задания внутренней конфигурации логических ячеек, как ПЛИС-системы, что несколько упрощает процесс разработки.

Схема на основе гетерогенного микропроцессора STM32MP157AAC3

На основе одного из представленных выше комбинированных решений, а именно чипа STM32MP157AAC3, сочетающего в себе два высокопроизводительных процессорных ядра ARM Cortex-A7 и микроконтроллерное ядро ARM Cortex-M4, составлена функциональная схема материнской платы мобильного робота сверхлегкого класса, представленная на рис. 3.

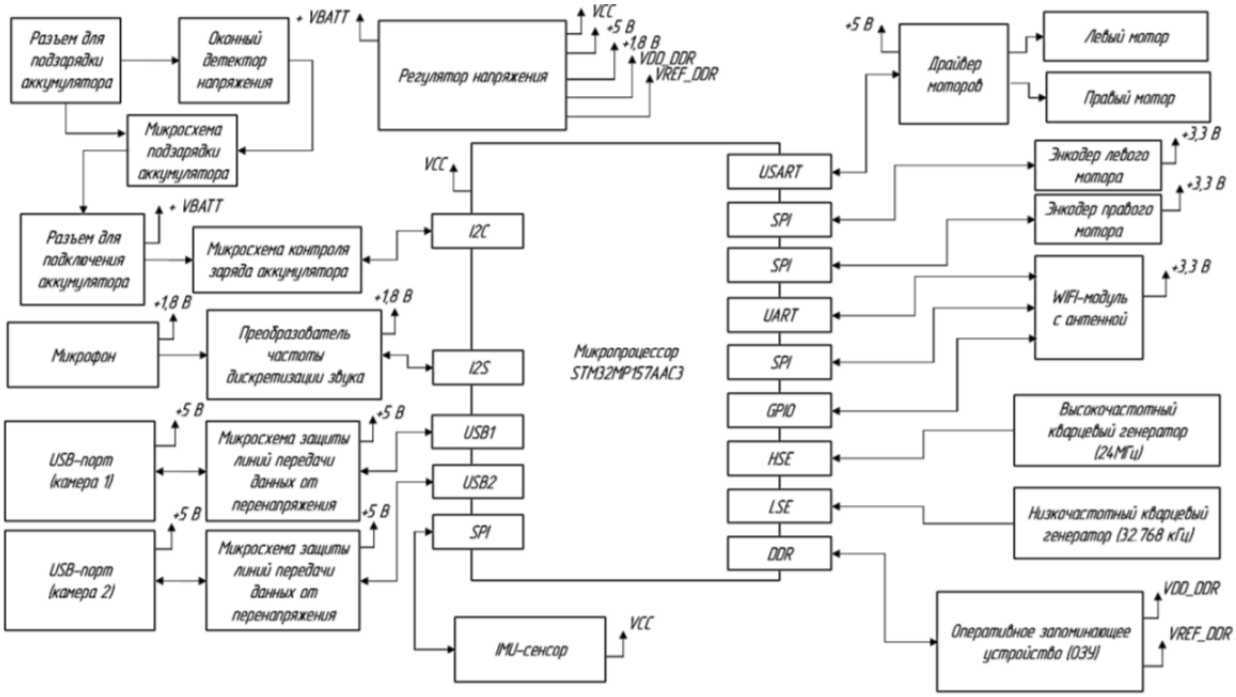


Рисунок 3 – Функциональная схема материнской платы мобильного робота сверхлегкого класса

В силу того обстоятельства, что данная микросхема построена на основе двух типов процессоров, внутренняя архитектура микросхемы STM32MP157AAC3 подразделяется на две условные зоны контроля: зона, контролируемая процессорным ядром ARM Cortex-M4, и зона, где контроль полностью осуществляется высокопроизводительными ARM Cortex-A7. Данное деление условно, поскольку маломощное, с точки зрения производительности, ядро ARM Cortex-M4 непосредственно подчинено ядрам ARM Cortex-A7. Поэтому периферийные устройства подразделяются на

те, что будут управляться непосредственно ядрами ARM Cortex-A7, и те, что управляются ядром ARM Cortex-M4. К первой группе относятся следующие устройства:

- оперативное запоминающее устройство;
- IMU-сенсор;
- видеокамеры;
- преобразователь частоты дискретизации звука для микрофона;
- WiFi-модуль с антенной.

Ко второй группе устройств соответственно относятся:

- микросхема контроля заряда аккумулятора;
- драйвер моторов;
- энкодеры моторов;
- регулятор напряжения.

Выбор конкретных интерфейсов связи центрального процессора с периферийными устройствами осуществляется в соответствии с принадлежностью устройства к одной из двух групп.

Таким образом, декомпозиция вычислительного блока, представляющая собой гибрид высокопроизводительного процессора с программируемой логической интегральной схемой или микроконтроллерным блоком, позволяет не только добиться снижения трудозатрат на разработку и отладку программного обеспечения, но и заметно повысить надёжность информационно-управляющей системы.

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 075-01195-20-01.

Литература

1. Field and Service Robotics. Results of the 8th International Conference /Eds. K. Yoshida, S. Tadokoro. Berlin — Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. 658 p.

2. Григорьев С.Н. Современное состояние и перспективы развития промышленной робототехники / С.Н. Григорьев, А.Г. Андреев, С.П. Ивановский // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2013. — №1. — С. 30–34.

3. Степанова А.С. Анализ развития информационно-управляющих систем и использованием научно-технологического форсайта / А.С. Степанова, Д.Ю. Муромцев // Известия самарского научного центра Российской академии наук. — 2009. — №5. — С.354-357.

4. Назаренко М.А. Микропроцессоры в бортовой информационной управляющей системе / М.А. Назаренко [и др.] // Международный журнал экспериментального образования. — 2016. — №12. — С. 245-247.

5. Бутов П.А. Разработка и исследование элементов систем управления, реализующих автономные режимы навигации для малогабаритных мобильных роботов [Текст]: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук (05.13.05) / Бутов Павел Александрович; Южный федеральный университет. – Таганрог, 2014. – 20 с.

6. Шемелин В.К. Проблемы управления технологическими процессами в машиностроении / В.К. Шемелин, Г.М. Мартинов // М: МГТУ «Станкин». — 2010. — С.6-8.

7. Василенко Н.В. Основы робототехники / Н.В. Василенко К.Д. Никитин В.П. Пономарёв А.Ю. Смолин // Томск: МГП «РАСКО». — 1993. — С. 486-492.

8. Водовозов А.М. Микроконтроллеры для систем автоматики: учебное пособие / А.М. Водовозов // Изд. 3-е, доп. и перераб. М: Инфра-Инженерия. — 2016. — С. 5-9.

9. Архитектура ПЛИС (FPGA) [Электронный ресурс] Режим доступа — URL: https://marsohod.org/11-blog/265-fpga (дата обращения 9.05.2020).

10. Intel FPGAs and Programmable Devices [Электронный ресурс] Режим доступа — URL: https://www.intel.com/content/www/us/en /products/programmable.html (дата обращения 7.05.2020)

11. STM32 High Performance MCUs [Электронный ресурс] Режим доступа — URL: https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32-highperformance-mcus.html (дата обращения 7.05.2020).

И.Б. Прямицын, А.В. Рогов, А.В. Полин

СФЕРА ПРИМЕНЕНИЯ УНИВЕРСАЛЬНОЙ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ПЛАТФОРМЫ

ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург, pib@rtc.ru, rogov@rtc.ru, polin@rtc.ru

Аннотация

Обоснована актуальность применения универсальной роботизированной платформы среднего класса для замены человека при выполнении тяжелых, рутинных и опасных для жизни и здоровья операций. Описаны сферы применения, такие как: строительные и землеройные работы, сельскохозяйственные и лесозаготовительные работы, охрана объектов и патрулирование территории, транспортировка объектов, пожаротушение, спасательные операции. Подобраны возможные варианты навесного оборудования для каждой из сфер потребления, описана требуемая степень автономности и автоматизации УРП.

Ключевые слова: универсальная роботизированная платформа, УРП, роботизированная платформа среднего класса, сферы применения роботизированной платформы**.**

I.B. Pryamitsyn, A.V. Rogov, A.V. Polin

UNIVERSAL ROBOTIC PLATFORM'S APPLICATION SCOPE

Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics Russian Federation, Saint-Petersburg, pib@rtc.ru,, rogov@rtc.ru, polin@rtc.ru

Abstract

We present the all-purpose medium-sized robotic platform that can replace human workforce in heavy-duty operations or under life-threatening working conditions. Some of the application areas for the platform include construction and excavation, agriculture and timber harvest, defense and security, freight hauling, firefighting, rescue missions. We explore possible working attachments options for each application area, determine necessary level of platform autonomy and automation.

Key words: all-purpose robotic platform, medium-sized robotic platform, applications for robotic platform.

За последние десятилетия мировая робототехника и технологии, связанные с ними, развиваются стремительными темпами, приобретая все большую возможность использования роботов в различных областях человеческой деятельности. В первую очередь, это связано с постоянным совершенствованием характеристик двигателей для роботов, источников энергии, вычислительных средств бортовых систем и развития средств сенсорного оснащения.

На протяжении последних лет темпы развития рынка наземных автономных роботизированных мобильных платформ (АРМП) существенно уступали темпам развития рынка беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Связано это было прежде всего с эффективностью применения БПЛА для нужд картографии и наблюдения. Вместе с тем, существенным недостатком БПЛА является ограниченная возможность взаимодействия с объектами среды. В настоящее время все более актуальными для автономных платформ становятся задачи не просто перемещения в заданную точку и ведения наблюдения, но и выполнение в заданной точке манипуляций объектами и/или выполнение иных технологических операций, а современный уровень развития систем управления позволяет оператору автономной платформы уже сейчас выполнять сложные действия в режиме телеприсутствия или супервизорном режиме.

Удаленное выполнение операций в неблагоприятных условиях изначально было целью создания АРМП. АРМП в основном задействовались при устранении последствий техногенных и природных катастроф. АРМП использовались при оценке разрушений Всемирного торгового центра (2001 г.), АЭС Фукусима (2011 г.), при поиске и эвакуации пострадавших от ураганов Вильма и Катрина (2005 г.), урагана Ике (2008 г.), грязевых оползней в Калифорнии (2005 г.) [1]

В 2017 году агентство «Markets and Markets» выпустило отчет, прогнозирующий рост объема рынка АРМП до 7 млрд. долларов США к 2025 году. Объем рынка в 2018 году оценивался на уровне 2,8 млрд. долларов США, совокупный среднегодовой темп роста, согласно отчету, оценивался в 14,81 % [2].

В октябре 2019 года появилась информация о размещении агентством «Market Study Report LLC» отчета по исследованию рынка АРМП, составившего к 2018 году объем 1,5 млрд. долларов США. Прогнозный объем рынка АРМП согласно отчету «Market Study Report LLC» к 2025 году составит 3,7 млрд. долларов США, достигнув этой величины с совокупным среднегодовым темпом роста на уровне 11,9 % [3].

Исходя из вышеописанного, развитие робототехники в настоящее время способствует расширению области применения АРМП. Можно привести основные области гражданского применения мобильных роботов:

- строительные и землеройные работы,
- сельскохозяйственные и лесозаготовительные работы,
- охрана объектов и патрулирование территории,
- транспортировка объектов,
- пожаротушение, спасательные операции.

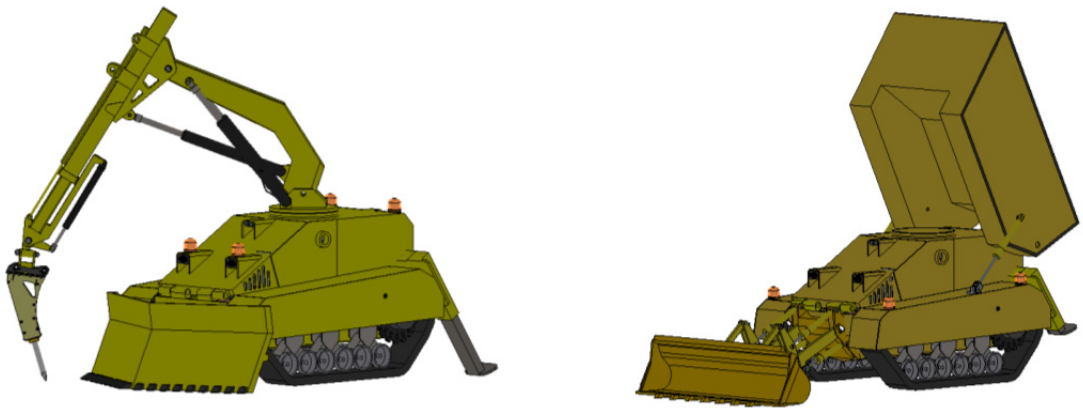
Для описанных выше задач рассмотрена технология их выполнения, проанализирован и предложен возможный комплект применяемого сменного оборудования и инструмента для каждого вида работ с целью оснащения универсальной роботизированной платформы (УРП) среднего класса (по ГОСТР 54344-2011).

Рассмотрим УРП, которая представляет собой гусеничное шасси на основе дизельной силовой установки с гидростатической трансмиссией.

В строительной сфере возможно использование такую УРП в тяжелых работах для замены человека или в рутинных работах для их автоматизации. Так, например, роботы для сноса сооружений хотя и работают медленнее, чем бригады по сносу, но их использование гораздо безопаснее и дешевле. Эти мобильные роботы используют разнообразные инструменты, такие как дробилки, ковши и т.п., чтобы разрушать строительные материалы. В настоящее время роботы по демонтажу занимают 90% всего рынка строительных роботов, и они являются одними из первых коммерчески жизнеспособных строительных роботов, которые заняли свою нишу в трудоемкой отрасли. Автоматизация сноса – это безопасность и эффективность, способность работать без перерывов днем и ночью, что которые обеспечивают существенную экономию средств для строительных и сносящих компаний. Хотя роботы по демонтажу имеют высокую начальную стоимость, что естественно для и следует ожидать от совершенно новой технологии, они рентабельны в долгосрочной перспективе, т.к. обеспечивают окупаемость инвестиций во времени. Обладая мощным потенциалом роста, роботы по демонтажу способны возглавить волну автоматизации в строительстве.

На рис. 1а представлена УРП с манипулятором, гидромолотом и отвалом. Применение данного робота возможно на разборе и расчистке завалов перед началом строительства, на стадии подготовки площадки. Наличие большого спектра сменного оборудования для манипуляторов подобного типа расширяет функциональные возможности мобильного робота.

На рис. 1б представлен вариант робота с ковшом и кузовом. Данная модификация может использоваться для выравнивания грунтовой поверхности, разбора завалов, для перемещения сыпучих объектов.



а) б)

Рисунок 1 – УРП с строительным навесным оборудованием

Универсальные роботизированные платформы, предназначенные для строительных и землеройных работ, могут оснащаться следующим перечнем сменных инструментов: передним отвалом, краном, манипулятором, пробоотборником, буровой установкой, гидромолотом, аутригерами, кузовом и бетоносмесителем.

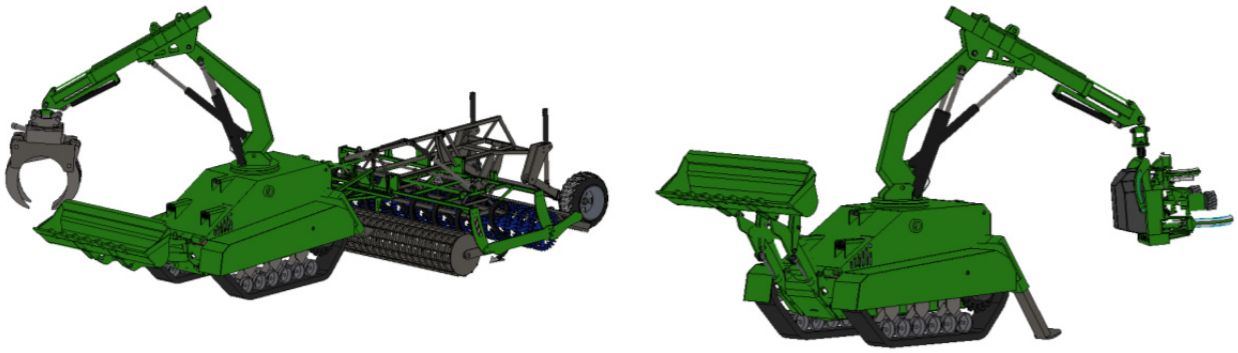
Потенциал использования универсальной роботизированной платформы повышенной проходимости для нужд агропромышленного комплекса России базируется на следующих факторах:

- повышенная проходимость позволит использовать УРП на переувлажненных и песчаных почвах;
- использование гусеничного движителя снижает удельное давление на грунт, что сохранность плодородного слоя или слоя почвы подстилающей поверхности;
- возможность длительной автономной работы, которая обеспечивается применением дизельной силовой установки (с функцией самостоятельной автономной дозаправки из распределенных на местности автоматизированных заправочных пунктов), что, в свою очередь, повышает энерговооруженность платформы, и позволяет расширить номенклатуру устанавливаемого на платформу оборудования;
- небольшие габариты платформы снижают затраты на организацию мест хранения и обслуживания.

Рассматриваемая УРП может успешно применяться и в сегменте тракторов тягового класса. Перспективно выглядит ее использование в качестве садового трактора. Сельскохозяйственное производство - сезонное. Возможность установки различного навесного оборудования, согласованного с сезонностью работ, увеличивает сроки использования УРП, уменьшая время простоя платформы. В России работы в этом направлению получают поддержку как Российского Фонда Фундаментальных Исследований (РФФИ) [6], так и Министерства сельского хозяйства. В рамках Подпрограммы Госпрограммы на 2013-2020 годы «Техническая и технологическая модернизация, инновационное развитие» ставились цели повышения инновационной активности сельскохозяйственных товаропроизводителей и количества реализованных инновационных проектов. В рамках основного мероприятия «Реализация перспективных инновационных проектов в агропромышленном комплексе» предусмотрена государственная поддержка развития инновационных проектов в растениеводстве, в том числе ресурсосберегающих технологий, включая точное земледелие, а также инновационных проектов по мелиорации земель сельскохозяйственного назначения.

Положительный эффект от применения УРП повышенной проходимости в агротехнике, а именно в точном земледелии, прежде всего может быть достигнут путем установки на нее оборудования, позволяющего напрямую определить и восполнить потребности растений в воде. Использование таких платформ также позволит автоматизировать процесс составления агрохимических картограмм, характеризующийся необходимостью забора образцов почвы с различных участков полей.

На рис. 2 представлена модель мобильного робота с ковшом, манипулятором с захватным устройством и плугом. Данная модификация может использоваться для подготовки полей к посеву, перемещения сыпучих и не сыпучих объектов. Навесное оборудование является сменным, поэтому возможно создание различных конфигураций для выполнения широкого спектра задач.



а) б)

Рисунок 2 – УРП с навесным оборудованием для агропромышленности и лесозаготовительных работ

Универсальные роботизированные платформы, предназначенные для сельскохозяйственных и лесозаготовительных работ, могут оснащаться следующим перечнем сменных инструментов: кузовом, кусторезом, сенокосилкой, газонокосилкой, плугом, буром, вилами, лебедкой, снегоуборщиком, передним отвалом, телескопической стрелой со сменным рабочим инструментом, кузовом с мусороприемником и разбрызгивателем жидких растворов или сухих смесей.

Охранная модификация УРП может применяться для охраны и защиты объектов или для борьбы с беспорядками.

Модификация робота, представленная на рис. 3, может использовать ковш для разбора мусора и баррикад. Установленное на башне нелетальное оружие, позволит дать отпор и разогнать нападающих.

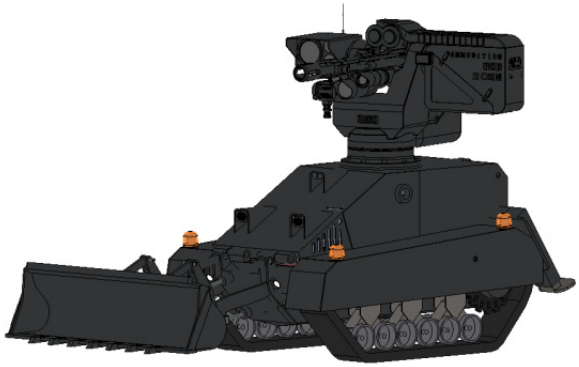


Рисунок 3 – УПР для охраны объектов

Роботизированные платформы, предназначенные для охраны объектов и патрулирования, могут оснащаться следующим перечнем сменного оборудования: видеокамерами, тепловизорами, осветителями, ИК осветителями, сигнально-говорящими устройствами и нелетальным вооружением.

Для России ускоренное освоение Крайнего Севера и Арктики, включая побережье и шельф арктических морей, является важным условием повышения обороноспособности и экономического потенциала страны. Прежде всего, оно означает развитие базовых отраслей промышленности (горнодобывающей, нефтяной и газовой) с созданием соответствующей инфраструктуры, транспорта и связи. В этом регионе сосредоточено до 80 % запасов полезных ископаемых РФ, что составляет почти треть мировых ресурсов. Арктическое побережье представляет собой протяженный и крайне ответственный участок границы в направлении, наиболее уязвимом с точки зрения обороноспособности. Вместе с тем, для России Арктика и Дальний Восток являются единственными воротами в Мировой океан, свободными от контроля со стороны других государств. К негативным факторам, существенно затрудняющим освоение Арктической зоны РФ, относятся экстремальные природно-климатические условия, очаговый характер промышленно-хозяйственного освоения территорий, удаленность от основных промышленных центров и уязвимость экологических систем.

Один из путей решения проблемы освоения Крайнего Севера и Арктики заключается в применении беспилотных УРП.

На рис. 4 представлена УРП для транспортировки объектов с манипулятором для погрузки и разгрузки, а также сцепным устройством для соединения с прицепом.

Рисунок 4 – Мобильный транспортировочный робот

Роботизированные платформы, предназначенные для транспортировки объектов, могут оснащаться следующим перечнем сменного оборудования: прицепом, отцепным устройством и системами автонавигации и группового управления.

Из предложений МЧС России для внесения в проект государственной программы фундаментальных и поисковых научных исследований в области обеспечения обороны и безопасности можно выделить несколько ключевых пунктов:

- организация автономной сетевой инфраструктуры связи в зоне чрезвычайных ситуаций с использованием систем многоспектрального видеонаблюдения, трехмерного лазерного сканирования, средств спутниковой связи и технологии помехозащищенного ортогонально мультиплексирования радиочастот для обеспечения управления и видеонаблюдения робототехнических комплексов;
- разработка многофункциональных робототехнических комплексов для проведения аварийно-спасательных и других неотложных работ в условиях радиоактивного и химического загрязнения, в том числе ведения воздушного и наземного мониторинга районов чрезвычайных ситуаций (ЧС), оснащенные системами фото и видео разведки, а также радиационного и химического контроля;
- разработка многофункциональных телеуправляемых комплексов для проведения мониторинга и технологических операций на подземных и подводных потенциально опасных объектах.

Также возникают более узкоспециализированные задачи, например, для горноспасательных работ: разведка в горных и шахтных зонах ЧС (взрывозащищенное и герметичное исполнение).

Версия робота для пожаротушения может быть оснащена различным спектром оборудования, например, брандспойтом для тушения открытого огня, ковшом для разбора завалов и доступа в заваленные места, емкостью для воды, огнетушителями, фланцем для подключения к внешнему источнику подачи воды (рис. 5).

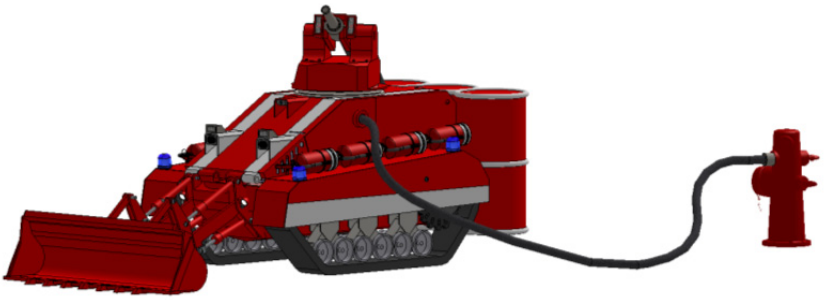


Рисунок 5 – Модификация мобильного робота для пожаротушения

На случай необходимости разрушить перекрытие, преграду, дверь и т.п. возможна модификация мобильного робота с манипулятором и сменным функциональным модулем и отвалом.

Функционирование данной платформы обеспечивается:
- оператором в непосредственной близости с платформой,
- удаленное управление оператором при работе, например, в экстремальных условиях,
- автоматическим выполнением запрограммированных действий.

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 075-01195-20-01.

Литература

1. Moud, H.I.; Shojae, A.; Flood, I. Current and Future Applications of Unmanned Surface, Underwater and Ground Vehicles in Construction. In Proceedings of the Construction Research Congress, New Orleans, LA, USA, 2–4 April 2018; pp. 106–115.

2. Отчет агентства «Markets and Markets» «Unmanned Ground Vehicles (UGV) Market worth $7.0 billion by 2025» [Электронный ресурс] URL: https://www.marketsandmarkets. com/PressReleases/unmanned-ground-vehicles.asp (Дата обращения: 15.04.19).

3. Отчет агентства «Market Study Report LLC» «Unmanned Ground Vehicle (UGV) Market Size Set to Register 3690 million USD by 2025» [Электронный ресурс] URL: https://www.marketwatch.com/press-release/at-119-cagr-unmanned-ground-vehicle-ugv-market-size-set-to-register-3690-million-usd-by-2025-2019-10-04 (Дата обращения: 15.04.19).

4. ГОСТ Р 54344-2011 Техника пожарная. Мобильные робототехнические комплексы для проведения аварийно-спасательных работ и пожаротушения. Классификация. Общие технические требования. Методы испытаний.

5. Описание гусеничных шасси производства ООО «БалтГеоКомплекс» [Электронный ресурс] URL: https://bgk-spb.ru/track-three.php (Дата обращения: 15.04.19).

6. Федеральная научно-техническая программа развития сельского хозяйства на 2017 - 2025 годы [Электронный ресурс] URL: http://mcx.ru/upload/iblock/ 1e9/ 1e97bd2630e613804cf5ef016063bd60.pdf (Дата обращения: 15.04.19).

А.В. Лобачев, А.В. Местников, А.М. Мудранов

РАЗРАБОТКА АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ОБЪЕДИНЕНИЯ И СОГЛАСОВАНИЯ ГРУПП БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАЮЩИХ АППАРАТОВ (ДРОНОВ)

Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, Санкт-Петербург, HappyUnFace@mail.ru

Аннотация

В данной статье рассматривается объединение беспилотных летающих аппаратов (дронов) в группы. Так же рассматривается наделение отдельных единиц разными ролями в соответствии с иерархией построения и обеспечение их соответствующими аппаратными узлами согласования, связи и управления.

Ключевые слова: беспилотные летающие аппараты, дроны, рои дронов.

A.V. Lobachev, A.V. Mestnikov, A.M. Mudranov

DEVELOPMENT OF THE HARDWARE COMPLEX OF COMBINATION AND ACCORDING TO UNMANNED AIRCRAFT GROUPS (DRONES)

Military Academy of the Signal Corps named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, St. Petersburg, HappyUnFace@mail.ru

Abstract

This article discusses the combination of unmanned aerial vehicles (drones) into groups. It also considers the vesting of individual units with different roles in accordance with the hierarchy of construction and their provision with the corresponding hardware nodes of coordination, communication and control.

Key words: unmanned aerial vehicles, drones, swarms of drones.

В настоящее время использование компактных бесплотных летающих аппаратов, таких как, например, дроны, представляет широкие возможности для решения множества задач в самых разных областях, как гражданских, так и военных, например: картографирование местности, поиск объектов и людей при чрезвычайных ситуациях и стихийных бедствиях, обнаружение очагов пожаров, разведка и целеуказание, использование в качестве платформы для закрепления датчиков и ретрансляторов разного рода сигналов.

Однако отдельные единицы весьма ограниченны в своих возможностях и в выполняемых функциях. И некоторые из этих недостатков возможно решить с помощью объединения отдельных единиц в группы, что является перспективным направлением развития беспилотных летающих аппаратов. Такие объединения могут представлять собой группы в несколько единиц или формации в несколько сотен единиц, так же как и иметь разные формы и алгоритмы движения относительно друг друга. Подобное позволяет распределить функции, необходимые для решения комплексной задачи, на разные аппаратные платформы, а так же дублировать их для увеличения надёжности измерений, повышения площади покрытия и углов обзора датчиков и камер. К тому же объединение дронов в группы позволяет им позиционироваться относительно друг друга, что увеличивает общую точность движение и позиционирования каждой единицы в отдельности.

Подобные объединения нашли своё применения в так называемых шоу дронов в виде развлекательного представления. К тому же подобные объединения нашли своё применение в военном деле в качестве средств радиоэлектронной борьбы, зашумления средств противовоздушной обороны и даже переносчиков снарядов для точечных бомбардировок.

В больших объединениях дронов, как правило, одной единице или нескольким отдаётся роль «центра управления и координации», относительно которого остальные аппаратные единицы координируют свои траектории, перемещения и позиции и которым управляет оператор в случаях, если управление производится дистанционно, а не с помощью заранее заданной.

Однако в этом случае наделение каждой отдельной единицы полным спектром возможностей беспилотных летающих аппаратов экономически нецелесообразно, так как единицам, выступающим в качестве подчинённых звеньев, требуется только узкий круг этих возможностей. В то же время открывается возможность полноценного обеспечения только небольшого числа единиц от-

носительно общего количества дронов полными функциями беспилотных летающих аппаратов для выполнения ими ролей «центров», что может значительно упростить и удешевить программно-аппаратные составляющие подчинённых дронов, ориентирующихся во время полёта лишь на своих ведущих согласно заранее записанным алгоритмам с помощью беспроводных протоколов обмена данными о текущих положениях, углах, скоростях и прочем. Таким образом, всё построение делится на три основные группы дронов: ведущие, ведущие в роли ведомых и ведомые.

Ведущие – полноценные беспилотные летательные аппараты, выполняющие роли центров, относительно которых ориентируют свои движение ведомые. Ведущие в роли ведомых так же наделены полным набором функций и выполняющие роль ведомых, которые в момент переформирования, потери текущего «центра» или разделения формирования способны взять на себя роль ведущих. Ведомые – автономные единицы, следующие по заданным заранее параметрам и алгоритмам за ведущими.

В настоящее время существует разного рода программное обеспечение для объединения дронов в группы, например UgCS [1], подходящее для определённых моделей дронов. В настоящей работе предлагается реализовать функции управления ведомыми с помощью аппаратных средств, а не программных, в виде распространенных и недорогих микроконтроллеров.

В виде звеньев согласования и управления отдельными единицами рассматривались распространенные и недорогие модели микроконтроллеров для ведомых.

Программно-аппаратная платформа Arduino [2] представляет из себя несколько семейств отладочных плат на восьмибитных AVR микроконтроллерах Atmel atmega328p (UNO, nano), atmega32u4 (Leonardo, micro), atmega2560 (Mega) и среду разработки и отладки программного обеспечения Arduino IDE. Из-за простоты и достаточно низкой стоимости имеет очень широкий круг пользователей, написавших множество библиотек для решения очень большого спектра задач по работе с периферийными устройствами. Тем не менее данная платформа имеет относительно невысокие характеристики, обусловленные, в основном, использованием устаревших микроконтроллеров. В табл. 1 приведены основные характеристики используемых платформой Arduino микроконтроллеров.

Таблица 1 – Основные параметры микроконтроллеров фирмы Atmel

Микроконтроллер	**atmega328p**	**atmega32u4**	**atmega2560**
Встроенная память, кБ	32	32	256
Оперативная память, кБ	2	2	32
Тактовая частота, МГц	16	16	16
Число выводов GPIO	28	28	86
Периферия	1 x USART, 1 x SPI, 1 x I2C, 1 x ADC	1 x USART, 1 x SPI, 1 x I2C, 1 x ADC, 1 x USB	4 x USART, 1 x SPI, 1 x I2C, 1 x ADC, 1 x USB

В то же время на рынке присутствуют доступные 32-битные ARM микроконтроллеры, имеющие более широкие возможности и более высокие характеристики по сравнению с рассмотренными выше, различных фирм (STMicroelectronix, Microchip, Миландр и другие). По сравнению с AVR микроконтроллерами ARM микроконтроллеры обладают более богатой встроенной периферией, более высокими значениями максимальных тактовых частот, большими объемами памяти программ и оперативной памяти, что позволяет использовать их для решения более сложных задач. Более высокие значения тактовых частот и наличие на борту периферии прямого доступа к памяти (DMA) позволяет более эффективно выполнять расчеты и передавать их результаты. К тому же старшие семейства ARM микроконтроллеров фирмы STMicroelectronics [3] имеют на борту модули вычисления чисел с плавающей точкой, что находит применение в решении рассматриваемой задачи. В табл. 2 приведены характеристики некоторых микроконтроллеров фирмы STMicroelectronics.

В дополнение к контроллерам в данной системе управления и координации дронами рассматривается задействование микропроцессоров на базе одноплатного компьютера Raspberry Pi [4] в качестве узла управления ведущими и ведущими в роли ведомых. Данные отладочные платы широко распространены среди любителей и специалистов ввиду достаточно простой разработки программного обеспечения. Эти микропроцессоры работают под операционными системами Linux,

что открывает широкие возможности в их настройке и управлении ими. В табл. 3 приведены основные характеристики некоторых моделей микропроцессоров Raspberry Pi.

Таблица 2 – Основные параметры микроконтроллеров STMicroelectronics

Микроконтроллер	**stm32f051**	**stm32f103**	**stm32f411**
Встроенная память, кБ	64	64	512
Оперативная память, кБ	16	16	64
Тактовая частота, МГц	48	72	100
Число выводов GPIO	55	55	81
Периферия	2 x USART, 1 x SPI, 1 x I2C, 1 x ADC, 1 x DAC, PLL, DMA	3 x USART, 2 x SPI, 2 x I2C, 1 x ADC, 1 x USB, PLL, DMA	3 x USART, 5 x SPI, 3 x I2C, 1 x ADC, 1 x USB, PLL, DMA

Таблица 3 – Основные параметры микропроцессоров STMicroelectronics

Модель	**Pi Zero**	**Pi Model 3 B+**	**Pi Model 4B**
Используемый ЦПУ	Broadcom BCM2835	Broadcom BCM2837B0	Broadcom BCM2711
Количество ядер	1	4	4
Тактовая частота, ГГц	1	1.4	1.5
Оперативная память, МБ	512	1024	до 4096
Число выводов GPIO	40	40	40

Для связи между дронами могут быть использованы приемники и передатчики, использующие технологию LoRa [5], способную обеспечить высокий уровень помехозащищенности за счет использования сигналов с расширенным спектром на основе линейной частотной модуляции.

Такое разделение аппаратного обеспечения имеет экономическую выгоду, возрастающую с общим количеством дронов, так как основную их массу составляют ведомые единицы. Предлагается несколько основных идей формирования общего построения:

1. Относительно одного ведущего координируют свои действия все дроны-участники построения (рисунок 1). Буквой M обозначен ведущий, SM – ведущий в роли ведомого, а S – ведомый.

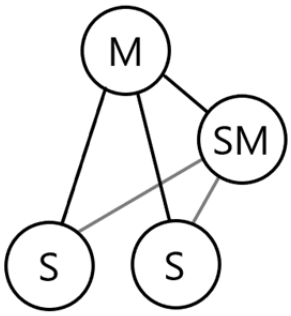


Рисунок 1 – Централизованная схема организации

2. Вокруг основного ведущего координируют свои действия только ведущие в роли ведомых, имеющие свои области влияния, а уже относительно них – ведомые (рисунок 2). При этом все дроны ориентируют свои позиции относительно нескольких соседей.

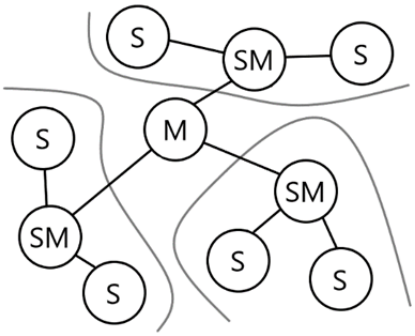


Рисунок 2 – Схема организации разделения зон влияния

В первом случае образуется структура с одним центральным узлом в виде ведущего, относительно которого ориентируется каждая единица в отдельности. Это позволяет создать систему координат относительно одного центра, единую для каждой ведомой единицы в отдельности. В этом случае ведущие в роли ведомых являются лишь дублирующими функции ведомого и использующиеся в случаях выхода из строя ведущего или деления построения на другие, более малочисленные.

Во втором случае образуется разветвленная структура с централизованной организацией в её отдельных сегментах. В этом случае за каждым ведущим в роли ведомого закрепляется определенная область и небольшое количество ведомых единиц. В самих сегментах организация повторяет первый вариант формирования, но в малых масштабах. В то же время сами сегменты организованы вокруг центрального ведущего по той же структуре.

Объединение беспилотных летающих аппаратов в группы позволяет увеличить возможности, эффективность и надежность всего объединения по сравнению с отдельно взятыми единицами. При этом разделение ролей с помощью аппаратных средств позволяет сделать подобное объединение недорогостоящим. Само объединение имеет множество путей для развития, таких как усовершенствование и разработка алгоритмов движения и организации, самих форм построения. Так же усовершенствованием может быть наделение всех единиц или отдельных аппаратов системами искусственного интеллекта для адаптации алгоритмов движения и форм построения к окружающей среде и внешним условиям.

Добавление в построение ведущих в ролях ведомых позволяет наделить такое построение единицами, дублирующими управляющие функции для увеличения надежности роя, а так же наделить его возможностью разделения и объединения на более мелкие и в более крупные группы соответственно.

Разделение ролей дронов в их общем объединении является перспективным направлением развития беспилотных летающих аппаратов. И согласно с таким разделением рассматривается наделение полным спектром функций и возможностей только узкого числа беспилотных летающих аппаратов — ведущих. Вместе с тем предлагается редуцировать функции и возможности ведомых, которые в большинстве своем и составляют рой дронов, что должно снизить общую стоимость всего построения и уменьшить избыточность отдельных его участников.

Литература

1. Сайт производителя программного обеспечения. URL: https://www.ugcs.com/ (дата обращения 03.09.2020)

2. Сайт производителя Arduino. URL: https://www.arduino.cc/ (дата обращения 29.08.2020)

3. Сайт производителя STMicroelectronics. URL: https://www.st.com/content/st_com/en.html (дата обращения: 06.09.2020)

4. Сайт производителя Raspberry Pi. URL: https://www.raspberrypi.org/ (дата обращения 01.09.2020)

5. Сайт технологии LoRa. URL: http://lo-ra.ru/ (дата обращения 20.09.2020)

А.В. Гордеев, А.М. Мудранов, А.В. Ершов

МЕХАТРОННОЕ КОЛЕСО ПОВЫШЕННОЙ ПРОХОДИМОСТИ

Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, Санкт-Петербург, gordeev-pure@yandex.ru

Аннотация

В данной статье представлена конструкция мехатронного колеса повышенной проходимости, пригодная к использованию в военных боевых машинах, транспортных, разведывательных машинах и роботах, спасательной технике. Описаны основные преимущества и недостатки представленной конструкции.Представлены основные элементы трансформируемого колеса, описан принцип его работы. Представлен прочностной расчёт используемых элементов. Проектирование элементов конструкции, а так же прочностной расчёт проектируемых элементов был выполнен в системе автоматизированного проектирования(САПР) «Компас 3Dv.17»

Ключевые слова: мехатронное колесо, линейный актуатор, грунт, прочностной расчёт, САПР, проходимость, Bluetooth, проектирование.

A.V. Gordeev, A.M. Mudranov, A.V. Ershov

MECHATRONIC WHEEL WITH INCREASED OFF-ROAD CAPABILITIES

Military Academy of the Signal Corps named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, St. Petersburg, gordeev-pure@yandex.ru

Abstract

This article presents the design of a mechatronic wheel with increased off-road capabilities suitable for use in military combat vehicles, transport, reconnaissance vehicles and robots, and rescue vehicles. Main advantages and disadvantages of presented design are described. Main elements of the transformable wheel are presented, the principle of its operation is described. The strength calculation of the elements used is presented. The design of structural elements, as well as the strength analysis of the designed elements was performed in the computer-aided design (CAD) system «Compass 3D v.17»

Key words: mechatronic wheel, linear actuator, soil, strength analysis, CAD, off-road capabilities, Bluetooth, design.

Колесо – одно из древнейших изобретений человечества, используемое повседневно миллионами людей. В автомобилях, в роботах, в мотоциклах. Но у типичного современного колеса есть существенный недостаток – неспособность эффективно передвигаться по каменистому и рыхлому грунту. Вданной статье представлен проект колеса для робота или машины, призванного решить данную проблему.

Проходимость, к примеру, военной техники является важнейшей проблемой в современном военном деле. От проходимости военных машин может зависеть исход сражения, военной операции. Увеличение проходимости военной техники может увеличить эффективность ведения боя, сократить сроки выполнения поставленных боевых задач, позволит боевым машинам добраться до ранее недоступной местности. Увеличение проходимости спасательной техники может помочь спасти жизни людей, сократить сроки проведения спасательных операций, так как способность передвижения по труднодоступной местности является критической для спасательной техники. Увеличение проходимости разведывательных роботов может увеличить объём и полноту получаемой ими информации. Так, проблема, рассматриваемая в данной статье является актуальной.

Задачу увеличения проходимости колеса можно решить, изменив форму колеса. Круглое колесо хорошо показывает себя при езде по подготовленной дороге (асфальт, укатанный грунт), но теряет эффективность при езде по следующим покрытиям: каменистая местность, мягкий грунт, запылённая местность, снег, мокрая грязь, т.д. Основной причиной такой потери эффективности является «прокручивание» колеса из за недостаточной цепкости колеса при его идеально круглой форме.

На текущий момент данную проблему решают, применяя «агрессивные» протекторы, обычно пилообразной формы.

Рисунок 1 – Текущие решения колёс повышенной проходимости

Данное решение обладает следующими ограничениями:

1. Такое колесо оптимизировано для езды по бездорожью, но теряет свою эффективность при езде по подготовленному покрытию (не может «трансформироваться» в режим езды по асфальту)
2. Даже при такой форме протектора колесо может быть недостаточно эффективно при езде по: каменистым дорогам с большим размером камней, по завалам зданий, по песку и мокрой грязи.

Предлагаемая конструкция трансформирующегося колеса повышенной проходимости призвана решить данные проблемы.

Данное колесо представляет собой трансформирующуюся конструкцию, содержащую (см. рис. 2):

- линейных актуаторов
- 18 шарнирных соединений (каждое из которых содержит 2 упорных кольца и две шайбы)
- шпоночных соединений (каждое из которых содержит 2 гайки)
- секций колеса с протектором

Несущие части колеса

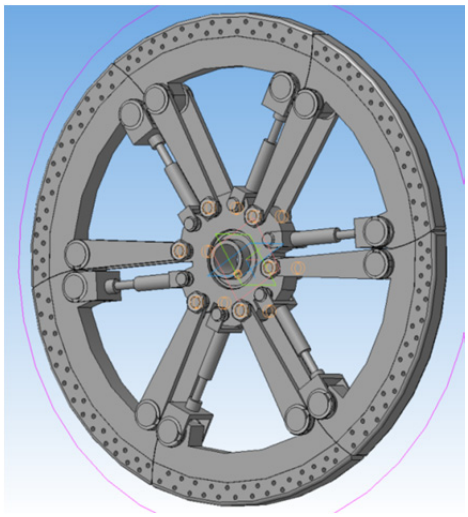


Рисунок 2 – Внешний вид трансформирующегося колесаповышенной проходимости, сложенное положение - режим для езды по асфальту

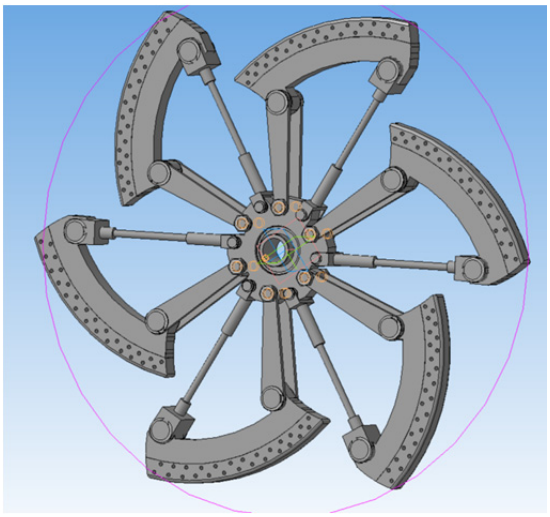


Рисунок 3 – Внешний вид трансформирующегося колесаповышенной проходимости, разложенное положение - режим для езды по завалам / пересечённой местности

Конструкция представляет собой трансформирующееся колесо, имеющее два положения:

1. Сложенное положение – в этом положении колесо работает как обычное круглое колесо. Это состояние оптимально для передвижения по подготовленным, ровным дорогам.
2. Разложенное положение (положение повышенной проходимости) – в этом положении линейные актуаторы в колесе раздвигаются, и колесо трансформируется в конструкцию, напоминающую лопасти мельницы. Такое состояние оптимально для езды по каменистому грунту, или по рыхлой земле, так как в таком состоянии колесо не будет проскальзывать/проворачиваться. Так же, в данном состоянии повышается клиренс автомобиля/боевой машины/робота, что так же положительно влияет на проходимость.

Линейныеактуаторы питаются от аккумулятора робота, или автомобиля. Управление линейными актуаторами осуществляется при помощи микроконтроллера (arduino, stm32 или подобного). Передача данных на микроконтроллер осуществляется при помощи беспроводного Bluetooth-модуля.

Колесо состоит из следующих основных элементов:

- Подшипник (применяется на ведомых колёсах) 480210 ГОСТ 24850-81
- Несущая часть колеса.
- Алюминиевая секция колеса с резиновым протектором, по 6 на каждое колесо.
- Раздвигающаяся секция колеса с линейнымакуатором.
- Протектор выполнен из армированной резины.

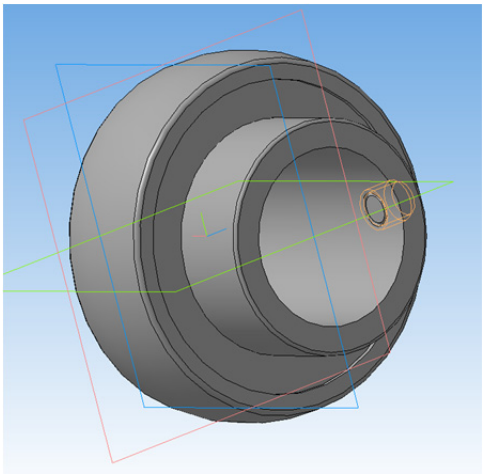


Рисунок 4 – Подшипник 480210 ГОСТ 24850-81

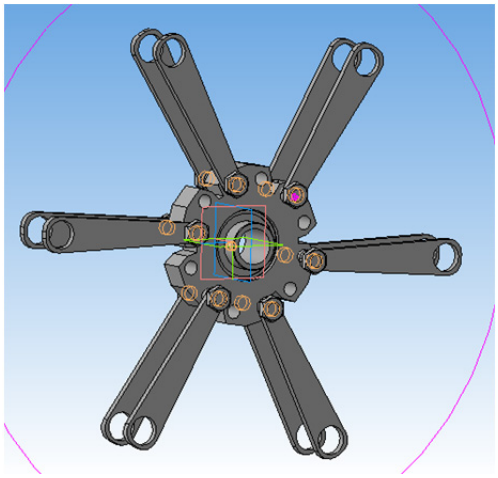


Рисунок 5 – Несущая часть колеса

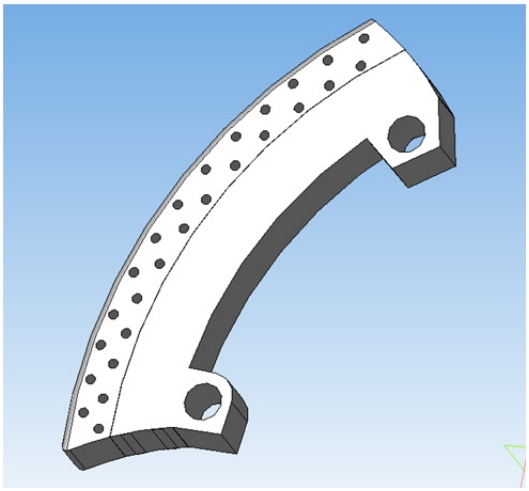


Рисунок 6 – Алюминиевая секция колеса с протектором

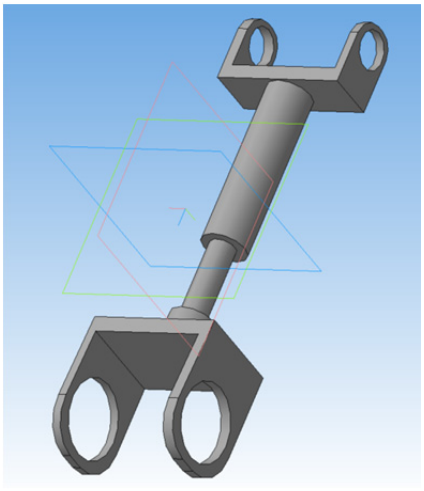


Рисунок 7 – Секция колеса с линейнымакуатором

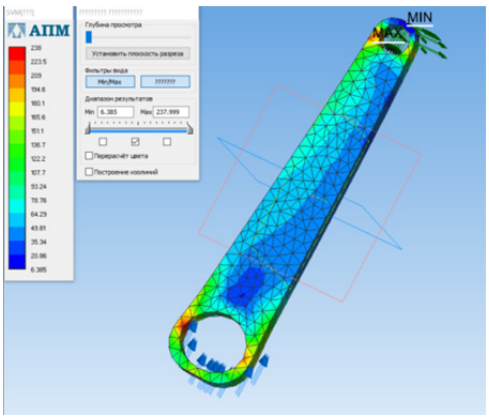


Рисунок 8 – Напряжения, возникающие в детали несущей части колеса при ударе

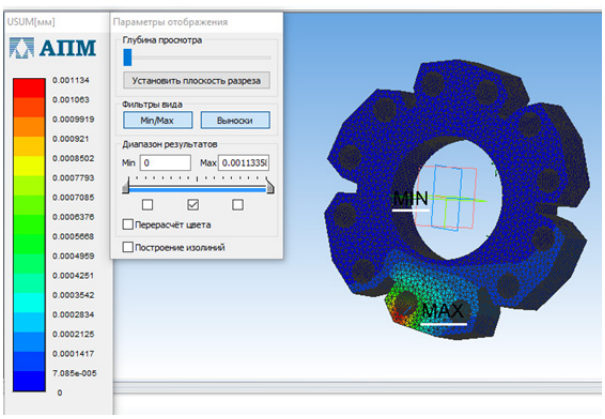


Рисунок 9 – Деформация детали несущей части колеса при ударе

Данную конструкцию колеса можно использовать при конструировании боевых машин, спасательных, грузовых автомобилей, спасательных и боевых роботов. Амортизация совершается по принципу безвоздушного колеса, при помощи отверстий в покрышке. Также, при использовании некоторых линейных актуаторов возможно использовать ход линейногоактуатора для амортизации.

Детали колеса состоят из алюминиевого сплава, на наружную сторону колеса крепится специальная покрышка из армированной резины.

Основные достоинства предлагаемой конструкции колеса повышенной проходимости:

1. Очень высокая проходимость. В разложенном состоянии такое колесо можно использовать для передвижения по завалам зданий, по песку, по мокрому грунту, по лестницам, что делает данную конструкцию эффективным вариантом для установки на роботов-спасателей, разведывательных роботов.
2. Адаптируемость. За счёт возможности трансформирования, колесо эффективно как при езде по асфальту, так и при езде по пересечённой местности.
3. Уменьшенные габариты, особенно в ширину. Такое колесо будет обладать уменьшенными габаритами по сравнению с другими решениями, что так же делает данный вариант более привлекательным для установки на робота.

Недостатками конструкции являются:

1. Увеличенная сложность конструкции. Такая трансформирующаяся конструкция заметно сложнее обыкновенного колеса, представляющего из себя простой металлический диск с резиновой покрышкой, и имеет большее количество движущихся частей.
2. Увеличенная стоимость. Каждое колесо требует применения шести линейных актуаторов, что увеличивает стоимость колеса.
3. Энергозависимость. Для управления таким колесом требуется электроэнергия, что уменьшает универсальность колеса.

Несмотря на вышеперечисленные недостатки, данное колесо может использоваться на роботах-спасателях, разведывательных роботах, машинах для экстремальной езды, боевых машинах, и т.д.

Основным достоинством разработки являются увеличенные показатели проходимости колеса (сравнительно с аналогичными конструкциями) а так же возможность трансформирования между режимом, оптимальным для езды по подготовленным дорогам, и режимом, оптимальным для езды по пересечённой местности, завалам зданий, т.д. Основным недостатком данного проекта является высокая сложность конструкции колеса повышенной проходимости относительно классической конструкции колеса.

Литература

1. Бескамерные шины – Jrepair.ru. [Электронный ресурс] – URL: http://jrepair.ru/interesnoe-na-jrepair-ru/shini/beskamernye-shiny-ustrojstvo-preimushchestva
2. Актуаторы – Актуатор. [Электронный ресурс] – URL: http://www.aktuator.ru
3. Колёса с безвоздушными шинами – АвтоМотоСпец. [Электронный ре-сурс] – URL: http://avtomotospec.ru/poleznoe/chto-takoe-bezvozdushnye-shiny.html#tops
4. Bluetooth – модуль HC-05 – RobotClass.ru [Электронный ресурс] – URL: http://robotclass.ru/articles/bluetooth-hc-05-06/
5. Силовые модули управления двигателями – FreeDuino.ru [Электронный ресурс] – URL: http://www.freeduino.ru/arduino/mshield.html

С.Г. Цариченко[1], О.П. Гойдин[2], С.А. Голь[3]

МОБИЛЬНЫЕ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ И РЕМОНТНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ РАБОТ НА ОБЪЕКТАХ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

[1] Московский государственный строительный университет, Москва, [2]Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, Москва, [3] Рязанский государственный радиотехнический университет, Рязань, tdsarichenko_s@mail.ru, goidin@mail.ru, likvon@list.ru

Аннотация

Эксплуатация объектов атомной отрасли на всех этапах их жизненного цикла, начиная с момента пуска до завершения функционирования и утилизации связана с проведением различных технологических операций в условиях возможного радиационно-химического и/или взрывного поражения эксплуатирующего персонала. Это обуславливает необходимость использования по возможности безлюдных технологий, что становится особенно актуально в условиях возможных аварий и проведения аварийно-спасательных и ремонтно-восстановительных работ.

Наибольший уровень безопасности достигается комплексным подходом к применению различных типов робототехнических систем, обеспечивающих проведение мониторинга текущей обстановки, обследования и разведки обстановки на объекте в условиях аварии, локализации возможного источника аварийной ситуации, в том числе пожаротушение, выполнение работ по разбору конструкций и дезактивации, возведению защитных сооружений и транспортировке радиоактивно загрязненных материалов.

Рассматривается вопрос комплексного использования наземных робототехнических систем при проведении различных работ в экстремальных условиях на объектах атомной отрасли.

Ключевые слова: робототехническая система, авария, радиационно-химическая опасность, атомная электростанция, мониторинг, ликвидация аварии.

S.G. Tsarichenko[1], O.P. Goidin[2], S.A. Goll[3]

MOBILE ROBOTIC SYSTEMS FOR EMERGENCY RESCUE AND REPAIR WORK AT NUCLEAR FACILITIES

[1]Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, [2]All-Russian Scientific Research Institute of Automation, Moscow, [3]Ryazan State Radio Engineering University, Ryazan, tdsarichenko_s@mail.ru, goidin@mail.ru, likvon@list.ru

Abstract

The operation of nuclear facilities at all stages of their life cycle, from the moment of start-up to the end of operation and disposal, is associated with various technological operations in conditions of possible radiation and chemical and/or damage explosive damage to the operating personnel. This makes it necessary to use the most unpopulated technologies possible, which becomes especially important in the conditions of possible accidents and emergency rescue and repair and recovery operations. The solution to this problem can be solved using a comprehensive approach to the use of various types of robotic systems that provide for the survey and exploration of the situation on the site in an accident, localization of a possible source of an emergency, including fire fighting, work on the dismantling of structures and decontamination, and the construction of protective structures. The issue of integrated use of ground-based robotic systems for various operations in extreme conditions at nuclear facilities is considered.

Key words: robotic system, accident, radiation and chemical hazard, nuclear power plant, monitoring, accident elimination.

Использование ядерной энергии позволило существенно расширить возможности человечества как в военной сфере, так и в области мирного использования атома. При этом, сопутствующие любому технологическому процессу отказы и аварийные ситуации, свойственны и для объектов атомной отрасли, что, учитывая наличие радиоактивности и особенности делящихся материалов, создает существенные проблемы. Особое место в организации безопасности жизненного цикла оборудования и материалов, используемых в атомной отрасли, занимает процесс утилизации и

вывода из эксплуатации отработанных изделий. Использование людских ресурсов для реализации этих операций и программ представляется весьма затруднительным, а зачастую и вовсе не представляется возможным в связи с чрезвычайно высоким риском для здоровья и жизни задействованного персонала.

Для выполнения технологических операций в зонах особого радиационного риска целесообразно использовать безлюдные роботизированные робототехнические комплексы различного назначения. Имеющийся отечественный опыт применения дистанционно управляемых машин показал их высокую эффективность, но в тоже время вскрыл определенные недостатки.

Толчком к развитию экстремальной робототехники явились работы по ликвидации последствий ядерной аварии с массовым использованием робототехнических комплексов на Чернобыльской АЭС. В этих работах было задействовано несколько десятков различных робототехнических комплексов, выполнявших разведку радиационной обстановки и инженерные работы по расчистке крыши машинного зала и прилегающих территорий от радиоактивных обломков [1, 2]. Эффективность и исключительность применения робототехнических комплексов была продемонстрирована при ликвидации ядерной аварии с критической сборкой в 1997 году в Федеральном ядерном центре (г. Саров) [3].

В тоже время анализ проведенных операций выявил ряд конструктивных и организационных недостатков, не позволяющих в полной мере эффективно использовать технические возможности робототехнических комплексов. К техническим недостаткам в первую очередь необходимо отнести в большинстве случаев низкую радиационную стойкость электронного оборудования и энергосистем как отечественных, так и зарубежных образцов. Большинство комплексов не были предназначены для работы в экстремальных условиях с высоким радиационным фоном, что обуславливало их отказы. Только в результате доработок в полевых условиях отдельные образцы успешно выполняли свои задачи. Данная ситуация объясняется тем, что на момент развития выше приведенных аварий отсутствовали необходимые робототехнические средства для ликвидации подобных аварий.

Очевидно, что для эффективного применения робототехнических комплексов при проведении аварийно-спасательных и ремонтно-восстановительных работ на объектах атомной отрасли необходимо применять специально подготовленные подразделения, оснащенные специальной техникой. Это послужило толчком для создания в составе ГК «Росатом» и МЧС России соответствующих робототехнических подразделений, которые успешно выполняют свои задачи, в частности при рекультивации различных промышленных объектов.

В целях дальнейшего совершенствования деятельности таких подразделений необходимо рассмотреть вопрос формирования комплексного состава многофункциональных робототехнических систем. В качестве положительного опыта в этом вопросе следует использовать организацию работ группы INTRA (Франция), которая образована тремя крупнейшими французскими организациями в области ядерной энергетики – EDF (Electricite de France, Французская энергогенерирующая компания), CEA (Commissariat a l'Energie Atomique, Комиссариат по атомной энергии) и AREVA (проектирование, поставки и комплектация оборудования для атомной энергетики) с целью создания и применения дистанционно управляемых технических средств в аварийных ситуациях в зонах, недоступных для персонала из-за высоких рисков радиационного облучения [4]. Парк робототехники группы INTRA подразделяется на три категории: роботы для использования в закрытых помещениях; роботы для использования на открытых площадках, а также роботы для выполнения земляных работ и работ по разграждению больших завалов (рис. 1). Вся группировка робототехнических средств работает в едином информационном пространстве, что позволяет выполнять технологические операции различной степени сложности, связанные с разведкой обстановки, планированием операций, выполнением инженерных работ различной степени сложности.

Рисунок 1 – Образцы дистанционно управляемых робототехнических комплексов группы INTRA для работы в закрытых помещениях и на открытых площадках

Учитывая вышесказанное, предлагается рассмотреть вопрос комплексного построения робототехнических группировок для проведения аварийно-спасательных и ремонтно-восстановительных работ на объектах атомной отрасли с целью ликвидации последствий аварий и рекультивации объектов и территорий на примере выполнения работ по демонтажу оборудования ядерных энергетических установок атомных электростанций (ЯЭУ АЭС), выводимых из эксплуатации.

Разработанные технические решения в вопросах управления робототехническими комплексами, уже реализованные в существующих образцах, позволяют вплотную подойти к решению одной из важных и достаточно трудных задач в процессе жизненного цикла атомных электростанций – демонтажу технологического оборудования реакторного отделения, включая реактор, парогенератор, циркуляционные насосы и другое оборудование, имеющее различные уровни радиационного загрязнения. Демонтаж с дальнейшей их утилизацией должен сопровождаться разборкой загрязненных строительных конструкций с целью дальнейшей рекультивации территории. Сложность проводимых операций обуславливается высокой степенью загроможденности помещений реакторного отделения различным оборудованием, что хорошо видно на схеме реакторного отделения наиболее распространенного в России реактора ВВЭР-1000 (рис. 2).

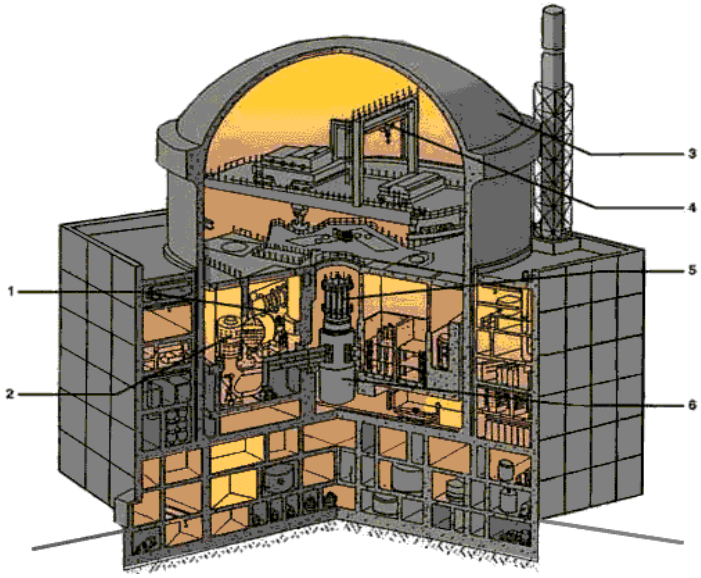


Рисунок 2 – Схема реакторного отделения реактора ВВЭР-1000.
1- парогенератор, 2 - главный циркуляционный насос, 3 - купол защитной оболочки, 4 - механизм перезарядки, 5 - управляющие стержни, 6 - бак ядерного реактора.

В целях повышения безопасности личного состава от поражения не только радиацией, но и от возможных обрушений, а также повышения производительности выполняемых работ за счет отсутствия ограничений по времени нахождения техники в радиационно-опасной зоне, предлагается использовать комплексный подход при проведении работ по демонтажу подобных сооружений с использованием робототехнических систем.

Организация работ по проведению аварийно-спасательных и ремонтно-восстановительных работ в условиях повышенного радиационного фона должна основываться на объективной информации о радиационной обстановке в зоне проведения операции, учитывающей реальное состояние зданий, технологического оборудования и возможной экспозиционной дозы облучения в различных зонах. Получить такую информацию на начальном этапе проведения аварийно-спасательных работ позволяют мобильные автономные робототехнические комплексы, оснащенные необходимой аппаратурой для построения электронной карты местности и карты радиационной обстановки. Наиболее эффективными являются РТК, позволяющие строить 3D электронную карту с нанесением на нее различных информационных слоев в реальном времени по мере продвижения к объекту аварии.

В качестве одного из таких РТК можно рассматривать робототехнический комплекс «Вомбат», разработанный в Рязанском государственном радиотехническом университете. На рис. 3 приведен опытный образец РТК «Вомбат», проводящий разведку внутри помещения и продемонстрированы его возможности по формированию 3D модели аварийного объекта.

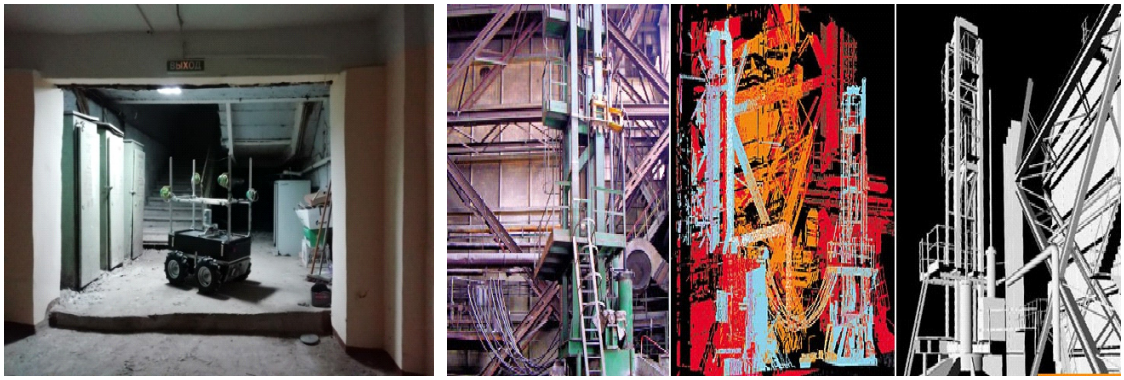


Рисунок 3 – РТК «Вомбат» и построенная им 3D-модель области функционирования

Мобильный робот состоит из подвижной платформы и съемного интеллектуального модуля, содержащего вычислительную подсистему, сенсорную подсистему и подсистему связи. Вычислительная подсистема поддерживает аппарат параллельных вычислений. Программное обеспечение реализует алгоритмы сопоставления частных трёхмерных сцен на базе итеративного алгоритма ближайших точек (ICP) с модификациями, учитывающими особенности пространственной структуры; алгоритмы, основанные на графических вероятностных моделях, в частности, факторграфах; алгоритмы калмановской фильтрации; модифицированные алгоритмы полуглобального стереосопоставления для построения карты диспаратностей; алгоритмы визуальной одометрии; искусственные нейронные сети. В отличие от совмещения облаков напрямую с применением dense-методов (базовый ICP), в системе используется feature-based подход, позволяющий осуществлять более надёжное сопоставление и построение карты в реальном времени. Результаты полученные в ходе разведки в зоне проведения работ позволяют не только обнаруживать возможные источники радиации, но и планировать порядок проведения работ с учетом сложности технологических операций и уровня радиационного фона.

В зависимости от решаемой задачи и требуемой проходимости подвижная платформа может быть выбрана из набора поддерживаемых колесных и гусеничных шасси. Это позволяет использовать предлагаемый интеллектуальный модуль для оснащения различных инженерных и транспортных роботизированных комплексов на различных этапах проведения аварийно-спасательных и ремонтно-восстановительных работ. Каждый тип подвижной платформы включает в себя подсистему электропитания, исполнительную подсистему и оснащен оборудованием телеуправления. Интеллектуальный модуль способен автономно управлять движением мобильного робота по следующим сценариям:

- «следуй за мной» – робот автономно преследует подвижный объект с активной меткой по его траектории;
- «мул» – робот запоминает траекторию при движении под внешним управлением и самостоятельно возвращается по ней при переходе на автономное управление;
- «трек» – робот планирует траекторию до пункта назначения и автономно движется по ней;
- «челнок» – робот автономно циклически двигается по замкнутой траектории.
- Все сценарии сопровождаются:
- формированием высокоточной трехмерной цифровой модели окружающего пространства, не требующим постобработки зарегистрированных данных (в режиме реального времени);
- определением положения и других параметров движения мобильного робота по текущим данным подсистемы технического зрения на основе лазерных сканирующих дальномеров и высокоточной трехмерной цифровой модели окружающего пространства, в том числе и при недоступности данных ГНСС;
- детектированием динамических объектов в окружающем пространстве и определением параметров их движения;
- поиском и распознаванием объектов интереса.

На рис. 4 представлены варианты установки описанного интеллектуального модуля в робототехнических комплексах ТРК211 и ТРК215 разработки ФГУП «ВНИИА» в сочетании с оборудованием для поиска и идентификации источников ионизирующего излучения.

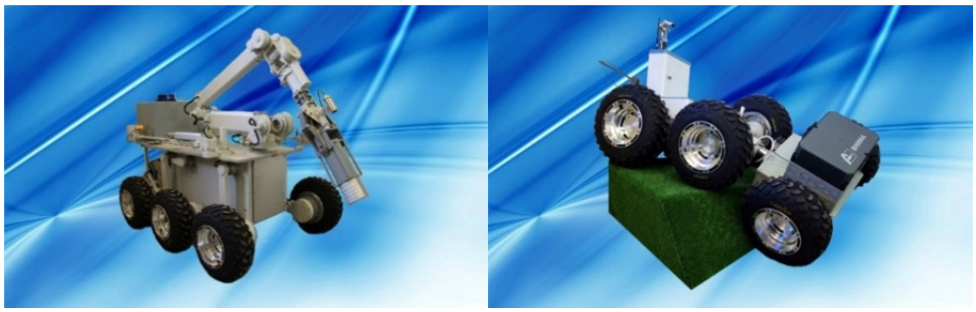


Рисунок 4 – Варианты применения интеллектуального модуля

Работы по демонтажу реакторного отделения, организационно, необходимо разделить на работы внутри здания и за пределами контура защитного сооружения – контаймента. В первой зоне должны выполняться работы по разборке и демонтажу оборудования и внутренних строительных конструкций с последующей их транспортировкой за пределы контаймента, где они будут перегружаться на транспортные средства для доставки в пункт утилизации и захоронения.

Для проведения работ по демонтажу оборудования предлагается использовать дистанционно-управляемые инженерные машины аналогичные разработанным шведской компанией BROKK (рис. 5а) и оснащенные различным технологическим инструментом для резки и удаления технологического оборудования ядерной энергетической установки с последующей погрузкой и транспортировкой с использованием дистанционно управляемых думперов (рис. 5б). Управление работой инженерной машиной может осуществляться как по радиоканалу, так и по кабельной линии с использованием системы технического зрения с повышенной радиационной защитой. Подача электроэнергии на борт должна обеспечиваться от внешнего источника по кабелю. Управление движением думпера может осуществляться в дистанционном режиме телеуправления или в одном из рассмотренных выше режимов автономного управления с использованием разработанного дополнительного съемного интеллектуального модуля. В случае необходимости демонтажа конструкций на большой высоте используется дистанционно-управляемый мини-кран, который может выполнять подъемно-демонтажные работы специальным навесным оборудованием (рис.5в)

а) б) в)

Рисунок 5 – Общий вид дистанционно-управляемой инженерной машины для демонтажа (а), автономного самоходного думпера (б) и дистанционно-управляемого мини-крана (в)

Работы по сортировке с учетом уровня радиационного загрязнения и отгрузке строительного мусора и элементов демонтированного оборудования ЯЭУ должны производиться на территории, за пределами контаймента, с использованием серийных экскаваторов (рис.6а), манимпуляторов (рис.6б) и мини-погрузчиков (рис.6в), работающих в режиме дистанционного управления.

а) б) в)

Рисунок 6 – Общий вид дистанционно-управляемого экскаватора (а), манипулятора (б), мини погрузчика (в).

При проведении плановых долгосрочных строительно-демонтажных работ, таких как разборка реакторного отделения, система дистанционного управления этих машин является стационарной и интегрирована в имеющуюся систему электро-гидравлического управления. В случае возникновения необходимости проведения аварийно-спасательных и ремонтно-восстановительных работ в заранее неподготовленной обстановке, в случае возникновения аварийной ситуации, предлагается использовать навесную систему дистанционного управления инженерными машинами, в состав которой входят подсистемы сервоприводов, связи, технического зрения (см. рис.7). Применение данных систем позволяет адаптировать штатные инженерные машины для управления в дистанционном режиме.

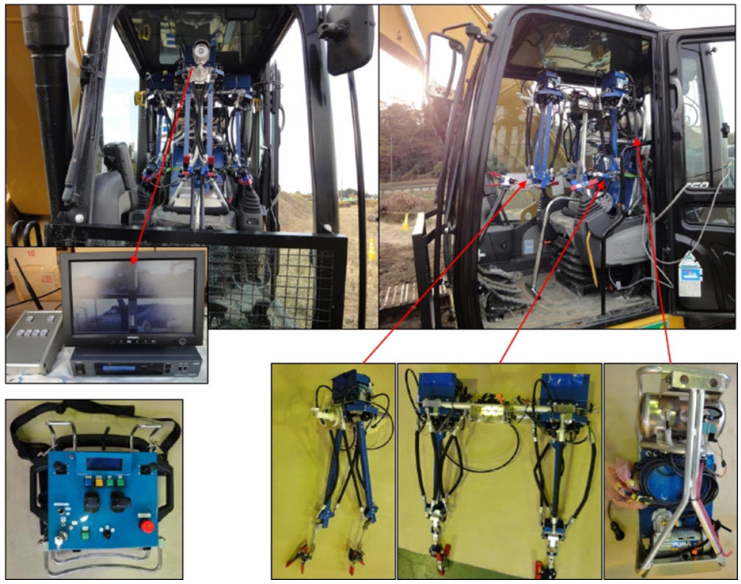


Рисунок 7 – Устройство навесной роботизированной системы управления инженерными машинами

Удаление отсортированных материалов из зоны проведения работ может осуществляться, в зависимости от уровня радиационного загрязнения, как с использованием штатной грузовой техники, так и с использованием автономных грузовых транспортных средств, таких как например КАМАЗ, которые прошли предварительные успешные испытания в режиме дистанционного и автономного управления (см. рис. 8).

а) б) в)

Рисунок 8 – Образцы роботизированных грузовых автомобилей КАМАЗ

Координацию действий и частичное управление многофункциональной группировкой робототехнических средств, задействованных в проведении аварийно-спасательных и ремонтно-восстановительных работ, в частности при демонтаже ЯЭУ АЭС, целесообразно осуществлять из центрального мобильного пункта управления (см. рис. 9), команды из которого идут непосредственно на роботизированные транспортные средства или поступают на выносные командные пункты, установленные в непосредственной, но безопасной, близости от оперативных зон функционирования инженерных машин. При этом, связь с использованием радиоканала осуществляется с использованием скрытой помехозащищенной подвижной связи класса «Тень-К», которая обеспечивает подвижные группы возможностью информационного обмена потоками телеметрии, команд управления и оперативных данных, а также аудио (VoIP) потоками, формируя и объединяя их в единую сеть.

Рисунок 9 – Общий вид центрального мобильного поста управления многофункциональной робототехнической группировкой для проведения аварийно-спасательных и ремонтно-восстановительных работ

В целях повышения эффективности и безопасности проведения аварийно-спасательных и ремонтно-восстановительных работ на объектах атомной отрасли предлагается использовать многофункциональную группировку робототехнических комплексов, обеспечивающую проведение практически всего цикла работ с привлечением минимального количества людей. Рассматриваемая схема организации работ основывается на реальных функциональных возможностях инженерных и транспортных машин с дистанционно-управляемым и автономным принципом управления, обусловленных спецификой работы в условиях повышенного уровня радиации как в закрытых помещениях, так и на открытой местности.

Особо следует отметить, что практически все образцы робототехнических средств, предлагаемых для использования в составе многофункциональной группировки, являются действующим образцами, прошедшими практическую апробацию в различных условиях. Предлагается рассмотреть вопрос об организации их функциональной взаимосвязи в одном информационном пространстве, с учетом необходимых доработок на предприятиях Российской Федерации, обусловленных спецификой атомной отрасли.

Литература

1. ЦНИИ РТК: вчера, сегодня, завтра./ А.В. Лопота и др. – Санкт-Петербург: ООО «Группа МИД», 2017. – 182 с.

2. Применение роботов МРК «МОБОТ Ч-ХВ» И МРК «МОБОТ Ч-ХВ-2» при ликвидации последствий аварии на ЧАЭС .www: sktbpr.ru ›content/mrk-mobot-ch-hv-2

3. The criticality accident in Sarov. — Vienna : International Atomic EnergyAgency, 2001.p. 46.

4. Кошар А., Айзидоржек П., Жоли Ч. Использование дистанционно управляемой техники во Франции // Безопасность окружающей среды. – 2009. - №1 – С.72-75

Д.С. Попов, О.А. Шмаков

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КАНАЛОВ УПРАВЛЕНИЯ И ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В СОСТАВЕ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НАЗЕМНОГО БАЗИРОВАНИЯ

ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург, d.popov@rtc.ru, shmakov@rtc.ru

Аннотация

В работе приводится краткий обзор особенностей каналов управления и передачи данных, применяемых в составе систем дистанционного управления мобильными роботами наземного базирования. Принимаются во внимание условия применения малогабаритных наземных роботов. Рассматриваются задачи, стоящие перед каналами связи, основываясь на типе передаваемой информации между роботом и постом управления. Описываются различные варианты построения каналов связи и применяемые топологии сетей. Приводится сравнение подходов к организации систем связи по нескольким основным критериям. В качестве иллюстрации кратко рассматривается система дистанционного управления в составе робототехнического комплекса, разработанная в ЦНИИ РТК. На этой основе предлагается оптимальный вариант построения системы управления и передачи данных для малогабаритных робототехнических комплексов наземного базирования.

Ключевые слова: мобильный робот, канал управления, связь, система дистанционного управления, пост управления, топология сети.

D.S. Popov, O.A. Shmakov

FEATURES OF APPLICATION OF CONTROL AND DATA TRANSMISSION CHANNELS AS PART OF GROUND-BASED MOBILE ROBOTIC SYSTEMS

Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics Russian Federation, Saint-Petersburg, d.popov@rtc.ru, shmakov@rtc.ru

Abstract

The paper provides a brief overview of the features of control and data transmission channels used as part of remote control systems for ground-based mobile robots. Conditions for using small-sized robots are taken into account. Tasks of communication channels are considered based on the type of information transmitted between the robot and the control station. Various options for building communication channels and network topologies are described. A comparison of approaches to the organization of communication systems based on several basic criteria is presented. As an illustration, a remote control system as part of a robotic complex developed at the RSSX RTC is briefly considered. On this basis, the optimal variant of building a control and data transmission system for small-sized ground-based robotic systems is proposed.

Key words: mobile robot, control channel, communication, remote control system, control station, network topology.

Наиболее распространённой категорией сервисной робототехники на сегодняшний день являются наземные мобильные роботы (далее – МР). Несмотря на широкое распространение, большинство мобильных роботов не обладают высоким уровнем автономности, в их контуре управления практически всегда присутствует человек, а все основные операции осуществляются в режиме телеуправления. Эта тенденция, вероятно, сохранится и в ближайшем будущем.

Условия применения малогабаритных наземных МР значительно отличаются как от беспилотных летательных аппаратов (далее – БЛА), так и от мобильных роботов среднего и тяжёлого классов. Эти различия во многом определяют особенности применения каналов управления и передачи данных, которые необходимо учитывать на всех стадиях проектирования и разработки техники.

Мобильные робототехнические комплексы наземного базирования (далее – МРК) решают чрезвычайно широкий круг задач, среди которых можно выделить:

- инспекцию (разведку, контроль, диагностику);
- манипуляционные работы, как правило со сменным рабочим инструментом;
- погрузо-разгрузочные и транспортные работы;

– расчистку и очистку помещений и территорий (включая дезактивацию, нейтрализацию и т.п.);
– строительно-восстановительные работы, устройство транспортных путей;
– пожаротушение;
– спасательные работы;
– специальные и военные задачи [1].

В общем случае МРК состоит из мобильного робота, полезных нагрузок (далее – ПН) и поста управления (далее – ПУ), объединённых каналом связи (рис. 1).

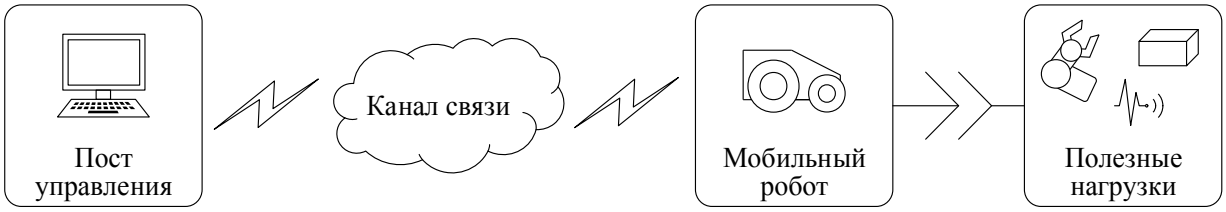


Рисунок 1 – Состав МРК

Примеры МРК, демонстрирующие современное состояние разработок, приведены на рис. 2.

tEODor EVO,
Telerob (Германия)

МРК Капитан,
ЦНИИ РТК (РФ)

Sentinel,
AB Precision (Poole) Ltd.
(Великобритания)

Рисунок 2 – Примеры МРК

Основные задачи каналов управления и передачи данных

Основная задача канала связи – передача информации между МР и ПУ, необходимой для обеспечения требуемого качества телеуправления.

Для дальнейшего описания способов организации канала связи полезно подробнее рассмотреть состав передаваемой информации. На основе направления передачи данных, её можно разделить на несколько групп:

– передача данных от МР к ПУ:
– данные телеметрии, содержащие информацию о состоянии бортовой аппаратуры, сенсоров, положении подвижных частей и т.п.;
– квитирование команд управления для обеспечения надёжности ДУ;
– видеоданные, позволяющие обеспечить визуальный контроль в процессе управления МР;
– аудиоданные, необходимость которых часто определяется назначением МРК;
– данные, создаваемые полезными нагрузками;
– передача данных от ПУ к МР:
– команды управления;
– данные, необходимые для работы полезных нагрузок;
– служебные данные:
– сигналы управления сетью;
– ретрансляция информации, в случае применения соответствующей топологии.

Требования к каналам связи

Специфика применения МРК накладывает определённые требования, предъявляемые к каналу связи:

– дальность связи для малогабаритных МР – от 300...500 м (городская застройка) до 1500 м (прямая радиовидимость);
– высокое качество передаваемого видеоизображения, вплоть до HD;
– задержка передачи и отображения видеоинформации на экране ПУ – не более 250...300 мс;
– задержка команд дистанционного управления (далее – ДУ) – не более 100 мс;
– работа в сложной помеховой обстановке;
– возможность работы нескольких МР в непосредственной близости друг от друга;
– принятие мер по защите канала, препятствие несанкционированному подключению с целью получения информации или перехвата управления [2].

Стоит отметить, что задержка передачи видео является одним из важнейших параметров канала связи, влияющим на качество управления МР. В общем случае задержка складывается из нескольких основных составляющих:
– время обработки данных в ТВ-камере, включая сжатие видеоизображения;
– прохождение информации через коммутаторы и вычислители на борту МР;
– задержка самого канала, включая передачу и приём;
– прохождение информации через коммутаторы и вычислители в составе ПУ;
– задержка, вызванная обработкой потока данных в устройстве отображения.

Несмотря на то, что непосредственный вклад в задержку самого канала как правило невысок и составляет в среднем 100 мс, выбранная приёмопередающая система определяет, в том числе, метод сжатия видеопотока, протоколы передачи данных, применяемые интерфейсы и программное обеспечение, что требует определённого комплексного подхода к проектированию.

Варианты построения каналов

Для решения поставленных задач возможно применение различных вариантов построения каналов:
– низкоскоростной радиоканал ДУ и высокоскоростной радиоканал передачи видео, аудио и телеметрии;
– единый высокоскоростной радиоканал обмена между МР и ПУ;
– комбинации двух предыдущих пунктов, в том числе дополненные резервными приемопередатчиками;
– кабельная линия связи.

Рассмотрим эти варианты подробнее.

Низкоскоростной радиоканал управления и высокоскоростной радиоканал передачи видео, аудио и телеметрии с МР

В этом случае для управления роботом применяется двусторонний низкоскоростной узкополосный канал ДУ. Он предназначен как для обеспечения управления движением, манипуляторами, полезными нагрузками, так и для передачи телеметрии на ПУ. От канала требуется минимальная задержка, но при этом требования к скорости передачи невысоки: в большинстве случаев оказывается достаточно 10 кбит/с в режиме полудуплекса.

Одновременно с ним применяется симплексный широкополосный канал передачи данных с МР. Его основная задача – передача видеоизображения с минимальным временем задержки. Параллельная передача медленно меняющихся данных телеметрии позволяет разгрузить канал дистанционного управления.

Единый высокоскоростной радиоканал обмена

При таком подходе применяется широкополосный двусторонний цифровой канал связи. Обычно в этом случае обеспечивается подключение всего бортового оборудования, включая центральный вычислитель, цифровые видеокамеры высокого разрешения и полезные нагрузки по интерфейсу Ethernet. Основными недостатками такого подхода часто являются повышенная задержка передачи видео и несколько меньшая дальность связи, вызванная требованиями к высокой частоте радиосигнала.

Комбинации первого и второго подходов, в том числе дополненные резервными приемопередатчиками

Наиболее перспективным выглядит вариант построения системы, при котором для управления роботом одновременно используется три радиоканала:

– узкополосный полудуплексный канал для передачи команд управления мобильным роботом и важной телеметрической информации;

– широкополосный симплексный канал передачи видео, аудио и остальной телеметрии;

– широкополосный полнодуплексный канал управления полезными нагрузками, обеспечивающий работу в режиме ячеистой топологии сети и способный, при необходимости, переключиться на управление МР и передачу видео. Данные ПН, как правило, менее требовательны к задержкам, а переключение на управление МР происходит, когда основные радиоканалы по каким-то причинам недоступны.

Кабельная линия связи

Отдельно стоят кабельные линии связи. Они применяются в случаях, когда использование радиоканалов затруднено или нежелательно. Например, в случаях применения комплекса в режиме радиомолчания, при наличии повышенных требований к надёжности канала связи, при необходимости защиты от сильных внешних электромагнитных помех. В ряде случаев кабельная линия связи используется также для удалённой подзарядки аккумуляторов МР.

Чаще всего в основе такой линии связи используется волоконно-оптический кабель, как обладающий наибольшей пропускной способностью. Учитывая хрупкость волокна и стоимость комбинированного кабеля, волоконно-оптические линии могут дублироваться.

Топология сети

Для достижения наилучших результатов могут применяться различные топологии сети управления и передачи данных, каждая из которых имеет свои преимущества и недостатки:

– точка-точка;
– точка-многоточие;
– передача данных через ретранслятор;
– сети с ячеистой топологией.

Топология точка-точка

Наиболее простая топология построения сети управления МРК. В этом случае сеть состоит из одного ПУ и одного МР. Информация передаётся напрямую между узлами (рис. 3).

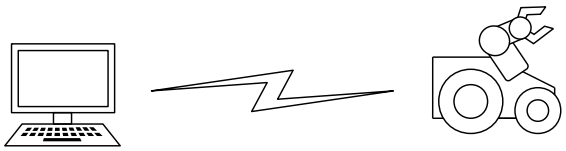


Рисунок 3 – Топология точка-точка

Топология точка-многоточие

Такая топология существенно расширяет возможности управления МРК, позволяя реализовать два сценария (рис. 4):

– управление несколькими МР с одного ПУ
– управление одним МР с нескольких ПУ.

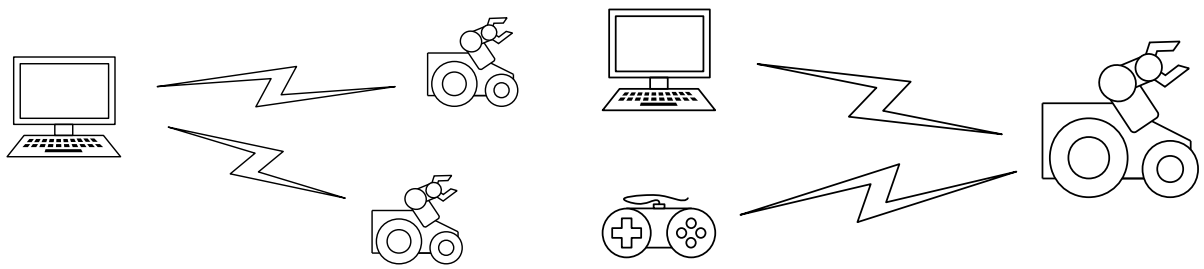


Рисунок 4 – Топология точка-многоточие

Передача данных через одиночный ретранслятор

Этот подход позволяет существенно увеличить дальность связи с МР (рис. 5). Однако при этом заметно увеличивается задержка передачи.

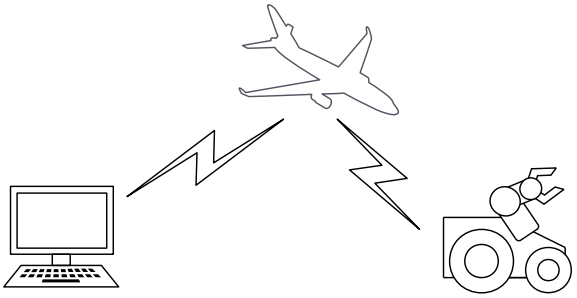


Рисунок 5 – Передача данных через одиночный ретранслятор

Сети с ячеистой топологией (mesh-сети)

Информационная сеть строится на принципе ячеек, отдельные элементы сети соединяются друг с другом и способны принимать на себя роль коммутатор или ретранслятора для других участников (рис. 6).

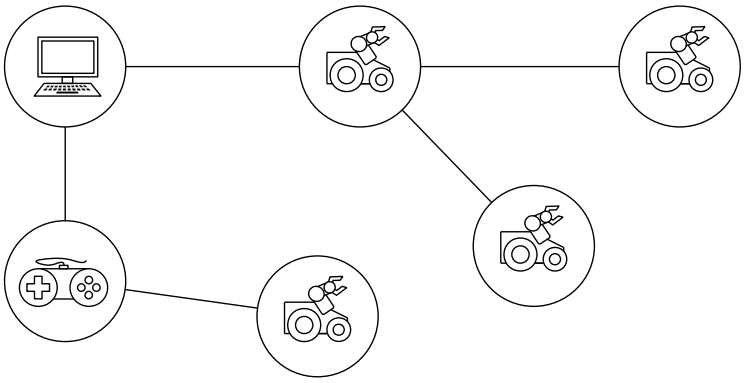


Рисунок 6 – Сеть с ячеистой топологией

Размещение антенн

Важным аспектом, который необходимо учитывать на самых ранних стадиях проектирования МРК, является размещение антенн на корпусе МР и в составе ПУ.

Выбор конкретных радиоканалов определяет количество антенн, их тип, минимальное расстояние друг от друга, с учётом диапазона частот и мощности передатчиков. Очень часто удовлетворить все требования, имея заранее разработанное шасси, невозможно. Поэтому рекомендуется начинать конструирование МРК с проектирования системы связи.

Особенности применения малогабаритных наземных МР, в отличии от роботов тяжёлого класса и летательных аппаратов, определяют очень малую высоту подъёма антенн от уровня земли: в большинстве случаев эта величина не превышает 0,5 м.

Учитывая влияние рельефа местности, препятствий, погодных условий, это накладывает существенные ограничения как на выбор частоты, мощности передатчиков и чувствительности приёмников. Улучшить ситуацию и снизить требования может применение направленных антенн и как можно большая высота их подъёма на стороне ПУ, а также использование ретрансляторов на базе беспилотных летательных аппаратов.

Сравнение подходов к организации каналов связи

Далее описанные подходы рассматриваются с точки зрения основных критериев, влияющих на общее качество канала управления и передачи данных.

Достижимая дальность связи

Радиоканалы, работающие в топологии точка-точка и точка-многоточие, с учётом ограничений, накладываемых размещением антенн, на сегодняшний день имеют дальность от 500 до 1500 м. Применение ретрансляторов, особенно на основе БЛА, существенно увеличивает дистанцию применения МР, вплоть до десятков километров. Дальность при использовании mesh-сетей так же значительно увеличивается и определяется количеством доступных узлов. В случае применения проводной линии дальность ограничена размерами катушки и редко превышает 500 м.

Качество передачи видеоинформации

Принимая во внимание описанную структуру формирования суммарной задержки передачи видео, становится понятно, что она будет минимальной в топологии точка-точка (и точка-

многоточие). Применение ретрансляторов резко увеличивает время прохождения сигнала, поэтому комфортное управление МР при передаче видео и команд через несколько узлов mesh-сети или ретрансляторы затруднено и используется обычно как резервный вариант при недоступности прямого канала. При этом передача менее чувствительных к задержкам данных, включая данные с полезных нагрузок, находит здесь широкое применение.

Разрешение видео, количество кадров в секунду определяются методом сжатия и доступной скоростью радиоканала. Так как при ретрансляции для передачи полезной информации используется лишь часть канала, качество видео в топологии точка-точка так же будет лучше.

Передача команд дистанционного управления

По сравнению с видеопотоком команды ДУ имеют существенно меньший объём, поэтому выбранная топология канала на их передачу влияет меньше. Однако общая тенденция сохраняется: при ретрансляции появляются задержки, которые в определённый момент могут превысить допустимый порог.

Применение шифрования

Применение шифрования в последнее время всё чаще является обязательным при разработке МРК. Напрямую на применяемую топологию сети шифрование не влияет, однако вносит заметную задержку передачи, вызванную временем, необходимым на шифрование и расшифровку данных. При этом вносимая задержка зависит от объёма обрабатываемой информации. В ряде случаев достаточно обеспечить только шифрование линии ДУ, чтобы исключить перехват управления МР. Тогда влияние блока шифрование на канал связи остаётся небольшим, но появляется требование жёсткого разделения каналов передачи ДУ и остальных данных, что требует особого внимания на этапе проектирования системы управления МРК.

Пример построения системы дистанционного управления и канала связи

В качестве иллюстрации можно рассмотреть систему дистанционного управления робототехнического комплекса, разработанную в ЦНИИ РТК.

Структурная схема бортовой системы управления приведена на рис. 7.

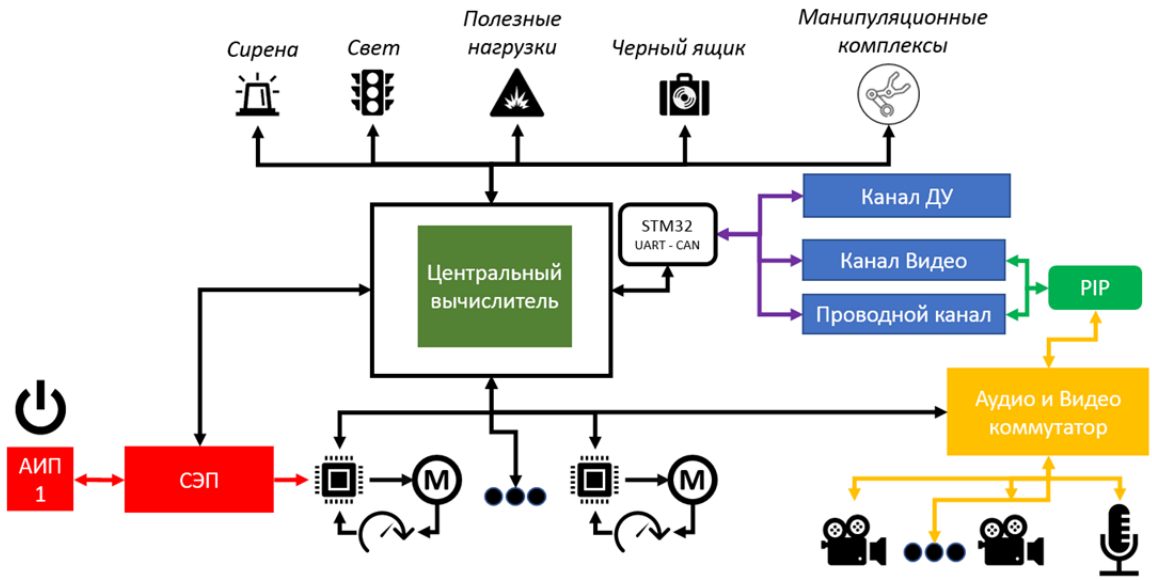


Рисунок 7 – Структурная схема бортовой системы управления

В составе системы управления применён комплект аналоговых ТВ-камер высокого разрешения стандарта AHD, аналоговый коммутатор, блок PiP, обеспечивающий режимы картинка-в-картинке (picture-in-picture, PiP) и квадратора, и цифровые приёмопередатчики. Система электропитания (СЭП) построена на основе автономного источника (АИП).

В МРК используются следующие каналы передачи данных:

– низкоскоростной узкополосный радиомодем для передачи команд ДУ (табл. 1);
– широкополосная система передачи видео и телеметрии (табл. 2);
– проводной канал на основе волоконно-оптического кабеля, подключаемый при необходимости.

Таблица 1 – Технические характеристики узкополосного радиомодема

Частота передачи, МГц	903 – 927
Вид модуляции	GFSK
Выходная мощность, мВт	500
Скорость канала передачи данных, кбит/с	50
Интерфейс передачи данных	UART полный дуплекс 9600 бод

Таблица 2 – Технические характеристики системы передачи видео и телеметрии

Частотный диапазон, МГц	1050 – 1350
Мощность излучения, мВт	100 – 4000
Вид модуляции	QPSK, 16QAM, 64QAM
Задержка видеосигнала, мс	150 – 300
Передатчик	аналоговый вход CVBS или HDMI
Приёмник	аналоговый выход CVBS или HDMI
Интерфейс передачи телеметрии	RS-232
Скорость передачи данных телеметрии, кбит/с	115 200

При подключении полезных нагрузок, требующих передачу больших объёмов данных, подключается дополнительный третий радиоканал (рис. 8).

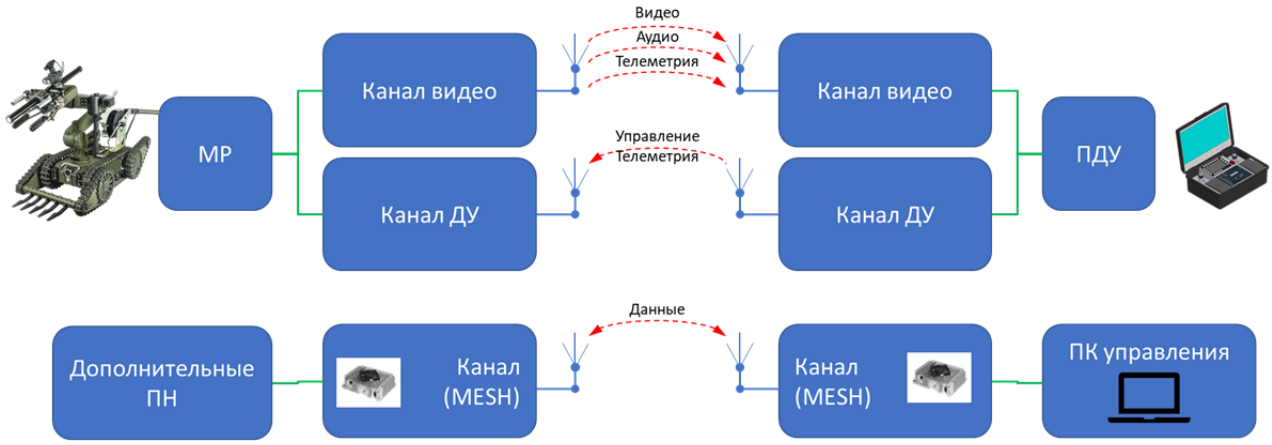


Рисунок 8 – Схема использования радиоканалов

Проведён краткий обзор подходов к организации каналов управления и передачи данных. Рассмотрены основные современные требования, варианты построения каналов, применяемые топологии сетей.

Наилучшее качество видео и управления достигается в топологии точка-точка при правильном подборе всех составляющих канала, в то время как максимальная дальность достигается при использовании ретрансляторов. Комбинации различных типов каналов в составе одного МРК могут объединить преимущества обоих подходов.

Наиболее оптимальным вариантом на сегодняшний день для наземных малогабаритных мобильных робототехнических комплексов является:

– бортовой комплекс на основе AHD ТВ-камер, как обеспечивающий минимальную задержку обработки видео при максимально доступном разрешении;
– отдельный узкополосный канал ДУ в режиме точка-точка или точка-многоточие;
– широкополосная специализированная система передачи видео, аудио и телеметрии;
– отдельный канал управления полезными нагрузками, работающий в режиме mesh-сети.

Стоит ещё раз отметить, что, учитывая сложность выбора и применения каналов управления и передачи данных, а также большое взаимовлияние элементов системы, рекомендуется начинать конструирование МРК с проектирования системы связи, а не встраивать систему в заранее разработанное шасси.

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 075-01195-20-01.

Литература

1. Юревич, Е.И. Основы робототехники: учебное пособие / Е.И. Юревич. - СПб.: БХВ-Петербург, 2010. – 368 с.

2. Requirements for remote control systems for ground-based mobile robots / D.S. Popov, O.A. Shmakov // Труды 30-й международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». – 2019. – с. 175-186.

А.А. Шаулин, А.В. Ершов

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МИКРОПРОЦЕССОРОВ «ЭЛЬБРУС» В РОБОТИЗИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ

Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного, Санкт-Петербург, Maahkery@yandex.ru

Аннотация

В данной статье проведено исследование возможности использования отечественных микропроцессоров «Эльбрус» в роботизированных технологических комплексах. Описаны основные особенности, преимущества и недостатки отечественных микропроцессоров «Эльбрус». Описаны особенности и проведено сравнение технических характеристик данных микропроцессоров с зарубежными аналогами. В том числе, указаны преимущества использования именно данных микропроцессоров.

Ключевые слова: микропроцессоры, «Эльбрус», роботизированные комплексы, технические характеристики, сравнительное исследование.

A.A. Shaulin, A.V. Ershov

USING «ELBRUS» MICROPROCESSORS IN ROBOTIC TECHNOLOGICAL COMPLEXES

Military Academy of communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny, Saint Petersburg, Maahkery@yandex.ru

Abstract

This article examines the possibility of using domestic Elbrus microprocessors in robotic technological complexes. The main features, advantages and disadvantages of domestic Elbrus microprocessors are described. The features are described and the technical characteristics of these microprocessors are compared with their foreign counterparts. In particular, the advantages of using these microprocessors are indicated.

Key words: microprocessors, «Elbrus», robotic systems, technical characteristics, comparative research.

Промышленные роботы и их применение, является одним из самых продуктивных решений в автоматизации производства. Автоматизация производства на предприятиях, всегда имело очень важное значение в решение сложных, многогранных задач. Прежде всего, задач, которые нацелены на получение максимальной эффективности работы предприятия. Безусловно, по мере роста объемов производства, в любой сфере, закономерным решением становится автоматизация процессов. Этот процесс подразумевает внедрение новых технологий, оборудования, а также соответствующего программного обеспечения. Если ранее, практически на всех этапах, производство осуществлялось вручную, то теперь многие операции выполняются станками, роботами и с помощью систем автоматизированного проектирования.

Давайте разберем, почему мы останавливаем свое внимание именно на роботизированных производственных комплексах и почему они являются показателем технологического прогресса.

Преимущества использования роботов:

1. Снижаются производственные затраты: быстрый возврат инвестиций в робототехнику превышает первоначальные затраты на отладку оборудования. С роботами скорость и объем производства увеличиваются.
2. Сокращается продолжительность цикла: автоматизированный робот имеет способность работать на неизменяемой скорости без пауз для отдыха, отпуска и сна. И в конечном счете он имеет больший потенциал произвести максимум продукции в короткий срок.
3. Повышается качество и надежность продукции: все операции выполняются с высокой точностью. Это обеспечивает создание продукции с едиными характеристиками и снижает необходимость сервисного обслуживания клиентов.
4. Растет безопасность: рабочие перемещаются на руководящие должности, где им больше не приходится выполнять опасные действия во вредных условиях. Простых барьеров и датчиков без-

опасности достаточно, чтобы поддерживать работу автоматического оператора в нужной зоне. Кроме того, повышение безопасности труда приводит к экономии финансовых средств, так как не нужны постоянные страховые и медицинские выплаты.

5. Производственное пространство используется более эргономично: уменьшение площади рабочей зоны за счет автоматизации производственной линии позволяет использовать территорию для других операций.

6. Количество отходов сокращается: роботы настолько точны, что объем используемого сырья может быть уменьшен, а значит, и затраты на него снижены.

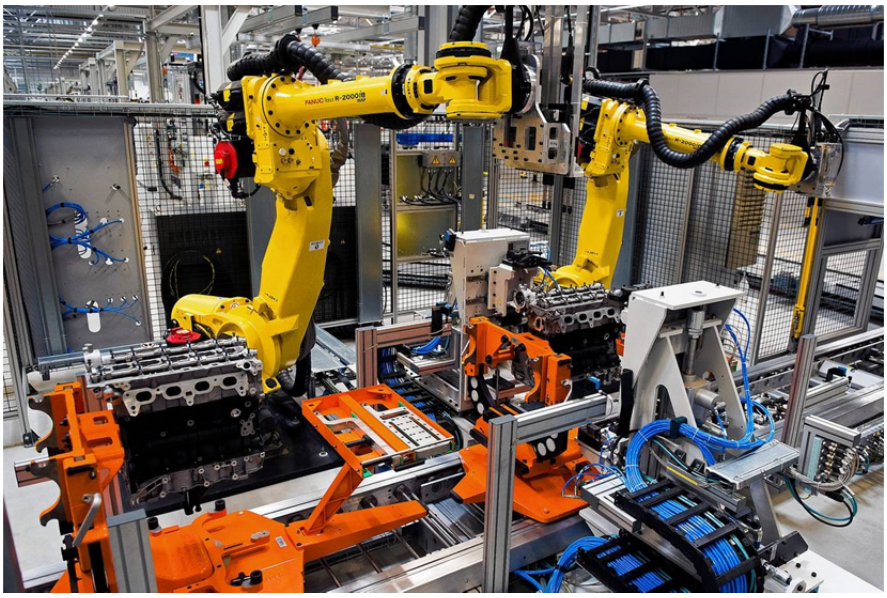


Рисунок 1 – Роботизированный технологический комплекс

Учитывая данные особенности, при использовании подобных комплексов следует использовать как можно лучшие технологические составляющие, к которым и относятся микропроцессоры.

Рассмотрим подробнее микропроцессоры «Эльбрус», почему следует использовать их?

Рисунок 2 – Микропроцессор «Эльбрус-8СВ»

При разработке ТП сборки в РТК предпочтительна высокая концентрация операций, определяющая модели роботов, их функции, точность, оперативность, быстродействие. Лучшим вариантом будет использование обучаемых роботов. Это роботы, которые могут приспосабливаться к различным случайным факторам, сопровождающим запрограммированную работу. Эта приспособляемость выражается в корректировке своей же программы на основе полученного «опыта» — результатов анализа и классификации возникающих отклонений и методов их устранения. Соответственно для них нужна электронная «начинка» соответствующего уровня. В микропроцессорах серии «Эльбрус» отсутствует сложная и энергоемкая аппаратура динамического распараллелива-

ния, присущая традиционным микропроцессорам, и используется гораздо более высокий параллелизм. Данные преимущества, при использовании микропроцессоров «Эльбрус» в роботизированных технологических комплексах позволят значительно увеличить производительность. Гарантией тому может являться следующий факт. Традиционные микропроцессоры могут исполнять за один процессорный такт до 8 операций, а микропроцессоры с архитектурой «Эльбрус» до 25. Уже были предприняты меры по внедрению процессоров «Эльбрус» в железнодорожную сферу, и результаты весьма впечатляют. Так, экономия от внедрения АПК ЭЛЬБРУС за 2015 год составила более 400 млн. кВт/ч, экономический эффект превысил 1 млрд. рублей, а по итогам 2016 года - 737 млн. кВт/ч на сумму более 2 млрд. рублей.

Возьмем микропроцессор «Эльбрус» последнего поколения, рассмотрим его особенности и сравним с зарубежными аналогами использующимися в роботизированном производстве.

Микропроцессор «Эльбрус-8СВ» — высокопроизводительный процессор общего назначения с улучшенной архитектурой Эльбрус, позволяющей выполнять до 576 млрд. операций с плавающей запятой в секунду. Спроектирован и изготовлен по технологическим нормам 28 нм, реализует технологии энергосбережения.

Особенности «Эльбрус-8СВ»:

- Оригинальная архитектура Эльбрус, обеспечивающая высокую производительность в математических расчётах, криптографии, цифровой обработке сигналов.
- Аппаратная поддержка защищенных вычислений. Отдельный стек вызовов, дающий преимущества с точки зрения информационной безопасности.
- Исполнение двоичных кодов в системе команд Intel x86 и x86-64 с помощью динамической трансляции без перекомпиляции программ.
- Расширенный температурный диапазон от −60 до +85 градусов.

Наличие 4 каналов доступа к памяти и 3 каналов межпроцессорного обмена позволяет строить масштабируемые вычислительные комплексы, обеспечивающие высокую скорость обработки и передачи информации.

Технические характеристики:

- Архитектура - Эльбрус, версия 5;
- Масштабируемость - 8 ядер в процессоре, 4 процессора в модуле (16 Гбайт/с попарные связи)
- Тактовая частота - 1500 МГц (1891ВМ12АЯ);
- Пиковая производительность - 50 операций в такт в каждом ядре (8 цел., 24 веществ.), 576 GFLOPS одинарной точности, 288 GFLOPS двойной точности;
- Кэш-память - L1: 64 Кбайт данные + 128 Кбайт команды в каждом ядре, L2: 512 Кбайт, в каждом ядре, 4 Мбайт суммарно, L3: 16 Мбайт в процессоре;
- Оперативная память - 4 канала DDR4-2400 registered ECC, до 68,3 Гбайт/с, 64 Гбайт на процессор, 1 Тбайт адресное пространство машины;
- Периферия - 1 канал ввода-вывода, до 16 Гбайт/с, совместимый контроллер — КПИ-2.
- Технологические параметры:
- Топология - 3,5 млрд. транзисторов, 28 нм техпроцесс, 350 мм² площадь кристалла;
- Корпус - 59,5×43,0×4,6 мм, 32,0 г, 2028 контактов FCBGA;
- Электропитание - 0,9 В, 1,0 В, 1,15 В, 1,5 В, 1,8 В, 90 Вт (1891ВМ12АЯ);
- Условия эксплуатации - −60…+85 °С, −40…+90 °С.

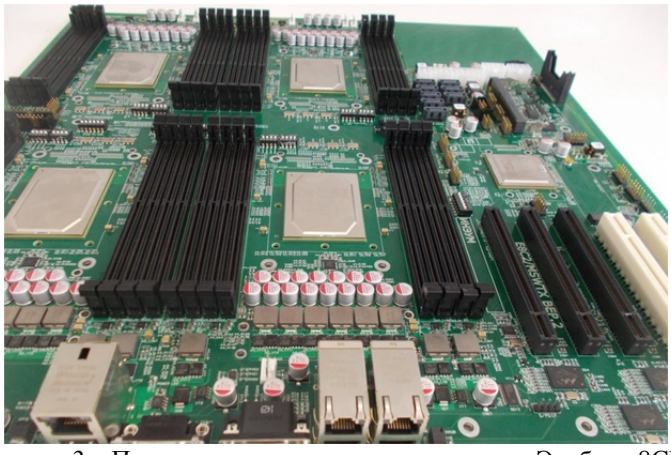


Рисунок 3 – Плата с использованием процессора «Эльбрус-8СВ»

Данный микропроцессор относится к типу CPU, так что рассмотрим подобные ему зарубежные аналоги использующиеся в платах устанавливаемых в роботизированные манипуляторы, станки и т.д.

Таблица 1 – Характеристики

	Jetson Nano Dev Board	Raspberry Pi 3A+	Raspberry Pi 3B+
AI Performance	472 GFLOPS	21.5 GFLOPs (est*)	21.4 GFLOPs (est*)
CPU	1.4 GHz 64-bit Quad-Core ARM Cortex-A57 MPCore	1.4 GHz 64-bit Quad-core ARM Cortex-A53	1.4 GHz 64-bit quad-core ARM Cortex-A53
GPU	128-Core Nvidia Maxwell	Broadcom VideoCore IV	Broadcom VideoCore IV
RAM	4GB LPDDR4	512MB LPDDR2 SDRAM	1GB LPDDR2 SDRAM
GPIO Header	40-pin	40-pin	40-pin
Board Dimensions	100 X 79mm	65 X 56mm	85 x 56mm
Wireless	None	Dual-band 802.11ac wireless LAN, Bluetooth 4.2/BLE	Dual-band 802.11ac wireless LAN, Bluetooth 4.2
Ports	4x USB 3.0, wired ethernet 10/100/1000Mbps	1 USB 2.0	4 USB 2.0, Wired Ethernet up to 330 Mbps
Multimedia	2160p30 (H.264)	1080p30 (H.264)	1080p30 (H.264)
Video Output	HDMI, Display Port (4K)	HDMI, Display Serial Interface (DSI)	HDMI, Display Serial Interface (DSI)
Camera Serial Interface	YES	YES	YES
M.2 Key E Slot	YES	NO	NO

Исходя из данных характеристик, можно заключить, что «Эльбрус» выигрывает по производительности, тактовой частоте, оперативной памяти, пропускной способности канала ввода/вывода данных.

Так же, следует учитывать, что микропроцессор «Эльбрус» является отечественным, то значительно снижается вероятность появления вредоносных закладок на уровне «железа». Что увеличивает ценность данных микропроцессоров при использовании на госпредприятиях и важных производствах, что является крайне важным моментом.

Основным достоинством микропроцессоров «Эльбрус» является их преимущество в производительности, числе операций за процессорный такт и более высокий параллелизм производимых операций. К основным недостаткам можно отнести несколько более высокую цену, непривычность архитектуры и скорее всего недоступность для рядового покупателя.

Литература

1. МЦСТ [Электронный ресурс] – URL: http://www.mcst.ru (дата обращения: 18.09.2020).
2. Electronic parts, основы робототехники. [Электронный ресурс] – URL: https://electronicparts.ru/rukovodstvo/mikroprotsessor-naznachenie-i-oblast-primeneniya.html(дата обращения: 18.09.2020).

Д.А. Рябухин

ПРАКТИЧЕСКИЙ ВЗГЛЯД НА ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙТРОННЫХ МЕТОДОВ ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА ПРИ РАЗВЕДКЕ МИННО-ВЗРЫВНЫХ ЗАГРАЖДЕНИЙ

ФГБУ «ЦНИИИ ИВ» Минобороны России, Московская обл.,
г.о. Красногорск, р.п. Нахабино, darblg@mail.ru

Аннотация

В данной статье рассматривается проблема обнаружения взрывоопасных предметов (ВОП) и инженерных боеприпасов (ИБП) при их расположении в различных вмещающих средах. В настоящее время решение о наличии в грунте потенциально опасного объекта принимается на основе показаний технических средств, регистрирующих косвенные признаки ВОП и ИБП (наличие металла, неоднородность подстилающей поверхности, наличие электронных компонент и др.). В качестве метода доразведки (идентификации) источника сигнала, как взрывоопасного, рассмотрены нейтронные методы элементного анализа. Проведены экспериментальные исследования системы, работающей на методе меченых нейтронов. В ходе экспериментальных исследований выявлен значительный потенциал данного метода в области выполнения задач разведки минно-взрывных заграждений, а также направления дальнейшего развития подобных систем, при создании комплексов разминирования военного назначения.

Ключевые слова: Разведка, минно-взрывные заграждения, взрывоопасные предметы, инженерные боеприпасы, нейтронные методы.

D.A. Ryabukhin

PRACTICAL VIEW OF THE USE OF NEUTRONS METHODS OF ELEMENTAL ANALYSIS IN DEMINING

FSBI «CRTI ET» Ministry of defence of the Russia Federation, i.s. Nahabino,
u.d. Krasnogorsk, Moscow Region, darblg@mail.ru

Abstract

This article deals with the problem of detecting explosive objects and mines, when they are located in various enclosing environments. At present, the decision on the presence of a potentially hazardous object in the soil is made on the basis of the readings of technical means registering indirect signs of a explosive objects and mines (presence of metal, heterogeneity of the underlying surface, the presence of electronic components, etc.). Neutron methods of elemental analysis are considered as a method of additional exploration (identification) of a signal source as explosive. Experimental studies of a system operating on the tagged neutron method have been carried out. In the course of experimental research, the significant potential of this method was revealed in the field of performing the tasks of reconnaissance of mine barriers, as well as the directions for the further development of such systems, when creating military demining complexes.

Key words: Intelligence service, mine barriers, explosive objects, mines, neutron methods.

В настоящее время задача разведки минно-взрывных заграждений решается путем регистрации отличительных (демаскирующих) признаков взрывоопасных предметов (ВОП) и инженерных боеприпасов (ИБП) с последующей идентификацией (доразведкой) обнаруженного объекта. Не смотря на то, что наиболее стабильным из признаков, характеризующих ВОП и ИБП является наличие взрывчатого вещества (ВВ), на сегодняшний день (на снабжении инженерных войск ВС РФ) нет ни одного технического средства, способного регистрировать данный признак от объектов, расположенных в различных вмещающих поверхностях в сложной помеховой обстановке.

Теоретический и экспериментальный задел атомной отрасли Российской Федерации имеет огромный потенциал в части создания нейтронных методов элементного анализа, позволяющих с высокой долей вероятности определить компонентный состав исследуемой области. К одним из перспективных нейтронных методов элементного анализа можно отнести метод меченых нейтронов.

Метод меченых нейтронов (ММН) – нейтронно-радиационный метод исследования элементного состава вещества, в основе которого лежит регистрация ответного γ-излучения в режиме совпадений с α-частицей, сопутствующей реакции испускания нейтронов. На рис. 1 представлена физическая схема ММН, основанного на том факте, что в реакции дейтерия с тритием $T(d,n)^4He$ рождение каждого нейтрона сопровождается рождением альфа-частицы с энергией ≈ 3,5 МэВ, испускаемой под углом ≈ 180° к направлению вылета нейтрона. Позиционно - и времячувствительный альфа-детектор, встроенный в трубку нейтронного генератора, измеряет время t_α и координаты сопутствующей альфа-частицы, что позволяет определять место, время рождения и направление вылета нейтрона.

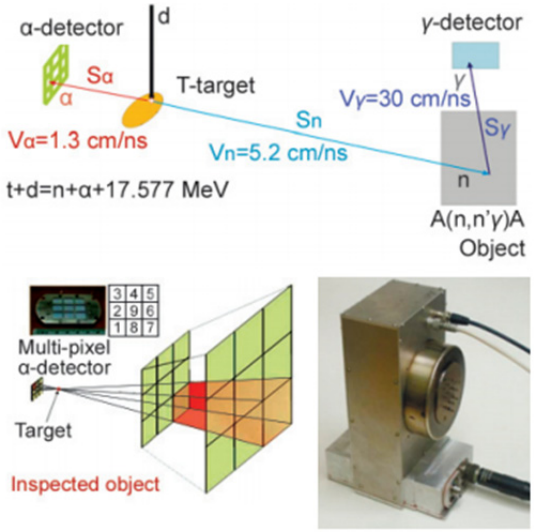


Рисунок 1 – Физическая схема метода меченых нейтронов (вверху) и генератор меченых нейтронов ИНГ-27 (внизу) с 9-пиксельным альфа-детектором

Взаимодействуя на своем пути с веществом исследуемой области, «меченый» альфа-детектором нейтрон инициирует ядерные реакции, включая те, в результате которых испускаются γ-кванты с энергиями E_γ, характерными для конкретных химических элементов. Регистрация таких γ-квантов в момент времени t_γ позволяет провести элементный анализ вещества в рамках соответствующего направления вылета «меченого» нейтрона и глубины вдоль этого направления, определяемой по разности t_γ и t_α. Данный метод позволяет локализовать в трехмерном пространстве исследуемой области фиксированный объем и проанализировать его элементный состав, исключив из рассмотрения отклик объекта в целом и окружающих материалов, что значительно повышает точность анализа (за счет увеличения соотношения сигнал/шум).

С целью определения функциональных возможностей метода меченых нейтронов был поставлен эксперимент по обнаружению типовых ИБП в закрытых корпусах, предусматривающих установку в грунт. Актуальность эксперимента обусловлена возможностью бесконтактного определения элементного состава исследуемой области с последующим определением демаскирующих признаков взрывоопасных предметов. На рис. 2 представлен экспериментальный образец поисковой системы (основанной на ММН), расположенной на дистанционно управляемой платформе.

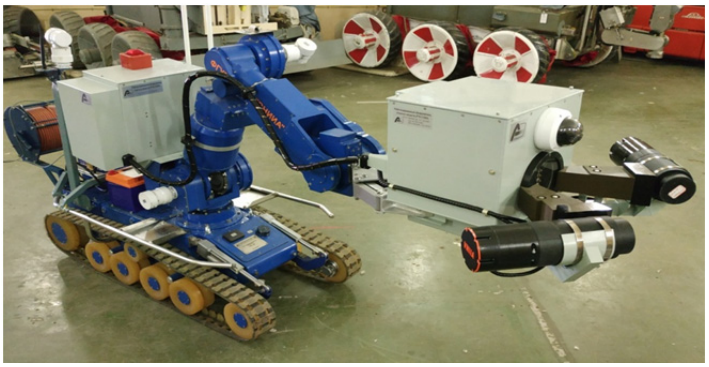


Рисунок 2 – Экспериментальный образец поисковой системы (основанной на ММН), расположенной на дистанционно управляемой платформе

Перед началом основного цикла испытаний (обнаружения типовых инженерных боеприпасов, предусматривающих установку в грунт), были подготовлены грунтовые лотки различного состава. В табл. 1 представлены условные номера, названия и плотности используемых грунтов.

Таблица 1 – Типы грунтов, используемые при эксперименте

№	Грунт	Плотность, г/см^3
1	Суглинок Серый	0,91
2	Глина серая	0,92
3	Глина желтая	0,95
4	Чернозем	1,03
5	Грунт с подрывного поля	1,05
6	Суглинок Желтый	1,13
7	Песок	1,18

После чего были произведены сигнатурные измерения каждого грунта для последующего отделения спектральных линий вмещающей поверхности (грунта) от спектральных линий, принадлежащих элементам, входящих в состав инженерных боеприпасов.

Эксперимент проходил в закрытом помещении при температуре окружающего воздуха 18 – 20^{0}С.

Грунтовые лотки представляют собой деревянные ящики длиной 60 см, шириной 32 см и высотой 33 см. Толщина стенки ящика – 2 см, слой грунта внутри ящика –21 – 23 см.

Открытые грунтовые лотки устанавливались на железную подставку таким образом, чтобы расстояние от поверхности грунта до альфа-детекторов составляло 5 см (рис. 3).

Рисунок 3 – Расположение грунтового лотка относительно альфа-детекторов

Результаты сигнатурных измерений, используемых при эксперименте грунтов, представлены на рис. 4.

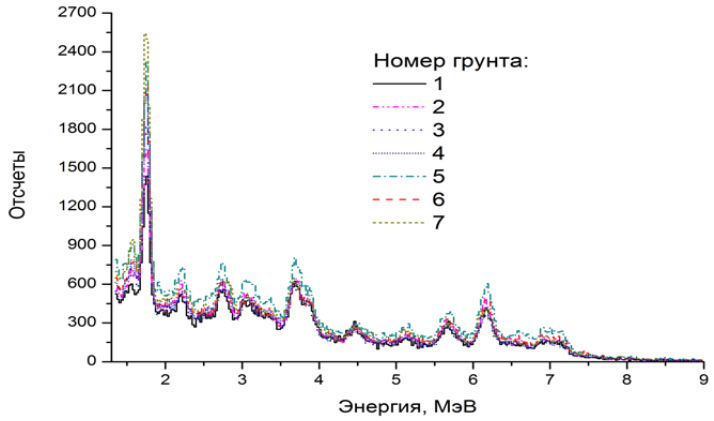


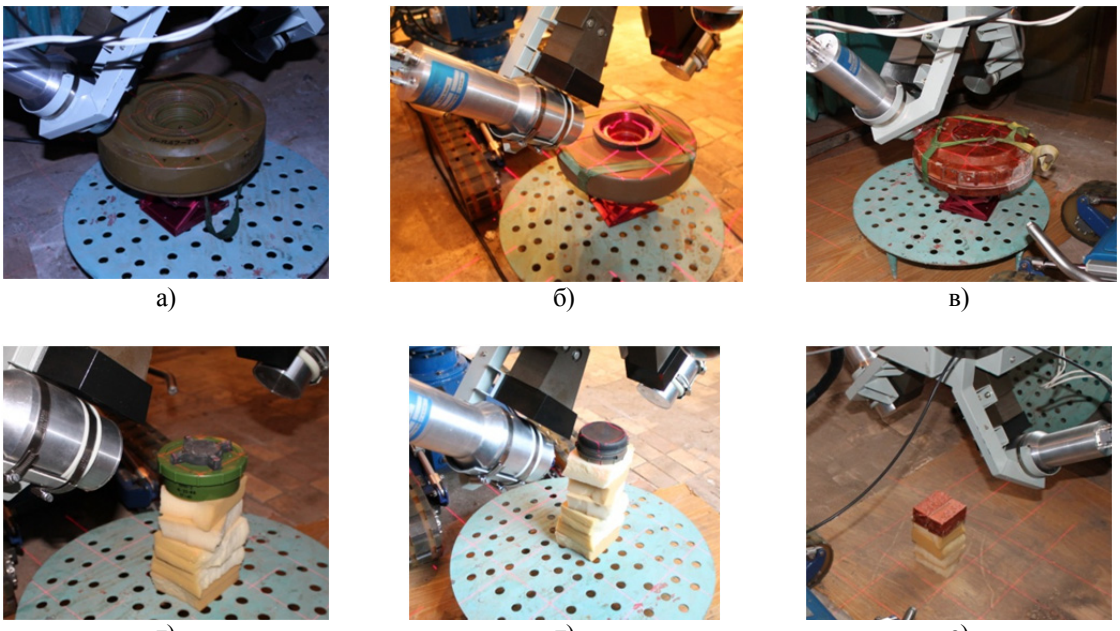
Рисунок 4 – Результаты сигнатурных измерений грунтов, используемых при эксперименте

Сложность применения прямых методов обнаружения ВВ в реальной боевой обстановке обусловлена множественным присутствием частиц ВВ и порохов на участках разведки минно-

взрывных заграждений (как результат подрыва мин и применения огнестрельного оружия различного калибра). В связи с этим особое внимание было направлено на сигнатурные измерения грунта с подрывного поля (содержащего частицы ВВ). Как видно из графиков, представленных на рис. 4, спектр грунта №5 (грунт с подрывного поля) не значительно отличается от спектра остальных грунтов.

Следующим этапом эксперимента было получение спектров рассеянного излучения от ядер элементов, входящих в состав типовых инженерных боеприпасов, предусматривающих установку в грунт. Также были проведены сигнатурные измерения тротила, как составной части потенциального самодельного взрывного устройства, установленного в грунт.

Исследуемые объекты устанавливались на расстоянии 5 – 10 см от альфа-детекторов таким образом, чтобы центр объекта попадал в центральный альфа-пиксель. Укладка из четырёх тротиловых шашек массой 200 г устанавливалась на расстоянии 20 см. На рис. 5 представлен ход сигнатурных измерений типовых объектов поиска.

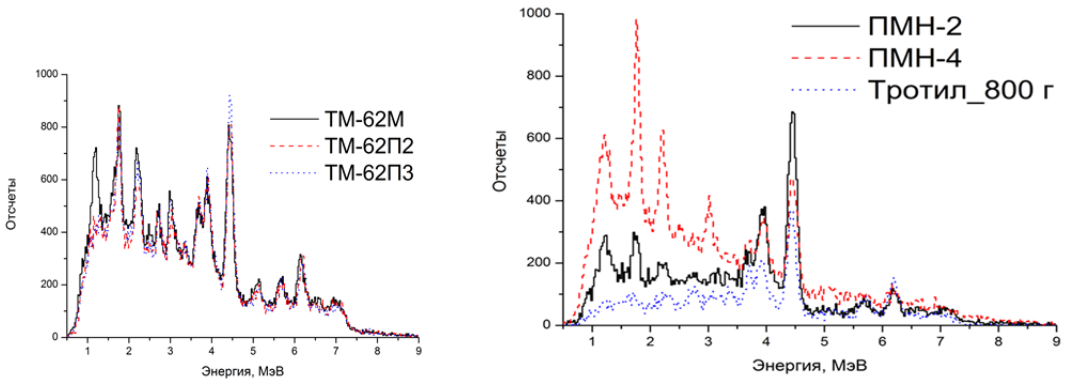


а) б) в)

г) д) е)

Рисунок 5 – Сигнатурные измерения типовых объектов поиска: а) ТМ-62М, б) ТМ-62П3, в) ТМ-62П2, г) ПМН-2, д) ПМН-4, е) тротил

Противотанковые мины располагались на алюминиевом домкрате типа Swiss Boy. В связи с тем, что площадь поверхности домкрата попадала в исследуемую область при сигнатурных измерениях противопехотных мин и тротила, было принято решение располагать мелкоразмерные объекты на подложке меньшей плотности (поролоне) с целью исключения спектральных линий материала подставки. Результаты представлены на рис. 6.



а) б)

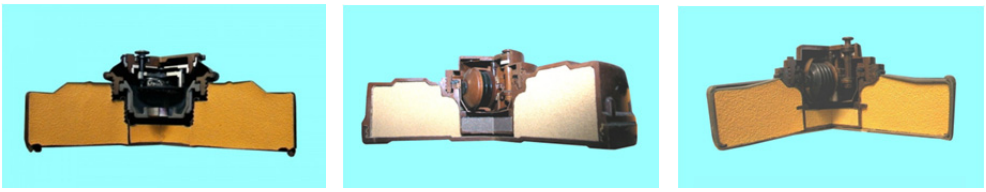
Рисунок 6 – Результаты сигнатурных измерений типовых инженерных боеприпасов, предусматривающих установку в грунт (на открытом воздухе): а) спектры противопехотных мин ПМН-2, ПМН-4, тротила, б) спектры противотанковых мин ТМ-62М, ТМ-62П2, ТМ-62П3

В ходе последующих экспериментов предстояло понять возможность обнаружения инженерных боеприпасов методом меченых нейтронов при их установке в грунт. С этой целью объекты поиска устанавливались в грунтовые лотки на различную глубину. В табл. 2 представлены основные варианты соотношений, вмещающих поверхностей, исследуемых объектов и глубины их установки при которых проводились измерения.

Таблица 2 – Соотношения вмещающих поверхностей, исследуемых объектов и глубины их установки в грунт

Исследуемый объект / № Грунта	ТМ-62М	ТМ-62П2	ТМ-62П3	ПМН-2	ПМН-4
	Глубина установки в грунт (см)				
1	12	11	14	0; 5; 10	0; 5; 10
2	13	10	11	0; 5; 10	0; 5; 10
3	10	12	15	0; 5; 10	0; 5; 10
4	13	12	13	0; 5; 10	0; 5; 10
5	11	9	12	0; 5; 10	0; 5; 10
6	12	13	10	0; 5; 10	0; 5; 10
7	13	15	13	0; 5; 10	0; 5; 10

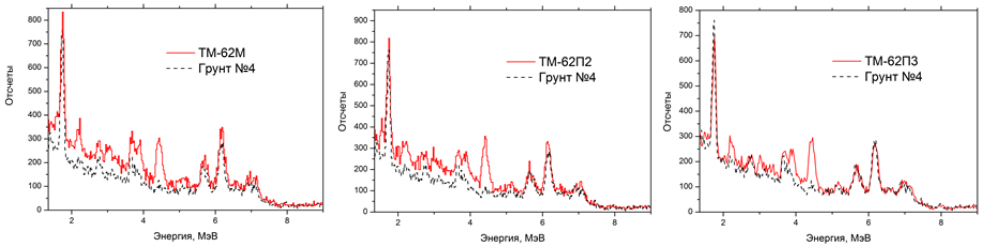
Ввиду того, что в противотанковых минах взрывчатое вещество распределено по большей площади относительно площади сечения пучка падающих нейтронов (альфа-пиксель), было принято решение проводить сигнатурные измерения при их максимальном углублении в грунтовом лотке. Противотанковые мины семейства ТМ-62: М, П2 и П3 содержат порядка 8 кг ВВ: ТМ, МС и ТМ соответственно. Распределение взрывчатого вещества в минах семейства ТМ-62 представлено на рис. 7.



а) б) в)

Рисунок 7 – Противотанковые мины семейства ТМ-62 в разрезе: а) ТМ-62М; б) ТМ-62П2; в) ТМ-62П3

Результаты сравнения откликов от грунта №4 и противотанковых мин, установленных в нём, представлены на рис. 8.



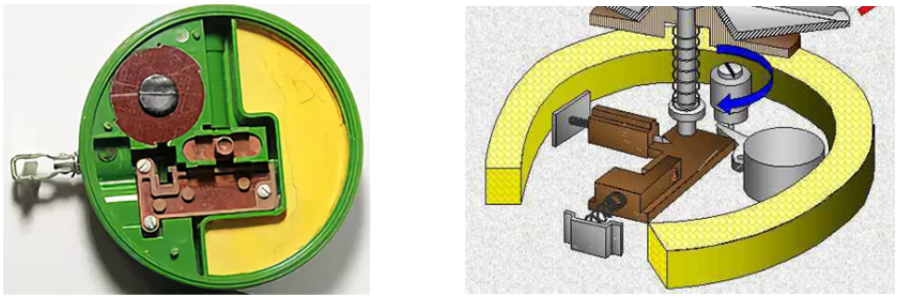
а) б) в)

Рисунок 8 – Сравнения откликов от грунта №4 и противотанковых мин, установленных в нём: а) ТМ-62М на глубине 11 см; б) ТМ-62-П2 на глубине 11 см; в) ТМ-62П3 на глубине 13 см

Из графиков, представленных на рис. 8, чётко видно появление новых пиков (на уровнях энергии порядка 2,2 и 4,4 МэВ) при размещении объектов поиска в толще грунта, что говорит о возможности их распознавания на фоне вмещающей поверхности. Учитывая схожесть откликов (рисунок 4) и плотностей (таблица 1) от каждого из семи типов грунтов, дальнейший анализ возможности применения метода меченых нейтронов, при обнаружения мин, предусматривающих установку в грунт, производился на примере грунта №4.

Ввиду малого размера объектов поиска (противопехотных мин ПМН-2 и ПМН-4) было принято решение проводить сигнатурные измерения при их углублении в грунт от 0 до 10 см с шагом 5 см.

Ввиду значительных конструктивных отличий противопехотных мин ПМН-2 и ПМН-4 в части расположения ВВ (100 г ТГ-40 и 50 г тротила соответственно) внутри корпуса (рисунок 9), расположение объектов относительно сетки альфа-пикселей значительно влияло на исход эксперимента.



а) б)

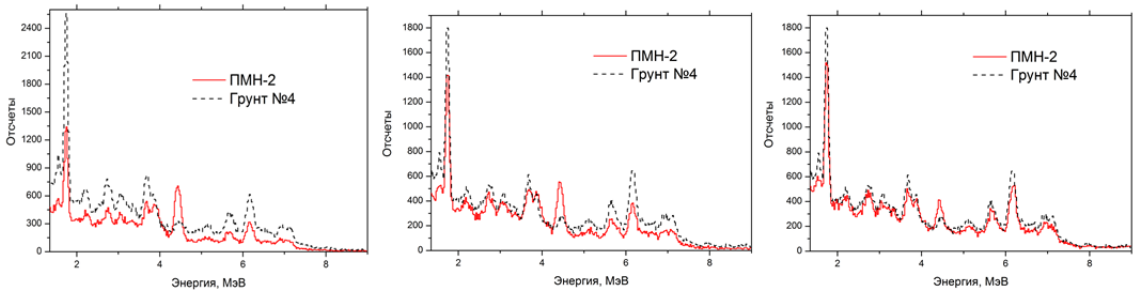
Рисунок 9 – Конструктивное расположение взрывчатого вещества внутри противопехотных мин: а) ПМН-2; б) ПМН-4

Как видно на рис. 9 в противопехотной мине ПМН-2, ВВ сконцентрировано в одной из половин корпуса мины в форме полуцилиндра, а в ПМН-4 в форме тора, что было учтено при их расположении относительно альфа-пикселей во время эксперимента. На рис. 10 представлена ориентация противопехотных мин ПМН-2, ПМН-4 относительно сетки альфа-пикселей.

а) б)

Рисунок 10 – Ориентация противопехотных мин относительно сетки альфа-пикселей во время сигнатурных измерений: а) ПМН-2; б) ПМН-4

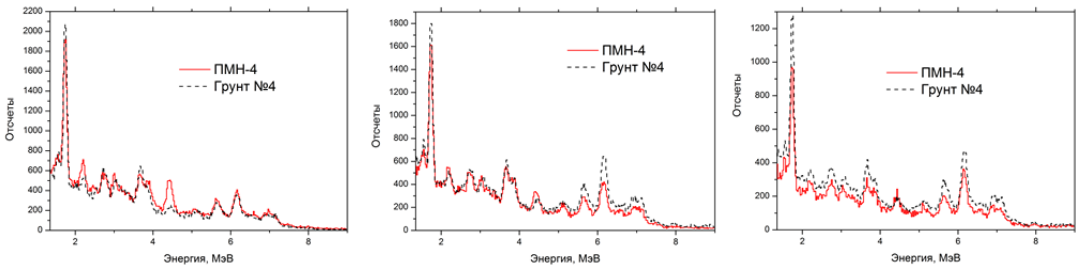
Результаты сигнатурных измерений противопехотных мин ПМН-2 и ПМН-4 представлены на рис. 11 и 12.



а) б) в)

Рисунок 11 – Результаты сигнатурных измерений противопехотной мины ПМН-2, установленной в чернозём на глубину: а) 0 см; б) 5 см; в) 10 см

Как видно из графиков, представленных на рис. 12, при установленной в грунт мине ПМН-2 появляется новый относительно грунта пик на уровне порядка 4.4 МэВ.



а) б) в)

Рисунок 12 – Результаты сигнатурных измерений противопехотной мины ПМН-4, установленной в чернозём на глубину: а) 0 см; б) 5 см; в) 10 см

Как видно из графиков, представленных на рис. 12, при установленной в грунт мине ПМН-4 появляется новый относительно грунта пик на уровне порядка 4.4 МэВ. Однако по мере углубления мины в грунт практически пропадает. Данный факт объясняется малыми размерами мины относительно размера альфа-вокселя на глубине от 5 см. Следует отметить что линия 4.4 МэВ соответствует линии углерода и может свидетельствовать о том, что происходит обнаружение материала корпуса мины ПМН-4, а не ВВ, входящего в ее состав.

Исходя из результатов сигнатурных измерений грунтов, представленных на рис. 4, можно сделать вывод о слабом влиянии состава почвы на результат элементного анализа исследуемой области методом меченых нейтронов (в том числе при наличии частиц взрывчатых веществ в исследуемой области).

При сигнатурных измерениях типовых инженерных боеприпасов, предусматривающих установку в грунт, была выявлена зависимость исхода обнаружения объекта от формы и расположения ВВ внутри корпуса мины и его ориентации относительно альфа-пикселя. В связи с этим целесообразно рассмотреть возможность создания системы с лучшим разрешением альфа-детектора, что позволит локализовать пучок падающих нейтронов на меньших количествах ВВ и увеличить вероятность обнаружения противопехотных мин с небольшой массой ВВ.

По итогу эксперимента было определено, что демаскирующими параметрами для всех исследуемых объектов (относительно ММН) может являться азот-углерод-водородное соотношение элементов, входящих в состав ВВ. Выявлено достаточно достоверное обнаружение ИБП с равномерным расположением ВВ в плоскости перпендикулярной пучку падающих нейтронов с площадью большей площади альфа-пикселя. Результаты представленных экспериментальных исследований могут быть использованы при создании робототехнических систем доразведки (идентификации) подозрительных объектов (областей вмещающей поверхности) при выполнении задач разведки минно-взрывных заграждений в экстремальных условиях.

Литература

1. К оценке возможности обнаружения взрывчатых веществ и устройств, содержащих их [Текст]: статья / Петренко Е.С. / Специальная техника. - 2001. - № 1

2. Нейтронные методы элементного анализа: Учебное пособие / А.Г. Амурский, В.Ф. Батяев, С.Г. Беличенко, В.И. Зверев, М.Д. Каретников, И.А. Титов. – М.: Буки Веди, 2018.-158 с.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ТРУДЫ

31-й Международной научно-технической конференции

ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА

28-29 сентября 2020 года, Санкт-Петербург

PROCEEDINGS

of the 31st International Scientific and Technological Conference

EXTREME ROBOTICS

September 28-29, 2020, Saint-Petersburg, Russia

издательство Гангут

Подписано в печать 10.12.2020
Формат А4. Печать – цифровая. Тираж 300 экз.
Отпечатано в ООО «Издательско-полиграфический комплекс «Гангут»
с оригинал-макета заказчика