

Труды международной научно-технической конференции  
**ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА**  
2-3 ноября 2017 года, Санкт-Петербург

Proceedings of the International  
Scientific and Technological Conference

**EXTREME ROBOTICS**

November 2-3, 2017, Saint-Petersburg, Russia



ISSN 2310-5305

Включен в базу данных РИНЦ с 06.05.2014  
Подписной индекс в каталоге «Роспечать» - 59896

Журнал «РОБОТОТЕХНИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ КИБЕРНЕТИКА» зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор), Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-56391 от 11 декабря 2013 г.

Журнал является рецензируемым изданием

*выпускается с 2013 года*

Журнал «Робототехника и техническая кибернетика» с 29.05.2017 включён 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», сформированный в соответствии с приказом Минобрнауки России от 25 июля 2014 г. № 793 с изменениями, внесенными приказом Минобрнауки России от 03 июня 2015 г. № 560 и Правилами на основе рекомендаций Высшей аттестационной комиссии (ВАК) при Минобрнауки России

# РОБОТОТЕХНИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ КИБЕРНЕТИКА

научно-технический журнал



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)

Издатель



Цели и задачи

- Содействие повышению научно-технического и технологического уровня создаваемых средств робототехники и технической кибернетики
- Информационная поддержка профильных организаций
- Анализ и прогнозирование научно-технического развития робототехники и технической кибернетики, обсуждение проблем высшей школы, рецензирование учебников и учебных пособий
- Привлечение молодых специалистов к деятельности журнала, предоставление им «площадки» для публикации результатов их научной и практической деятельности

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

**Труды**  
Международной научно-технической конференции

**ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА**

2-3 ноября 2017 года, Санкт-Петербург

**Proceedings**  
of the International Scientific and Technological Conference

**EXTREME ROBOTICS**

November 2-3, 2017, Saint-Petersburg, Russia



УДК 004.896.007.52  
ББК 32813  
Э41

ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА. // Труды Международной научно-технической конференции. – Санкт-Петербург: ИПЦ ООО «Политехника-принт», 2017. – 481 с.

Материалы сборника трудов отражают круг актуальных проблем и задач в сфере робототехнических систем и средств безопасности, представленных на Международной научно-технической конференции «ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА (ЭР-2017)».

Доклады опубликованы в авторской редакции.

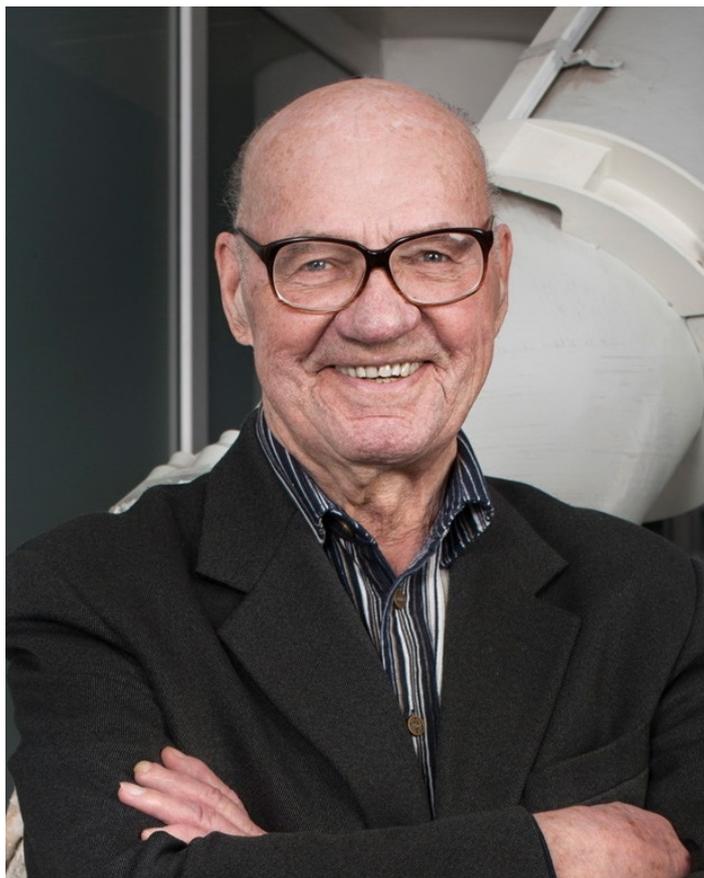
*Дизайн Ирины Купцовой, e-mail: kuptzova@rtc.ru*

EXTREME ROBOTICS. // Proceedings of the International Scientific and Technological Conference. – Saint-Petersburg: Compani Ltd Politehnika print, 2017. – 481 p.

The materials of these collected articles embrace a range of vital problems and tasks in the sphere of safety facilities and robotic systems intended for a space activity which have been discussed at the International Scientific and Technological Conference «EXTREME ROBOTICS (ER-2017)».

Reports are published with author's correction only.

*Design by Irina Kuptzova, kuptzova@rtc.ru*



*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, председатель программного комитета конференции «ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА»*

***Юревич Евгений Иванович***

---

*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, Chairman of the Program Committee of EXTREME ROBOTICS Conference*

***Evgeny Yurevich***



**Уважаемые коллеги!**

*От имени межведомственной рабочей группы Военно-промышленной комиссии Российской Федерации приветствую участников международной научно-технической конференции «ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА».*

*Обеспечение безопасности государства и его населения – комплексная задача, включающая в себя развитие системы предотвращения чрезвычайных ситуаций, системы помощи и поддержки пострадавших, в том числе совершенствование технического оснащения поисково-спасательных служб.*

*Я рад, что в Санкт-Петербурге ежегодно проходит конференция, посвященная этим вопросам. Ученые и молодые специалисты, разработчики и заказчики смогут стать участниками интересных дискуссий по ключевым вопросам в сфере робототехнических систем и средств безопасности, получить информацию об актуальных направлениях исследований в данной области, публично представить и обсудить результаты своих исследований и разработок.*

*Уверен, что конференция не только предоставит дополнительные возможности для ведения прямого диалога между разработчиками продукции и представителями министерств и ведомств, отвечающих за обеспечение обороноспособности государства и его национальной безопасности, но и будет способствовать подготовке и воспитанию молодых специалистов.*

*Желаю участникам конференции успешной и плодотворной работы!*

*Руководитель межведомственной рабочей группы Военно-промышленной комиссии Российской Федерации*

**Dear Colleagues!**

*On behalf of the Interagency Task Force of the Military-Industrial Commission of the Russian Federation I greet participants of the International Scientific-and-Technological Conference «EXTREME ROBOTICS».*

*Ensuring the security of the state and its population is a complex task including the development of a system for preventing emergencies, a system of assistance and support to victims including updating technique of search and rescue services.*

*I am glad that the Conference devoted to these problems is held annually in St. Petersburg. Scientists and young specialists, developers and customers will be able to become participants of the interesting discussions on the key questions in the sphere of robotic systems and security equipment, to get information on current research trends in this field, to publicly present and discuss the results of their research and development.*

*I am sure that this Conference will give not only additional possibilities for direct dialogue between product developers and representatives of the ministries and agencies, which are responsible for ensuring a defense capability of the state and its national security, but will contribute also to the training and education of young specialists.*

*I wish all participants of the Conference successful and fruitful work!*

*Head of the Interagency Task Force of the Military-Industrial Commission of the Russian Federation*

*О.В. Мартьянов  
Oleg Martynov*



**Уважаемые коллеги!**

Приветствую участников 28-й Международной научно-технической конференции «ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА» в государственном научном центре Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики».

Сегодня экстремальная робототехника относится к наиболее перспективному направлению науки и техники, определяющему темпы и характер развития многих отраслей. Необходимость создания робототехнических средств нового поколения ставит задачу межотраслевого характера, связанную с развитием мехатронных технологий и реализацией принципов унификации и миниатюризации.

В этом году конференция состоится в расширенном формате, и ее заседания пройдут на базе выездных площадок, предоставленных Военной академией связи им. С.М. Буденного, Политехническим университетом Петра Великого, Первым Санкт-Петербургским государственным медицинским университетом им. академика И.П. Павлова, а также Центром детско-юношеского технического творчества и информационных технологий г. Пушкина.

Уверен, что в этом году общение представителей силовых министерств и ведомств России, научных и учебных организаций, бизнеса и промышленности позволит выработать как новые стратегии развития экстремальной робототехники, так и сформировать предложения по перспективным образовательным технологиям подготовки кадров для высокотехнологичных производств.

Желаю плодотворной работы всем участникам конференции!

Директор-главный конструктор ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, д.т.н.

**Dear Colleagues!**

I am glad to welcome participants of the 28-th International Scientific and Technological Conference «EXTREME ROBOTICS» at the Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics (RTC), Saint-Petersburg, Russia.

Today extreme robotics belongs to the most promising direction of science and technology, determining the pace and nature of development of many industries. The need to create robotic devices of a new generation robotic tools poses a task of an interbranch nature associated with a development of mechatronic technologies, an implementation of the principles of unification and miniaturization.

This year the conference will be held in an expanded format, and its sessions will be held on the basis of distributed venues provided by the Military Academy of the Signal Corps named after S.M. Budjonny, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Pavlov First Saint-Petersburg State Medical University, as well as the Center for Children and Youth Technical Creativity and Information Technologies in Pushkin town.

I am sure that this year the communication of representatives of the Russian power ministries and agencies, scientific and educational organizations, business and industry will allow both developing new strategies of development of extreme robotics and forming proposals on promising educational technologies for training personnel for high-tech industries.

I wish fruitful work to all participants of the Conference!

Director-Chief Designer RTC, Doctor of Technical Sciences

A.B. Lopota  
Alexander Lopota

## **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 образования и науки Российской Федерации*
- *Военно-промышленной комиссии Российской Федерации*
- *Министерства обороны Российской Федерации*
- *Федеральной службы безопасности Российской Федерации*
- *Федеральной службы войск национальной гвардии Российской Федерации*
- *Министерства внутренних дел Российской Федерации*
- *Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий*
- *Министерства промышленности и торговли Российской Федерации*
- *Министерства здравоохранения Российской Федерации*
- *Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос»*
- *Федерального агентства научных организаций*
- *Фонда перспективных исследований*
- *Российской академии наук*
- *Ассоциации государственных научных центров «Наука»*
- *Правительства Санкт-Петербурга*
- *Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ)*

## **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**

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

## **WITH SUPPORT OF**

- *Ministry of Education and Science of the Russian Federation*
- *Military-Industrial Commission of the Russian Federation*
- *Ministry of Defence of the Russia*
- *Federal Security Service of the Russian Federation*
- *Federal service of troops of national guard of the Russian Federation*
- *Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation*
- *EMERCOM of Russia*
- *Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation*
- *Ministry of Health of the Russian Federation*
- *State space corporation ROSKOSMOS*
- *Federal Agency for Scientific Organizations*
- *Fund of perspective researches*
- *Russian Academy of Sciences*
- *State Scientific Centers of the Russian Federation Association*
- *Government of St. Petersburg*
- *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

## **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:*

- **Юревич Евгений Иванович**, д.т.н., профессор, почетный главный конструктор ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург

### *Почетный сопредседатель:*

- **Мартьянов Олег Викторович**, руководитель межведомственной рабочей группы Военно-промышленной комиссии Российской Федерации

### *Заместитель председателя:*

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

### *Ученый секретарь:*

- **Павлов Владимир Анатольевич**, к.т.н., заместитель начальника сектора ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург

### *Члены программного комитета:*

- **Андреев Виктор Павлович**, д.т.н., профессор, МГТУ «СТАНКИН», Москва
- **Брискин Евгений Самуилович**, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой ВолгГТУ, Волгоград
- **Заборовский Владимир Сергеевич**, д.т.н., профессор СПбПУ; заместитель главного конструктора ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург; член Международной ассоциации академических, исследовательских и промышленных предприятий (IARIA)
- **Каталинич Бранко**, доктор, президент Международной ассоциации DAAAM, Австрия
- **Кутузов Владимир Михайлович**, д.т.н., ректор СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург
- **Максимов Андрей Станиславович**, председатель Комитета по науке и высшей школе Санкт-Петербурга
- **Павловский Владимир Евгеньевич**, д.ф.-м.н., профессор, ведущий научный сотрудник ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва; член Научного совета РАН по робототехнике и мехатронике
- **Пряничников Валентин Евгеньевич**, д.т.н., профессор ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва; представитель Международной ассоциации по автоматизации в машиностроении (DAAAM International Vienna) в России
- **Ронжсин Андрей Леонидович**, д.т.н., заместитель директора по научной работе СПИИРАН, Санкт-Петербург
- **Рудской Андрей Иванович**, академик РАН, ректор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого
- **Филимонов Николай Борисович**, д.т.н., профессор, главный редактор теоретического и прикладного научно-технического журнала «Мехатроника, автоматизация, управление (MAU)», Москва
- **Ющенко Аркадий Семенович**, д.т.н., профессор, заместитель заведующего кафедрой «Робототехнические системы и мехатроника» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

## CONFERENCE PROGRAM COMMITTEE

### **Chairman:**

- **Yurevich Eugeny**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Honorary Chief Designer of RTC, Saint-Petersburg

### **Honorary Co-Chairman:**

- **Martyanov Oleg**, Head of the Interagency Task Force of the Military-Industrial Commission of the Russian Federation

### **Deputy Chairman:**

- **Gryaznov Nikolay**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Deputy Director for Science of RTC, Saint-Petersburg

### **Academic Secretary:**

- **Pavlov Vladimir**, Candidate in Technical Sciences, Deputy Head of Department, RTC, Saint-Petersburg

### **Members of Program Committee:**

- **Andreev Victor**, Doctor of Technical Sciences, Professor of Moscow State Technical University of Technology «STANKIN», Moscow
- **Briskin Eugeny**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of Chair, Volgograd State Technical University, Volgograd
- **Filimonov Nikolay**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Editor of monthly scientific-and-technological and production journal «Mechatronics, Automation and Control», Moscow
- **Katalinic Branko**, Doctor, President of the DAAAM International Association, Austria
- **Kutuzov Vladimir**, Doctor of Technical Sciences, Rector of ETU «LETI», Saint-Petersburg
- **Maksimov Andrey**, Chairman of Committee for Education and Higher School of Saint-Petersburg
- **Pavlovsky Vladimir**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, leading researcher of Institute for Problems in Mechanics of the RAS, Moscow; member of RAS Academic Council on Robotics and Mechatronics
- **Pryanichnikov Valentine**, Doctor of Technical Sciences, Professor of Institute for Problems in Mechanics of RAS, Moscow; representative of the International Association «DAAM International Vienna» in Russia
- **Ronzhin Andrey**, Doctor of Technical Sciences, Deputy Director for Research of St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences
- **Rudskoy Andrey**, Academician of the Russian Academy of Science, Rector of Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University
- **Yushchenko Arkady** Doctor of Technical Sciences, Professor, Baumann State Technical University, Moscow
- **Zaborovsky Vladimir**, Doctor of Technical Sciences, Professor of Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU); Director of Institute of Computer Sciences and Technologies of SPbPU; the head of the department «Telematics» at RTC; Deputy Chief Designer of RTC, Saint-Petersburg; member of the International Academy, Research and Industry Association (IARIA)

## ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

### *Председатель:*

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

### *Заместитель председателя:*

- *Коренко Наталья Львовна, руководитель Информационно-аналитического центра ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург*

### *Секретарь:*

- *Вольпяс Татьяна Владимировна, заместитель начальника сектора ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург*

### *Члены организационного комитета:*

- *Горская Ирина Васильевна, генеральный директор АГНЦ «Наука», Москва*
- *Доброхотов Андрей Викторович, советник Президента АО «ОСК», Санкт-Петербург*
- *Ермолов Иван Леонидович, д.т.н., ИПМех РАН, Москва; ученый секретарь Научного совета РАН по робототехнике и мехатронике; представитель Европейской ассоциации по робототехнике (EURON)*
- *Иванов Александр Владиславович, начальник научно-производственного комплекса ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург*
- *Качаев Эльгиз Идрисович, председатель Комитета по развитию предпринимательства и потребительского рынка Санкт-Петербурга*
- *Колодяжский Дмитрий Юрьевич, вице-президент по техническому развитию АО «ОСК», Санкт-Петербург*
- *Кондратьев Александр Сергеевич, к.т.н., заместитель директора ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург*
- *Костарев Сергей Валерьевич, начальник федерального государственного казенного военного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного» Министерства обороны Российской Федерации, Санкт-Петербурга*
- *Лобин Михаил Александрович, генеральный директор исполнительной дирекции, первый вице-президент ООО «Союз промышленников и предпринимателей Санкт-Петербурга»*
- *Максимов Алексей Алексеевич, директор НУЦ «Робототехника МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва*
- *Михайлов Борис Борисович, к.т.н., доцент НУЦ «Робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва*
- *Уемура Кензукэ, доктор, директор ITAC Ltd, Япония*
- *Шнайдер Франк, доктор, начальник отдела Фраунгхоферовского института связи, обработки информации и эргономики, Германия*
- *Юдин Виктор Иванович, к.ф.-м.н., заместитель главного конструктора ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург*

## CONFERENCE ORGANIZING COMMITTEE

### *Chairman:*

- **Lopota Alexander**, Doctor of Technical Sciences, Director and Chief Designer of RTC, Saint-Petersburg

### *Deputy Chairman:*

- **Korenko Natalia**, Head of Center for Information and Analysis, RTC, Saint-Petersburg

### *Secretary:*

- **Volpyas Tatiana**, Deputy Chief of Sector, RTC, Saint-Petersburg

### *Members of organizing committee:*

- **Dobrokhotov Andrey**, adviser to the President of United Shipbuilding Corporation, Saint-Petersburg
- **Ermolov Ivan**, Doctor of Technical Sciences, IPMech RAS, Moscow ; academic secretary of RAS Academic Council on Robotics and Mechatronics; representative of European Association in Robotics (EURON)
- **Gorskaya Irina**, General Director, Association of State Scientific Centers of Russia «Nauka», Moscow
- **Ivanov Alexander**, Chief of Scientific-Industrial Complex of RTC, Saint-Petersburg
- **Kachaev Elgese**, Chairman of Committee for Entrepreneurship and Consumer Market Development of Saint-Petersburg
- **Kolodyazhniy Dmitriy**, vice-president for technical development of United Shipbuilding Corporation, Saint-Petersburg
- **Kondratyev Alexander**, Candidate of Technical Sciences, Deputy Director of RTC, Saint-Petersburg
- **Kostarev Sergey**, Chief of Military Academy of the Signal Corps named after S.M. Budjonny, Saint-Petersburg
- **Lobin Mikhail**, general director of executive directorate, first vice-president of Union of Industrialists and Entrepreneurs of St. Petersburg
- **Maksimov Alexey**, Director Center of Education and Research «Robotics» in Baumann State Technical University, Moscow
- **Mikhailov Boris**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor in Baumann State Technical University, Moscow
- **Yudin Victor**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Deputy Chief Designer of RTC, Saint-Petersburg
- **Schneider Frank**, Doctor, Head of Cognitive Mobile Systems Department of the Fraunhofer Institute for Communication, Information Processing and Ergonomics (FKIE), Germany

<b>ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ РАЗРАБОТКИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ/ THEORY AND DESIGN METHODS OF ROBOTIC SYSTEMS</b> .....	17
<i>I.V. Shardyko, V.V Titov</i> A CLOSED-FORM SOLUTION OF IK TASK FOR A 6-DOF MANIPULATOR WITH PITCH AXES OFFSET AND A TECHNIQUE OF FAST JOINT SPACE TRAJECTORY COMPUTATION.....	17
<i>И.В. Шардыко, В.В. Титов</i> ЧАСТНЫЙ СЛУЧАЙ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ КИНЕМАТИКИ ШЕСТИСТЕПЕННОГО МАНИПУЛЯТОРА И МЕТОДИКА БЫСТРОГО РЕШЕНИЯ ТРАЕКТОРНОЙ ЗАДАЧИ В ПРОСТРАНСТВЕ ОБОБЩЁННЫХ КООРДИНАТ.....	23
<i>V.G. Gradetsky, M.M. Knyazkov, A.N. Sukhanov, V.G. Chashchukhin</i> OSCILLATORY PROCESSES IN ELECTROMAGNETIC MINIATURE ROBOTS.....	29
<i>В.Г. Градецкий, М.М. Князьков, А.Н. Суханов, В.Г. Чащухин</i> КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МИНИАТЮРНЫХ РОБОТАХ.....	29
<i>A. Piscariov, B. Mikhailov</i> INITIAL ESTIMATE EVALUATION METHODS IN 3D-SURFACE APPROXIMATION TASKS.....	33
<i>А.А. Пискарёв, Б.Б. Михайлов</i> МЕТОДЫ ОЦЕНКИ НАЧАЛЬНОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ В ЗАДАЧАХ АППРОКСИМАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ.....	33
<i>I.V. Vatamaniuk, A.I. Saveliev</i> MOBILE ROBOTIC PLATFORM AS A COMPONENT OF CYBER-PHYSICAL SMART SPACE.....	37
<i>И.В. Ватаманюк, А.И. Савельев</i> МОБИЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКАЯ ПЛАТФОРМА КАК КОМПОНЕНТ КИБЕРФИЗИЧЕСКОГО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ПРОСТРАНСТВА.....	37
<i>O.M. Kapustina</i> AN ANALITICAL SOLUTION OF THE INVERSE KINEMATICS PROBLEM OF KUKA YUBOT, PARAMETERIZED BY GENERALIZED COORDINATES OF ITS PLATFORM.....	42
<i>О.М. Капустина</i> АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ КИНЕМАТИКИ KUKA YUBOT, ПАРАМЕТРИЗОВАННОЕ ОБОБЩЁННЫМИ КООРДИНАТАМИ ЕГО ПЛАТФОРМЫ.....	47
<i>V.A. Glazunov, A.K. Aleshin, K.A. Shalyukhin, G.V. Rashoyan, A.V. Antonov, A.M. Popov, V.M. Yudkin</i> SYNTHESIS AND ANALYSIS OF PARALLEL STRUCTURE ROBOTS FOR WORKING IN EXTREME ENVIRONMENTS.....	52
<i>В.А. Глазунов, А.К. Алешин, К.А. Шалюхин, Г.В. Рашоян, А.В. Антонов, А.М. Попов, В.Ф. Юдкин</i> СИНТЕЗ И АНАЛИЗ РОБОТОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ДЛЯ РАБОТЫ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СРЕДАХ.....	53
<i>P.P. Belonozhko</i> COMPARATIVE ANALYSIS OF DYNAMICS OF ONE-DEGREE OF FREEDOM MANIPULATORS ON MOVABLE AND HINGED FOUNDATION.....	60
<i>П.П. Белоножко</i> СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ОДНОСТЕПЕННЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ НА ПОДВИЖНОМ И ШАРНИРНО ЗАКРЕПЛЕННОМ ОСНОВАНИИ.....	64
<i>V.N. Kazantsev, V.A. Pavlov</i> TERMINOLOGY AND APPROACHES TO A DEFINITION OF MODULAR ROBOT STRUCTURE.....	68
<i>В.Н. Казанцев, В.А. Павлов</i> ТЕРМИНОЛОГИЯ И ПОДХОДЫ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ МОДУЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ РОБОТОВ.....	68
<i>V.M. Kopylov</i> A METHOD FOR MEASURING SMALL OSCILLATIONS OF SPACECRAFT PAYLOAD.....	73
<i>В.М. Копылов</i> СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ КОЛЕБАНИЙ ПОЛЕЗНОЙ НАГРУЗКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ.....	73
<i>V.P. Andreev, V.L. Kim, P.F. Pletenev</i> THE PRINCIPLE OF THE FULL FUNCTIONALITY OF MODULES IN HETEROGENEOUS MODULAR MOBILE ROBOTS.....	81
<i>В.П. Андреев, В.Л. Ким, П.Ф. Плетенев</i> ПРИНЦИП ПОЛНОЙ ФУНКЦИОНАЛЬНОСТИ МОДУЛЕЙ В ГЕТЕРОГЕННЫХ МОДУЛЬНЫХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТАХ.....	86
<i>I.A. Vasiliev</i> ALGORITHMS OF MOTION OF THE WHEELED-WALKING PLATFORM.....	91
<i>И.А. Васильев</i> АЛГОРИТМЫ ДВИЖЕНИЯ КОЛЕСНО-ШАГАЮЩЕЙ ПЛАТФОРМЫ.....	92
<i>V.M. Moskovchenko, V.V. Baranov</i> MODEL OF IMPACT ON ROBOTIC SYSTEMS.....	95
<i>В.М. Московченко, В.В. Баранов</i> МОДЕЛЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА РОБОТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ.....	96
<i>V.Ya. Vilisov</i> EDUCATING ROBOTIC SYSTEM HOW TO BEHAVE IN AN OPTIMAL MODE IN THE CONDITIONS OF RESISTANCE.....	102
<i>В.Я. Вилисов</i> ОБУЧЕНИЕ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОПТИМАЛЬНОМУ ПОВЕДЕНИЮ В УСЛОВИЯХ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ.....	103
<i>M.V. Arkhipov, V.F. Golovin, E.A. Vzhesnevsky</i> HUMAN-MACHINE INTERFACE OF THE MANIPULATION ROBOT.....	110
<i>М.В. Архипов, В.Ф. Головин, Е.А. Вжесневский</i> ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫЙ ИНТЕРФЕЙС МАНИПУЛЯЦИОННОГО РОБОТА.....	111
<i>L.A. Stankevich, K.M. Sonькин, Ф.В. Гунделах</i> ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕЖДУ ЧЕЛОВЕКОМ И РОБОТОМ НА БАЗЕ НЕИНВАЗИВНОГО ИНТЕРФЕЙСА «МОЗГ-КОМПЬЮТЕР».....	120
<i>A.L. Korotkov, M.A. Nugin, A.V. Rogov, O.A. Shmakov</i> TEST SITE FOR EVALUATION OF TECHNICAL CHARACTERISTICS OF MOBILE ROBOTIC COMPLEXES OF ULTRA-LIGHT AND LIGHT CLASSES.....	125

<i>А.Л. Коротков, М.А. Ногин, А.В. Рогов, О.А. Шмаков</i> ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ПОЛИГОН ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МРК СВЕРХЛЕГКОГО И ЛЕГКОГО КЛАССОВ.....	125
<i>В.М. Московченко, В.Е. Дементьев, М.А. Коцыняк, А.П. Нечепуренко, В.А. Краснов</i> ПОДХОД К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ПРОТОКОЛЬНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА РОБОТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ.....	130
<i>A. V. Borisov</i> THE MODEL OF THE EXOSKELETON WITH LINKS OF VARIABLE LENGTH WITH AN ARBITRARY NUMBER OF LUMPED MASSES ON THE LINK: STUDY OF THE INFLUENCE OF THE LOCATION OF THE MASSES ON ITS DYNAMICS.....	134
<i>А.В. Борисов</i> МОДЕЛЬ ЭКЗОСКЕЛЕТА СО ЗВЕНЬЯМИ ПЕРЕМЕННОЙ ДЛИНЫ С ПРОИЗВОЛЬНЫМ КОЛИЧЕСТВОМ СОСРЕДОТОЧЕННЫХ МАСС НА ЗВЕНЕ: ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАСПОЛОЖЕНИЯ МАСС НА ЕГО ДИНАМИКУ.....	140
<i>E.S. Briskin, Ya.V. Kalinin</i> ON ENERGETICALLY EFFICIENT GAITS OF WALKING ROBOTS .....	146
<i>Е.С. Брискин, Я.В. Калинин</i> ОБ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНЫХ ПОХОДКАХ ШАГАЮЩИХ РОБОТОВ .....	146
<i>V.S. Grishin</i> SEMIREALISTIC SIMULATION APPLICATION TO DESIGN AND ANALYZE ROBOTICS SYSTEMS .....	150
<i>В.С. Гришин</i> ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУНАТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	150
<i>N.A. Pavluk</i> MODELING BEARING SUPPORT STRUCTURE PELVIC MECHANISM ANTHROPOMORPHIC ROBOT ANTARES .....	155
<i>Н.А. Павлюк</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПОРНОЙ КОНСТРУКЦИИ ТАЗОВОГО МЕХАНИЗМА АНТРОПОМОРФНОГО РОБОТА АНТАРЕС.....	155
<i>O.Yu. Osipov, R.V. Mesheryakov, M.G. Shepelenko</i> DESIGNING DIGITAL MODELS OF ELEMENTS OF THE ELECTROMACHINE PART OF ELECTROMECHANIC MODULES OF ROBOTIC SYSTEM .....	160
<i>О.Ю. Осипов, Р.В. Мецерыков, М.Г. Шепеленко</i> ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОМАШИННОЙ ЧАСТИ ЭЛЕКТРОМЕХАТРОННЫХ МОДУЛЕЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	160
<i>I.A. Vasiliev</i> SIMULATION OF RESCUE ROBOT FOR USE IN RESCUE OPERATIONS GROUP.....	164
<i>И.А. Васильев</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ СПАСАТЕЛЬНОГО СРЕДСТВА ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СПАСАТЕЛЬНЫХ ГРУППАХ .....	164
<i>A.S. Shalunov</i> AUTOMATED MODELING TO EXTREME EXTERNAL FACTORS IN THE DESIGN OF ROBOTIC SYSTEMS .....	169
<i>А.С. Шалунов</i> ПРИМЕНЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ВНЕШНИЕ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИЕ ФАКТОРЫ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	169
<i>S.A. Gavrilenko, V.V. Davydchik, I.A. Eliseev, S.I. Sevastjanov</i> THE TIME-PROBABILITY MODELS AND METHODS FOR MOTIVATION OF THE COMPOSITION OF RECEIVING COMPLEX OF COMMUNICATIONS FOR COMPACT ROBOTIC SUBMARINE OBJECT.....	179
<i>С.А. Гавриленко, В.В. Давыдчик, И.А. Елисеев, С.И. Севастьянов</i> ВЕРОЯТНОСТНО-ВРЕМЕННЫЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ СОСТАВА КОМПЛЕКСА ПРИЁМНЫХ СРЕДСТВ СВЯЗИ МАЛОГАБАРИТНОГО РОБОТИЗИРОВАННОГО ПОДВОДНОГО ОБЪЕКТА.....	180
<b>УПРАВЛЕНИЕ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ/ ROBOTIC SYSTEMS CONTROL .....</b>	<b>186</b>
<i>Д.Н. Степанов, Е.Ю. Смирнова</i> МЕТОД КОРРЕКЦИИ ОЦЕНКИ ПОЛОЖЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИЗУАЛЬНОЙ ЛОКАЦИИ ЕСТЕСТВЕННЫХ ОРИЕНТИРОВ .....	186
<i>К.И. Кий</i> АЛГОРИТМЫ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА СИГНАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ В ДОРОЖНОЙ СЦЕНЕ .....	195
<i>S.N. Kirillov, I.V. Kostkin</i> ADAPTIVE ALGORITHM FOR PROCESSING UNDERWATER AND OVERWATER IMAGES UNDER INFLUENCE OF INTERFERENCE FACTORS .....	202
<i>С.Н. Кириллов, И.В. Косткин</i> АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ПРЕДОБРАБОТКИ ПОДВОДНЫХ И НАДВОДНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ ДЕЙСТВИИ МЕШАЮЩИХ ФАКТОРОВ.....	204
<i>А.Г. Лесков, Е.В. Селиверстова</i> АЛГОРИТМ ПЛАНИРОВАНИЯ И ВЫБОРА СПОСОБА ЗАХВАТА ДЕФОРМИРУЕМОГО ОБЪЕКТА .....	207
<i>V.P. Makarychev</i> ADAPTIVE VISUAL SERVO CONTROL OF ROBOTS.....	212
<i>В.П. Макарычев</i> АДАПТИВНОЕ ВИЗУАЛЬНОЕ СЕРВОУПРАВЛЕНИЕ РОБОТОВ .....	217
<i>V.P. Andreev, V.E. Tarasova</i> IDENTIFICATION OF OBJECTS USING SCANNING ANGULAR MOVEMENTS OF ULTRASONIC SENSOR.....	222
<i>В.П. Андреев, В.Э.Тарасова</i> ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ СКАНИРУЮЩИХ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДАТЧИКА .....	226
<i>Yu.I. Minkin, A.V. Panchenko, A.Yu. Shkanaev, I.A. Konovalenko, D.N. Putincev, R.N. Sadekov</i> COMPUTER VISION SYSTEM: A TOOL FOR EVALUATING THE QUALITY OF WHEAT IN A GRAIN TANK .....	231
<i>Ю.И. Минкин, А.В. Панченко, А.Ю. Шканаев, И.А. Коноваленко, Д.Н. Путинцев, Р.Н. Садеков</i> ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПШЕНИЦЫ ВНУТРИ ЗЕРНОВОГО БУНКЕРА КОМБАЙНА НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ.....	231

<i>A.V. Panchenko, A.Yu. Shkanaev, D.A. Krochina, D.V. Polevoy, R.N. Sadekov</i> ANALYSIS OF STRAW ROW IN THE IMAGE TO CONTROL THE TRAJECTORY OF THE AGRICULTURAL COMBINE HARVESTER.....	237
<i>А.В. Панченко, А.Ю. Шканаев, Д.А. Крохина, Д.В. Полевой, Р.Н. Садеков</i> АНАЛИЗ ГРАНИЦ ВАЛКОВ НА ИЗОБРАЖЕНИИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ТРАЕКТОРИЕЙ ДВИЖЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО КОМБАЙНА .....	237
<i>E.Shipovalov, V.Pryanichnikov</i> AUTOMATED MISSION PLANNING FOR MOBILE ROBOTS USING ON-BOARD COMPUTERS WITH HYBRID ARCHITECTURES .....	244
<i>Е.А. Шиповалов, В.Е. Пряничников</i> АВТОПЛАНИРОВАНИЕ МИССИЙ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ БОРТОВЫМИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМИ КОМПЛЕКСАМИ С ГИБРИДНОЙ АРХИТЕКТУРОЙ .....	244
<i>A.S. Yushenko, K.R. Lebedev, S.H. Zabihafar</i> ADAPTIVE NEURAL NETWORK CONTROL OF QUADROTOR HELICOPTER.....	245
<i>А.С. Ющенко, К.Р. Лебедев, С.Х. Забихафар</i> УПРАВЛЕНИЕ КВАДРОКОПТЕРОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДАПТИВНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ .....	245
<i>V.E.Pavlovsky, A.Yu.Shamin</i> THE DYNAMIC MODEL AND OPTIMAL CONTROL OF THE MOTION OF THE ROBOT-YACHTWITH DIFFERET FORMS OF THE SAIL.....	250
<i>В.Е.Павловский, А.Ю. Шамин</i> ДИНАМИЧЕСКИ ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РОБОТОМ-БУЕРОМ С РАЗЛИЧНОЙ ФОРМОЙ ПАРУСА.....	250
<i>Y. A. Zhukov, E. B. Korotkov, N. S. Slobodzyan</i> CONTROL OF HIGH-PRECISION SPACE APPLICATION SYSTEM OF POSITIONING AND ORIENTATION ON THE BASIS OF HEXAPODE WITH "THE SPATIAL SENSOR OF POSITION" .....	256
<i>Ю.А. Жуков, Е.Б. Коротков, Н.С. Слободзян</i> УПРАВЛЕНИЕ ВЫСОКОТОЧНОЙ СИСТЕМОЙ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ И ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА БАЗЕ ГЕКСАПОДА С «ПРОСТРАНСТВЕННЫМ ДАТЧИКОМ ПОЛОЖЕНИЯ» .....	257
<i>E.S. Briskin, N.G. Sharonov, Ya.V. Kalinin, A.V. Maloletov, V.A. Serov</i> ON THE FEATURES OF MOTION CONTROL OF MOBILE ROBOTS WITH WALKING LOCOMOTOR OF DISCRETE INTERACTING WITH THE SUPPORT SURFACE .....	265
<i>Е.С. Брискин, Н.Г. Шаронов, Я.В. Калинин, А.В. Малолетов, В.А. Серов</i> ОБ УПРАВЛЕНИИ ДВИЖЕНИЕМ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ С ДВИЖИТЕЛЯМИ, ДИСКРЕТНО ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИМИ С ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ .....	270
<i>V. P. Andreev, V. L. Kim</i> THE TRANSPORT MODULE MOTION ORGANIZATION IN THE COMPOSITION OF THE HETEROGENEOUS MODULAR MOBILE ROBOT.....	275
<i>В.П. Андреев, В.Л. Ким</i> ОРГАНИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ТРАНСПОРТНОГО МОДУЛЯ В СОСТАВЕ ГЕТЕРОГЕННОГО МОДУЛЬНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА.....	281
<i>V.P. Andreev, P.F. Pletenev</i> INTERMODULAR COMMUNICATION METHOD FOR HETEROGENEOUS MODULAR ROBOT.....	287
<i>В.П. Андреев, П.Ф. Плетенев</i> МЕТОД МЕЖМОДУЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ГЕТЕРОГЕННОМ МОДУЛЬНОМ МОБИЛЬНОМ РОБОТЕ .....	292
<i>D.A. Dobrynin</i> PRINCIPLES OF LEARNING MANAGEMENT SYSTEM FOR EXOSKELETON CONTROL TASKS.....	297
<i>Д.А. Добрынин</i> ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ОБУЧАЕМОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ЭКСОСКЕЛЕТОМ .....	297
<i>S.V. Manko, S.A.K. Diane, V.M. Lokhin, A.K. Novoselsky</i> GROUP CONTROL OF ROBOTS FOR DEBRIS REMOVAL AND CONSTRUCTION DISASSEMBLY IN THE ATOMIC INDUSTRY.....	302
<i>С.В. Манько, С.А.К. Диане, В.М. Лохин, А.К. Новосельский</i> ГРУППОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ РОБОТАМИ В ЗАДАЧАХ РАЗБОРА ЗАВАЛОМ И ДЕМОНТАЖА ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ.....	306
<i>S.R. Eprikov, V.E. Pryanichnikov</i> TECHNOLOGY OF MULTI-AGENT CONTROL OF ROBOTARIUM AND PRODUCTION CELLS WITH SIMULTANEOUS SIMULATION.....	311
<i>С.Р. Эприков, В.Е. Пряничников</i> ТЕХНОЛОГИИ МНОГОАГЕНТНОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТАРИУМАМИ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ ЯЧЕЙКАМИ С ОДНОВРЕМЕННОЙ СИМУЛЯЦИЕЙ .....	312
<i>A.V. Nazarova, Meixin Zhai</i> DISTRIBUTED PROBLEM SAVING IN MULTI-AGENT ROBOTIC SYSTEM .....	313
<i>А.В. Назарова, Мэйсинь Чжэй</i> РАСПРЕДЕЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ В МНОГОАГЕНТНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ .....	313
<i>S.L. Zenkevich, Hua Zhu, Meixin Zhai</i> THE MOVEMENT CONTROL OF ROBOTS IN A GROUP BASED ON THE SMOOTHING TRAJECTORY .....	325
<i>С.Л. Зенкевич, Хуа Чжу, Мэйсинь Чжэй</i> УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ РОБОТОВ В ГРУППЕ НА ОСНОВЕ СГЛАЖИВАНИЯ ТРАКТОРИИ.....	326
<i>L.A. Martynova, G.V. Konuyukhov, I.V. Pashkevich, N.N. Rukhlov</i> MULTI-AGENT APPROACH TO THE GROUP MANAGEMENT OF AUV IN CONDUCTING SEISMIC EXAMINATION.....	330
<i>Л.А. Мартынова, Г.В. Коноухов, И.В. Пашкевич, Н.Н. Рухлов</i> МУЛЬТИАГЕНТНЫЙ ПОДХОД К ГРУППОВОМУ УПРАВЛЕНИЮ АНПА ПРИ ВЕДЕНИИ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ .....	330
<i>E.S. Briskin, V.A. Serov, N.G. Sharonov, I.S. Penshin</i> ON FEATURES OF MOBILE ROBOTS MOTION CONTROL WITH ANCHOR-ROPE PROPULSION DEVICES .....	336

<i>Е.С. Брискин, В.А. Серов, Н.Г. Шаронов, И.С. Пеньшин</i> ОБ ОСОБЕННОСТЯХ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ С ДВИЖИТЕЛЯМИ ЯКОРНО-ТРОСОВОГО ТИПА .....	337
<b>РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ РТК/ DEVELOPMENTS AND APPLICATION OF RTC</b> .....	344
<i>I.V. Ryadchikov, E.V. Nikulchev, S.I. Sechenev, S.G. Sinitsa, A.V. Bolshakov, A.A. Feshin, A.M. Alotaki, A.N. Smirnov, P.P. Volkodav</i> DESIGN AND CONTROL OF SELF-STABILIZING ANGULAR ROBOTICS ANYWALKER.....	344
<i>И.В. Рядчиков, Е.В. Никульчев, С.И. Сеченев, С.Г. Сеница, А.В. Большаков, А.А. Фешин, А.М. Алотаки, А.Н. Смирнов, П.П. Волкодав</i> ПРОЕКТИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ САМОСТАБИЛИЗИРУЮЩЕГО ШАГАЮЩЕГО РОБОТА ANYWALKER .....	344
<i>A.E. Gavrilov, A.V. Leonard, O.A. Mishustin, D.M. Selyunin, S.B. Hantimirova</i> THE UNIVERSAL WALKING INSECTOMORPHIC PLATFORM .....	352
<i>А. Е. Гаврилов, А. В. Леонард, О. А. Мишустин, Д. М. Селюнин, С. Б. Хантимирова</i> УНИВЕРСАЛЬНАЯ ШАГАЮЩАЯ ИНСЕКТОМОРФНАЯ ПЛАТФОРМА .....	357
<i>M.V. Ignatyev, V.P. Popov, M.B. Sergeev</i> THE PROBLEM OF THE EXTERNAL CONTROL OF DRIVING OFFENDERS TO IMPROVE ROAD SAFETY .....	361
<i>М.В. Игнатъев, В.П. Попов, М.Б. Сергеев</i> ПРОБЛЕМЫ ВНЕШНЕГО УПРАВЛЕНИЯ АВТОМОБИЛЯМИ-НАРУШИТЕЛЯМИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ.....	362
<i>M.V. Ignatyev, V.A. Erokhin, Ya.A. Lipinskiy, P.I. Makin</i> INFORMATION-COMPUTATIONAL SYSTEM OF A ROBOT DESIGNED TO INSPECT THE PIPELINE.....	365
<i>М.В. Игнатъев, В.А. Ерохин, Я.А. Липинский, П.И. Макин</i> ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА АДАПТИВНОГО ШАГАЮЩЕГО РОБОТА ДЛЯ ОБСЛЕДОВАНИЯ ГАЗОПРОВОДА .....	365
<i>Ю.В. Подураев</i> ПОДХОД И ОПЫТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЕДИЦИНСКОЙ КОЛЛОБОРАТИВНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ ХИРУРГИИ И БИОПРИНТИНГА .....	369
<i>A. Motienko, A. Ronzhin, A. Altunin, B. Kryuchkov, V. Usov</i> A EVACUATION OF A COSMONAUT IN A SPACESUIT DURING EXTRAVENICULAR ACTIVITY ON THE LUNAR SURFACE WITH ASSISTANCE OF RESCUE ROBOTS .....	373
<i>А.И. Мотиенко, А.Л. Ронжин, А.А. Алтунин, Б.И. Крючков, В.М. Усов</i> ЭВАКУАЦИЯ КОСМОНАВТА В СКАФАНДРЕ ВО ВРЕМЯ ВНЕКОРАБЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА ПОВЕРХНОСТИ ЛУНЫ С УЧАСТИЕМ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ РОБОТОВ.....	377
<i>В.Л. Афонин</i> РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ПЕРА ЛОПАТОК ГТД.....	382
<i>A.A. Aryskin, A.J. Ksenzenko, Yu.S. Marzanov, E.A. Prycev, V.E. Pryanichnikov, R.V. Khelemendik, S.R. Eprikov</i> INDUSTRIAL AUTOMATION WITH REMOTE ACCESS AND AUTOMATIC RESOLUTION OF LOGICAL CONTRADICTIONS FOR INDUSTRY 4.0.....	386
<i>А.А. Арыскин, А.Я. Ксензенко, Ю.С. Марзанов, Е.А. Прысев, В.Е. Пряничников, Р.В. Хелемендик, С.Р. Эприков</i> ПРОМЫШЛЕННАЯ АВТОМАТИКА С ДИСТАНЦИОННЫМ ДОСТУПОМ И АВТОМАТИЧЕСКИМ РАЗРЕШЕНИЕМ ЛОГИЧЕСКИХ ПРОТИВОРЕЧИЙ ДЛЯ ИНДУСТРИИ 4.0.....	387
<i>A.V. Lopota, S.A. Polovko, P.K. Shubin, E.Yu. Smirnova</i> CONCEPTUAL ISSUES OF INNOVATIVE DEVELOPMENT OF MARINE RESCUE ROBOTICS IN EXTREME ARCTIC CONDITIONS .....	388
<i>А.В. Лопота, С.А. Половко, Е.Ю. Смирнова, П.К. Шубин</i> КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ МОРСКОЙ СПАСАТЕЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ ДЛЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ АРКТИКИ.....	388
<i>M.V. Savin, S.G. Tsarichenko</i> РОБОТ ДЛЯ ШАХТНЫХ РАБОТ .....	395
<i>A.A. Koshurina, V.E. Gai, R.A. Dorofeev, E.M. Napilov, S.S. Bobko</i> THE DEVELOPMENT OF THE ROBOTIC PLATFORM FOR RESCUE OPERATIONS IN EMERGENCY COAL MINES .....	399
<i>А.А. Кошурина, В.Е. Гай, Р.А. Дорофеев, Е.М. Хапилов, С.С. Бобко</i> РАЗРАБОТКА РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ ПОИСКОВО-СПАСАТЕЛЬНЫХ РАБОТ В АВАРИЙНЫХ ШАХТАХ .....	404
<i>R.S. Mukhin, A.V. Polin</i> SPECIALIZED END EFFECTOR FOR SPACE MANIPULATION SYSTEM.....	409
<i>Р.С. Мухин, А.В. Полин</i> СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЕ ЗАХВАТНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ МАНИПУЛЯТОРА КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ .....	409
<i>A.V. Yaskевич, I.E. Chernyshev</i> DESIGNING OF PARALLEL MANIPULATOR FOR A NEW PERIPHERAL DOCKING MECHANISM.....	421
<i>А.В. Яскевич, И.Е. Чернышев</i> ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО МАНИПУЛЯТОРА НОВОГО ПЕРИФЕРИЙНОГО СТЫКОВОЧНОГО МЕХАНИЗМА.....	421
<i>I.A. Galkin</i> ORGANIZATION OF NAVIGATION SUPPORT FOR MARINE ROBOTIC COMPLEXES IN OPERATIONALLY IMPORTANT AREAS OF THE WORLD OCEAN .....	427
<i>И.А. Галкин</i> ОРГАНИЗАЦИЯ НАВИГАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МОРСКИХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ В ОПЕРАТИВНО-ВАЖНЫХ РАЙОНАХ МИРОВОГО ОКЕАНА.....	427
<i>А.И. Опарин</i> ОПЕРАТИВНОЕ КОМПЛЕКТОВАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ГРУППИРОВОК РАЗНОРОДНЫХ СРЕДСТВ ВЕДЕНИЯ ПОДВОДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАБОТ.....	431
<i>V. Kozhemyakin</i> GAMMA RADIATION DETECTION UNITS FOR USE WITH REMOTELY PILOTED AIRCRAFTS FOR RADIATION MONITORING PURPOSES .....	439

<i>В.А. Кожемякин</i> БЛОКИ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СОСТАВЕ ДИСТАНЦИОННО УПРАВЛЯЕМЫХ БЕСПИЛОТНЫХ СРЕДСТВ РАДИАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ..	440
<i>N.A. Rudianov, V.S. Khruschev</i> ORGANIZATION OF THE ACQUISITION AND FORMALIZATION OF KNOWLEDGE OF INTELLIGENT SYSTEMS OF PROSPECTIVE AUTONOMOUS MILITARY ROBOTIC COMPLEXES IN THE COURSE OF PILOT OPERATION OF REMOTE-CONTROLLED COMPLEXES.....	447
<i>Н.А. Рудианов, В.С. Хрущев</i> ОРГАНИЗАЦИЯ ПРИОБРЕТЕНИЯ И ФОРМАЛИЗАЦИИ ЗНАНИЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ПЕРСПЕКТИВНЫХ АВТОНОМНЫХ РТК ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ В ХОДЕ ОПЫТНО-ВОЙСКОВОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ДИСТАНЦИОННО-УПРАВЛЯЕМЫХ КОМПЛЕКСОВ .	447
<i>M. Dudziak, O. Granichin</i> EXTREME COMPLEX SYSTEMS, UNCERTAIN AND UNCOOPERATIVE ROBOTIC NETWORKS, AND CONTROL STRATEGIES BASED UPON STOCHASTIC ALGORITHMS.....	450
<i>M. Dudziak</i> ATHOS, A FUNCTIONAL-LOGIC OPERATING SYSTEM FOR ROBOT COMMUNITIES WITH SELF-ORGANIZATION AND PERSISTENT LEARNING CAPABILITIES .....	457
<i>M.A. Gudkov, V.N. Luk'yanchik, S.N.Ovsjannikov</i> THE CREATION OF A GROUND-BASED ROBOTIC COMPLEX OF ADVANCED AIRCRAFT AIMER FOR THE MANAGEMENT OF ASSAULT AND ARMY AVIATION.....	462
<i>М.А.Гудков, В.Н. Лукьянчик, С.Н.Овсянников</i> К СОЗДАНИЮ НАЗЕМНОГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПЕРЕДОВОГО АВИАЦИОННОГО НАВОДЧИКА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ АРМЕЙСКОЙ И ШТУРМОВОЙ АВИАЦИЕЙ.....	462
<i>M.A. Gudkov, V.N. Luk'yanchik, S.N.Ovsjannikov</i> THE CREATION OF A GROUND-BASED ROBOTIC COMPLEX OF ADVANCED AIRCRAFT AIMER FOR THE MANAGEMENT OF ASSAULT AND ARMY AVIATION.....	467
<i>М.А.Гудков, В.Н. Лукьянчик, С.Н.Овсянников</i> К СОЗДАНИЮ НАЗЕМНОГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПЕРЕДОВОГО АВИАЦИОННОГО НАВОДЧИКА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ АРМЕЙСКОЙ И ШТУРМОВОЙ АВИАЦИЕЙ.....	468
<i>В.М. Московченко, В.В. Кузнецова, О.С. Лаута, А.М. Крибель, М.А. Коцыняк</i> ПОДХОД К ОБЕСПЕЧЕНИЮ ЗАЩИТЫ КАНАЛА УПРАВЛЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ .....	473

*I.V. Shardyko, V.V Titov*

**A CLOSED-FORM SOLUTION OF IK TASK FOR A 6-DOF MANIPULATOR WITH PITCH AXES  
OFFSET AND A TECHNIQUE OF FAST JOINT SPACE TRAJECTORY COMPUTATION<sup>1</sup>**

*RTC, Saint-Petersburg,  
i.shardyko@rtc.ru, vtitov@rtc.ru*

**Abstract**

The paper presents an analytical solution of inverse kinematics task for a 6-DOF manipulator with kinematics similar to that of PUMA, except additional angular components introduced by the linear offsets of the shoulder and elbow pitch axes from the main manipulator axis. The described procedure is exact, provides the convenient choice of the optimal solution from all the possible ones and requires only one iteration to obtain this solution. Implementation of trajectory control is proposed for which a new approach for computing the sequences of time intervals and joint speed is introduced. The results show the relative fastness of algorithms in comparison to the widely-known numerical and optimization techniques.

Keywords: manipulators; inverse kinematics; closed-form solution; trajectory control; joint speed computation.

**Introduction**

A manipulator represents a chain of links from base to tool (end-effector, flange) connected by joints. There are a number of joint types, but revolute and prismatic joints are widespread. The authors have previously suggested a solution for a type of a 5-DoF manipulator, which can be found in [1]. The manipulator in discussion (further referred as M1) has six DOF and all the joints of its kinematic chain are revolute. This type of structure is widely known, its description being easily found in literature, and the most famous example is PUMA [2,p.24;3], which kinematic structure is given in Figure 1.

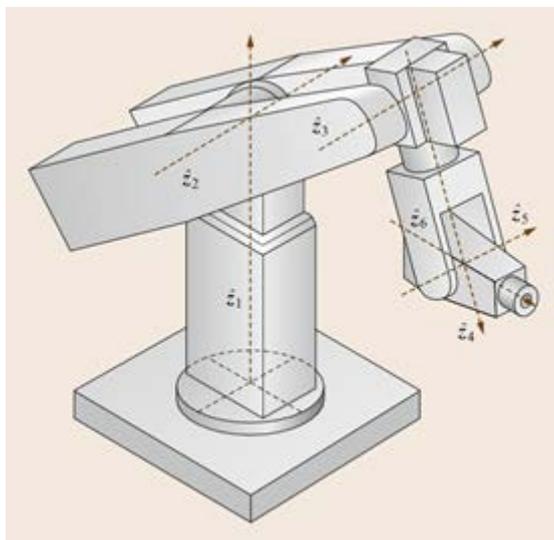


Figure 1 – Kinematics of PUMA

For the present day, the absolute majority of manipulators operates in Cartesian space in kinematic mode, controlling the tool center point (TCP) position, velocity or, in general case, trajectory. The operating Cartesian space can be set rather differently, being attached to arbitrary body, but easily transformed to another Cartesian space if needed. Full trajectory control assumes synchronous motion of joints through a set of intermediate points at the certain moments of time with required speed. The task is to create this set, determine the time intervals and calculate the speed, with the beginning and end points as input for a line or with any sufficient set of points for a given curve. To achieve this, forward and inverse kinematics tasks (FK and IK) and instantaneous FK and IK are to be solved and an algorithm considering joint speed and acceleration bounds should be provided. These topics are disclosed in the sections below.

### M1 Manipulator Geometrical Description

The popularity of PUMA structure is caused by a number of its qualities. Firstly, its wrist is of spherical type. It means that the axes of three orientation joints – elbow or wrist rotation (depends on design), wrist pitch and roll – intersect all at one point. Also, it has no joint offsets, i.e. axes of all joints intersect with the axes of the previous and subsequent joints. This case has the known closed-form IK solution with a total of at most 8 solutions for any pose of the TCP, where pose includes both position and orientation [3].

The M1 kinematic structure is given in Figure 2, where the Fig.2(a) gives the general idea of its scheme and the right part describes position and orientation of the introduced coordinate frames, all of which are right-handed. For the formal description the modified Denavit-Hartenberg representation was chosen [2, p.24], and the linear parameters of it are specified in Fig. 2(b).

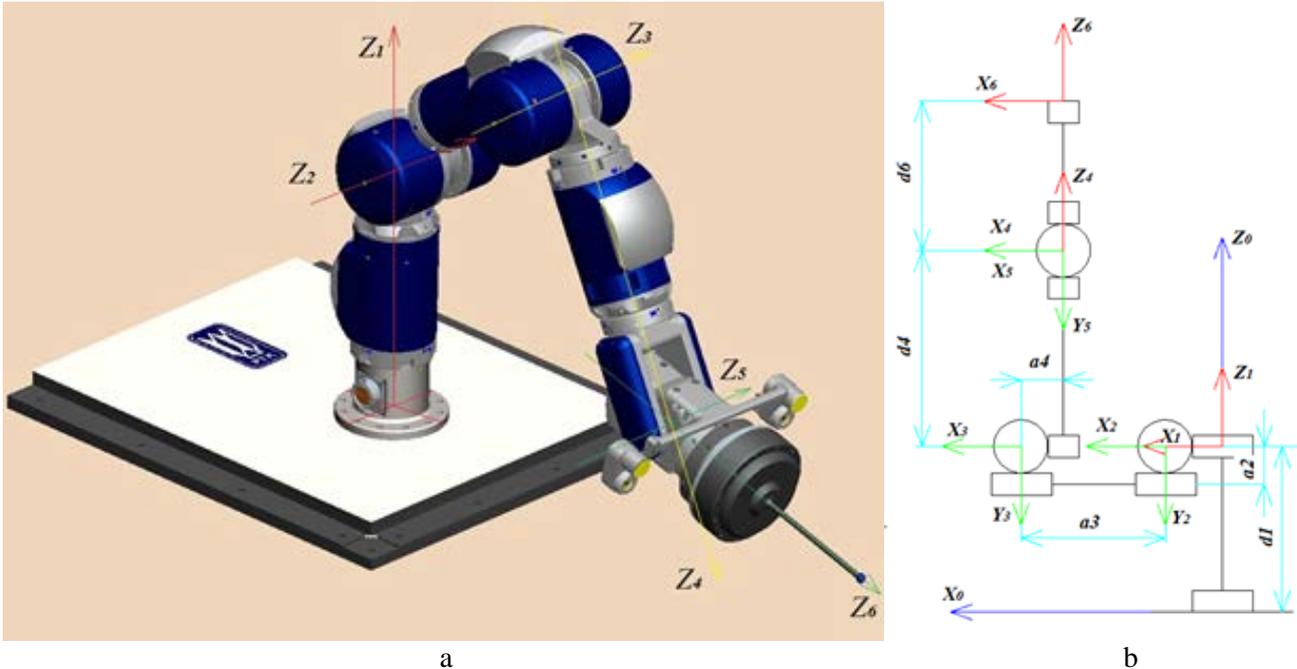


Figure 2 – Kinematics of M1

The similarity of this structure to the PUMA structure can be clearly seen. M1 also has the spherical wrist, and when all the pitch joints are oriented vertically, the axis of elbow rotation joint (J4), and, naturally, the axis of wrist roll joint (J6), coincide with the axis of shoulder rotation joint (J1), which can therefore be called the main manipulator axis. However, the axes of shoulder pitch joint (J2) and elbow pitch joint (J3) do not intersect the main axis. In other words, there is an offset of J2 from the main axis along the X1 and an offset of J4 along the axis X3, which both complicates finding the solution. A simplified drawing of typical geometry for an arbitrary TCP pose is given in Figure 3.

### Search for all possible IK Solutions

There can be seen a number of important points in Figure 3(a). T refers to the TCP location, C – to the spherical wrist center, B – to the base location, points 2A and 2B – to the possible locations of J2 axis, points 3A, 3B, 3C, 3D – to the possible locations of J3 axis. The orientation (attitude) of TCP is known, thus it can be written in a matrix form as a 3x3 matrix R. Because the length of the tool (line CT) is also known, the location of C can be derived as

$$C = T - R \cdot r, \quad (1)$$

where r, in general case, is a vector of TCP coordinates in a frame attached to the spherical wrist center and J6 (for orientation). In given case,  $r = [0 \ 0 \ CT]^T$ .

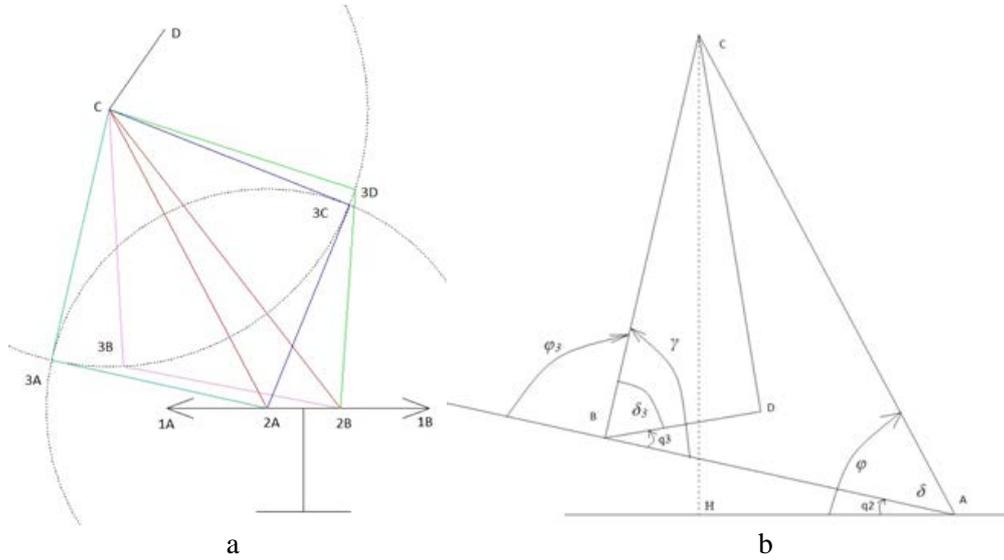


Figure 3 – IK geometry

A part of the picture is shown in a larger scale in Figure 3(b). Here C stands for the spherical wrist center again, A – for chosen location of J2, B – for the actual location of J3, BD is the offset of J3. After obtaining the location of C, a triangle 234 (ABC on the right) can be analyzed. Here vectors 1A and 1B denote the (imaginary) direction of J1, so that  $q_2$  (a generalized angle of J2), is the angle between one of these vectors and an appropriate line 23. Let  $\varphi$  be the angle between the lines 1A and 24, and  $\delta$  be the angle between the lines 23 and 24. Then, for the case 2A:

$$q_2 = -(\varphi \pm \delta), \quad (2)$$

and for the case 2B:

$$q_2 = -(\pi - (\varphi \pm \delta)) \quad (3)$$

Let H be the projection of 4 on the line 2A-2B. Then  $\Delta H = Z_4 - ZH$ ;

$$\Delta R = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}; \Delta x = XH - X_2 = X_4 - X_2; \Delta y = YH - Y_2 = Y_4 - Y_2;$$

$X_2 = a \cdot \cos(q_1)$ ;  $Y_2 = a \cdot \sin(q_1)$ . Here  $q_1$  is the angle of J1 and can be found as

$$q_1 = \text{atan2}(Y_4, X_4), \quad (4)$$

$$q_1 = \text{atan2}(-Y_4, -X_4), \quad (5)$$

in the cases A and B respectively, where  $\text{atan2}(y, x)$  is a full-circle version of  $\text{atan}(\alpha)$ .

After these preliminary computations,  $\varphi$  can be found as

$$\varphi = \text{atan2}(\Delta H, \Delta R) \quad (6)$$

$\delta$  can be taken with the help of the cosine theorem as

$$\delta = \text{acos}\left(\frac{l^2 + L^2 - d^2}{2Ll}\right) \quad (7)$$

$\delta = \text{acos}\left(\frac{l^2 + L^2 - d^2}{2Ll}\right)$  where  $l$  is the distance between points 2 and 3,  $L$  – between 2 and 4, and  $d$  – between 3 and 4. Obtaining  $\varphi$  and  $\delta$  gives two values for  $q_2$  from (2) and (3).

Looking again in the right of Fig.2, the actual  $q_3$  (ABD) can be found as  $q_3 = \pi + \varphi_3 - \delta_3$ , where  $\varphi_3$  is the angle of AB extended and BC, and  $\delta_3$  is obtained from the right triangle BCD.

$$\varphi_3 = \pm (\gamma - \pi), \quad (\text{cases 3A and 3C from the Figure 3, left}) \quad (8)$$

$$\varphi_3 = \pm (\pi - \gamma), \quad (\text{cases 3B and 3D from the Figure 3, left}) \quad (9)$$

where  $\gamma = \angle ABC$  can be found with the cosine theorem again from ABC triangle.

As a result, there are four solutions for the position structure, and for each of them a pair of solutions for orientation structure –  $q_4, q_5, q_6$  – exists and can be easily found for the spherical wrist [2, p.28].

### Desired Solution Selection

Generally, there is only one desired solution for the task, and to choose it from the obtained set some additional criteria are required. Because most of joints cannot provide full 360 degrees rotation, joint angular range is utilized as a first criterion. In the case of structure that is close to anthropomorphic arm, the range is quite strict due to limitations of shoulder pitch and elbow pitch rotations. Thus, the criterion substantially reduces the number of possible solutions.

If there is still more than one solution for the task, a criterion of proximity to the reference configuration is further applied, where proximity assumes the deviation of joint angle value in the solution from the

corresponding reference value. The solution with the smallest deviation for a given joint thereby is the optimal one. The procedure starts from base, comparing values for J1, and, if there are solutions indistinguishable by this criterion, continues by successively comparing the joints with higher indices until only one of them remains.

There can be a situation when there are no solutions in the set. This can happen if none of the triangles shown in Figure 3 exist, which means that the manipulator cannot reach the goal point with required orientation. Also, it may happen so that all the solutions are out of joint range. Anyway, the user of the algorithm should be informed of the fact to be able to handle the situation.

To evaluate the proposed technique, it was compared with a common numerical method for IK task (method of gradient descent) for the time required to find the desired solution. The test was conducted in MATLAB R2015b, while the comparison was held on an evenly spread set of manipulator configurations and the numerical method was applied with a pair of different step factors to provide a wider picture. The results can be seen in Figure 4, where the lower line corresponds to the closed-form solution. The time for task was restricted by 0.2 sec, and the numerical method did not always converge in time. So, when the fast solving of IK task is of greater importance, e.g. in extreme robotics applications, the developed algorithm can be considered by a software designer.

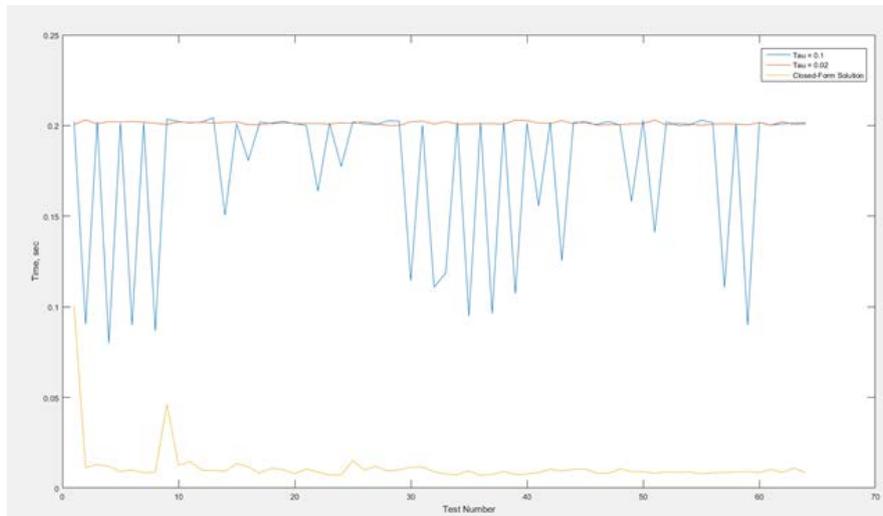


Figure 4 – Comparative performance of developed and common numerical IK algorithms

### Speed Calculation in Trajectory Computation

It is often desired of manipulators to move smoothly along some curve or polygon with the velocity given in Cartesian space, referred as TCP velocity ( $V$ ). However, there always are constraints on the speed and acceleration of joints due to power limitations. These constraints should be taken into account, which mainly results in defining the appropriate time intervals between trajectory points. It may also cause the change of TCP velocity if the required value happens to be too large. As the relation between angular and Cartesian quantities is configuration-dependent and non-linear, the solution is not straightforward.

There are a lot of approaches to the task and the one described in [4, p.169-194] is of great interest. The algorithm takes a sequence of points set by position as input (key points) and uses cubic splines to connect adjoining points. It is capable of handling the constraints in a precise manner through a constrained optimization procedure. However, optimization requires comparatively large amount of time, and an algorithm was developed to combine the smoothness of a trajectory with a smaller time of execution. It can be assumed that this cannot be without some trade-off, which will be confirmed further.

The idea is to set the initial and final velocities (which at once gives joint speed vectors) and then apply the (4.22) from [4] to compute joint speed in the middle points.

The equation is

$$A\omega = c, \tag{10}$$

where  $\omega$  is the vector of joint speed for the points from 2 to  $n-1$ ;

$$A = \begin{bmatrix} 2T_0 & T_0 & 0 & \dots & 0 \\ T_0 & 2(T_0 + T_1) & T_1 & \dots & 0 \\ 0 & T_1 & 2(T_1 + T_2) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 2(T_{n-3} + T_{n-2}) & T_{n-2} & 0 \\ \dots & \dots & \dots & T_{n-2} & 2(T_{n-2} + T_{n-1}) & T_{n-1} \\ 0 & \dots & \dots & 0 & T_{n-1} & 2T_{n-1} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$c = \begin{bmatrix} 6\left(\frac{q_1 - q_0}{T_0} - v_0\right) \\ 6\left(\frac{q_2 - q_1}{T_1} - \frac{q_1 - q_0}{T_0}\right) \\ \vdots \\ 6\left(\frac{q_n - q_{n-1}}{T_{n-1}} - \frac{q_{n-1} - q_{n-2}}{T_{n-2}}\right) \\ 6\left(v_n - \frac{q_n - q_{n-1}}{T_{n-1}}\right) \end{bmatrix} \quad (12)$$

It is clear that time intervals should be known to apply this equation. To obtain these intervals a technique is proposed. Firstly, it is important to secure that constraints on joint speed are satisfied. Thus, the required  $V$  is converted into  $\omega$  for each point, which elements are checked for exceeding the limit and, if so, are proportionally scaled down to suit the constraints. This operation doesn't warp the line of motion but changes its velocity; still, it's the unavoidable consequence.

Next, the acceleration constraints should be dealt with. Let the motion on each interval be uniformly accelerated, then having known joint position and speed on interval bounds it is easy to get the acceleration value. If this value is out of limits then the limit value is taken with the appropriate sign and the required time can be obtained finally for each joint. The maximum of such time values is assigned then as the interval length. Now the result of this technique is piecewise second-order spline that has jerks of acceleration but conforms to constraints.

Next, using obtained time intervals in (10) gives a trajectory which is smooth, but by the cost of joint speed (and TCP velocity) deviation in some extent, which will depend on the density of key points. Increasing the key points number leads to the greater distortion of velocity but also to the finer spline repetition and vice-versa, and a developer can set suitable system behavior himself. Final result for a trajectory includes a set of points  $(P, W, T)$ , where  $P$  is the vector of joint position,  $T$  – a moment of time when manipulator goes through  $P$ , counted from the initial point, and  $W$  – vector of joint speed at  $T$ . As an example, creation of a trajectory for a straight line of 0.2 meter length is presented in Figure 5 and Figure 6.

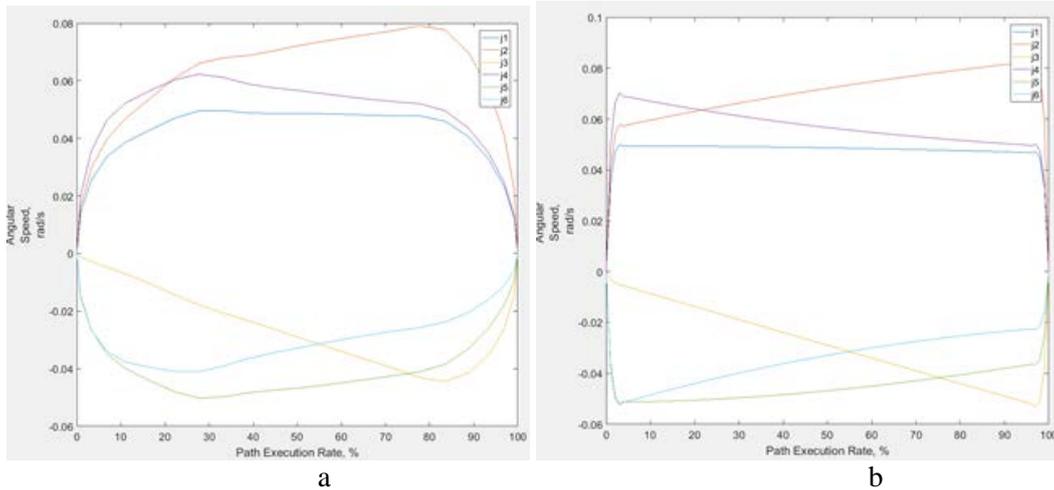


Figure 5 – Joint angular speed

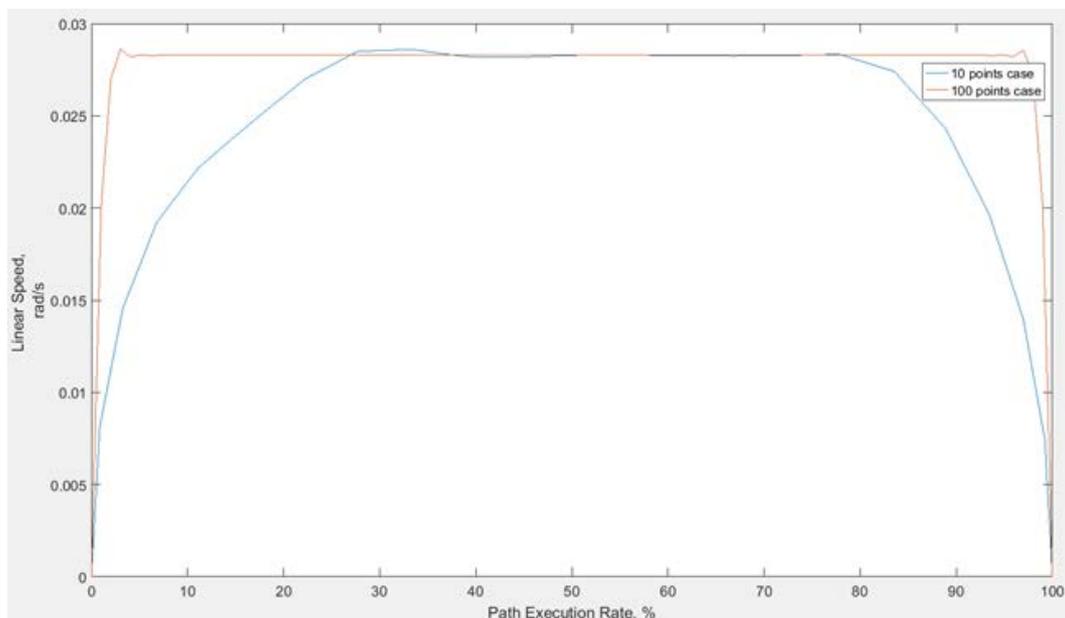


Figure 6 – Resultant linear speed

Figure 5 shows the final angular speed profile of all the joints in two cases: with the number of key points equal 10 (left part) and 100 (right part). The comparison of TCP velocity profiles for the named cases is shown in Figure 6. Attention should be paid to the fact that path and not the time is selected for the horizontal axis, which was considered as more informative choice. These graphics confirms the assertions made earlier and the applicability of the method.

### Conclusion

In this paper there were presented two techniques addressing the kinematic control of manipulators. A closed-form solution of the inverse kinematic task for a 6 DoF manipulator with a given structure was suggested. A geometrical approach was used to obtain a total of 8 possible solutions along with an algorithm to choose the optimal one. The solution is fast and exact while specifically applicable for the manipulators of the presented type. A method for creation a (P,W,T) trajectory, namely, for calculating transitional joint velocity and time is also submitted. The method requires one iteration and therefore works fast but gives deviation in either position or velocity of TCP from the desired value, which is acceptable in a wide number of tasks.

### Acknowledgments

Research is carried out (conducted) with the financial support of the state represented by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation.

Unique project Identifier: RFMEFI57814X0046.

1. Особенности математического описания манипуляционной системы контроля металла патрубков верхнего блока / Шардыко И.В. // Экстремальная робототехника: Труды международной научно-технической конференции. – СПб: Изд-во «Политехника-сервис», 2016. – с. 339 – 343.
2. Siciliano B., Khatib O. Handbook of Robotics. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. – 1611 p.
3. Lee C.S.G. A Geometric Approach In Solving the Inverse Kinematics of PUMA Robots – College of Engineering, The University of Michigan, 1983. – 86 p.
4. Biagotti L., Melchiorri C. Trajectory Planning for Automatic Machines and Robots. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008 – 514 c.

## **ЧАСТНЫЙ СЛУЧАЙ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ КИНЕМАТИКИ ШЕСТИСТЕПЕННОГО МАНИПУЛЯТОРА И МЕТОДИКА БЫСТРОГО РЕШЕНИЯ ТРАЕКТОРНОЙ ЗАДАЧИ В ПРОСТРАНСТВЕ ОБОБЩЁННЫХ КООРДИНАТ<sup>1</sup>**

*ЦНИИ РТК, г. Санкт-Петербург,  
i.shardyko@rtc.ru, vtitov@rtc.ru*

### **Аннотация**

В статье представлено аналитическое решение обратной задачи кинематики для шестистепенного манипулятора, кинематическая схема которого близка к схеме манипулятора PUMA. Отличием является смещение осей шарниров тангажа плеча и тангажа локтя от главной оси манипулятора, что приводит к появлению в решении дополнительных компонент углов для данных шарниров. Приведённый алгоритм является точным, позволяет сравнительно просто осуществлять выбор оптимального решения из всех возможных и при этом требует выполнения лишь одной итерации для получения результата.

Также представлена методика реализации траекторного управления, в которой предлагается новый подход к расчёту интервалов времени между точками траектории и угловых скоростей шарниров в этих точках. Показано преимущество в быстродействии представленных алгоритмов относительно известных численных и оптимизационных алгоритмов.

Ключевые слова: манипуляторы; обратная задача кинематики; частное решение; траекторное управление; расчёт угловых скоростей шарниров.

### **Введение**

Манипулятор представляет собой последовательность звеньев, образующих цепь от основания до инструмента (фланца инструмента), в общем случае – рабочей точки (РТ), соединённых шарнирами. Существует достаточно много различных видов шарниров, но наиболее распространены в робототехнических системах (РТС) поступательные (призматические) и вращательные. В ранее опубликованных работах авторами было предложено решение обратной задачи кинематики для пятистепенного манипулятора [1]. Рассматриваемый в данной статье манипулятор (далее – М1) обладает шестью степенями свободы, каждая из которых представлена шарниром вращательного типа. Данная структура широко известна, в литературе можно достаточно легко встретить её описание, наиболее известным примером является манипулятор PUMA [2,3], кинематическая схема которого представлена на рисунке 1.

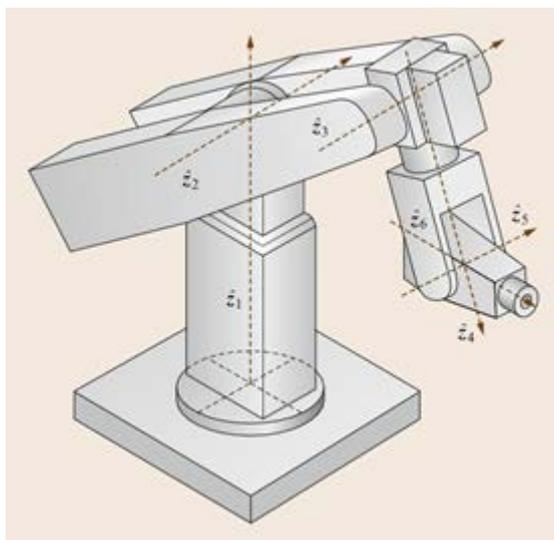


Рисунок 1 – Кинематическая схема манипулятора PUMA

В настоящее время абсолютное большинство манипуляторов работает в декартовом пространстве в кинематических режимах, управляя положением определённой точки инструмента (ТСП), либо её скоростью, либо, в общем случае, траекторией. Рабочее декартово пространство может быть выбрано различными способами, будучи связано с произвольным телом, однако, при необходимости оно может быть также легко преобразовано в любое другое декартово пространство. Траекторное управление в

полном смысле предполагает синхронное движение шарниров через последовательность точек в определённые моменты времени с определённой скоростью. Задачей является построить требуемую последовательность точек, определить интервалы времени между ними и рассчитать значения скорости в них при условии, что даны начальная и конечная точка для отрезка прямой либо достаточный набор точек для задания некоторой кривой. Для этого необходимо решить прямую и обратную задачи кинематики (ПЗК и ОЗК), а также прямую и обратную задачу мгновенной кинематики. Кроме того, необходим алгоритм учёта ограничений на угловые скорости и ускорения шарниров. Указанным задачам посвящены последующие разделы данной статьи.

### Геометрическое описание манипулятора М1

Большая популярность структуры, присущей манипулятору PUMA, вызвана рядом её особенностей. В первую очередь, кистевой узел такой структуры имеет сферический тип, что означает пересечение осей всех трёх ориентирующих шарниров: шарнира вращения локтя либо кисти (в зависимости от конструкции), шарнира тангажа и крена кисти - в одной точке. Кроме того, в ней отсутствуют смещения осей, т.е. ось каждого из шарниров пересекается как с осью предыдущего шарнира, так и с осью последующего. Для такой структуры известно точное аналитическое решение ОЗК, имеющее до восьми решений для различных позиций ТСР, где позиция включает в себя положение и ориентацию [3].

Кинематическая схема манипулятора М1 приведена на рисунке 2, а именно: общая схема, наложенная на компьютерную модель манипулятора – на рисунке 2а, в то время как положение и ориентация всех присутствующих в решении координатных систем – на рисунке 2б. Все введённые координатные системы – правые. Формальное описание было записано при помощи модифицированного представления Денавита-Хартенберга [2], линейные параметры которого также отражены на рисунке 2б.

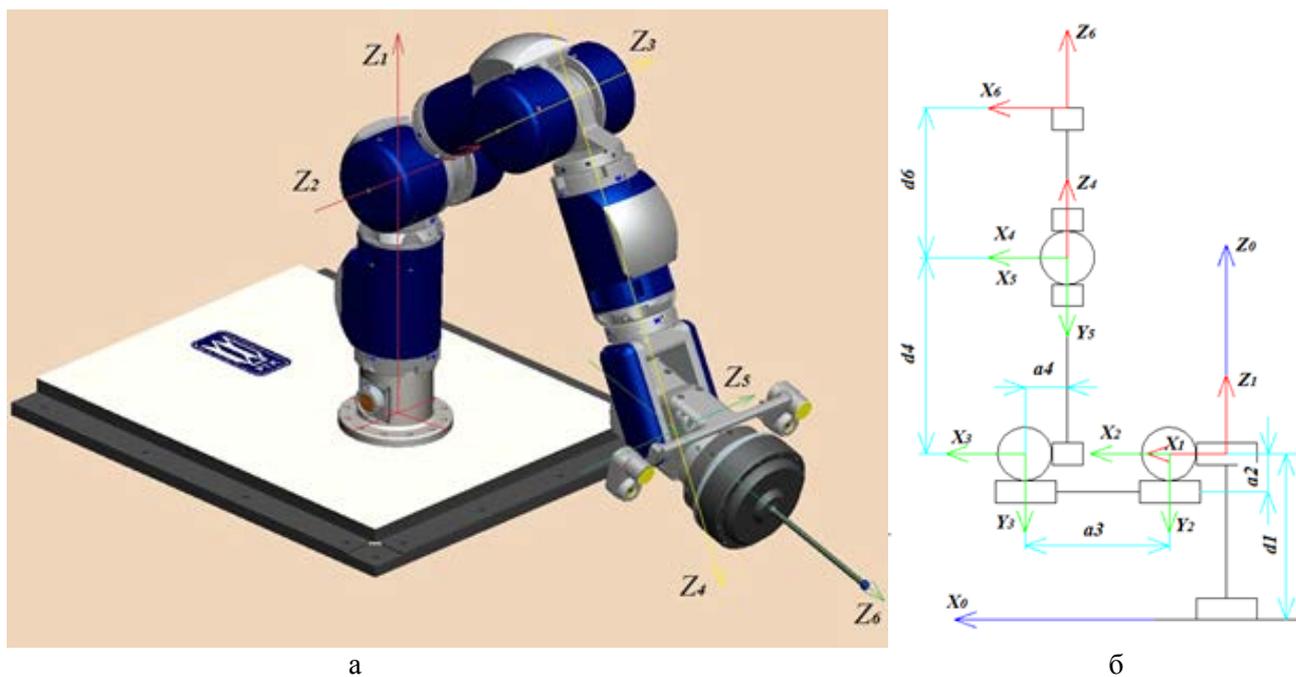


Рисунок 2 – Кинематическая схема манипулятора М1

Легко заметить схожесть данной кинематической схемы со схемой манипулятора PUMA. Манипулятор М1 также обладает сферическим кистевым узлом, а при вертикальной ориентации всех шарниров тангажа, оси шарнира рыскания локтя (J4) и, естественным образом, шарнира крена кисти (J6) совпадают с осью рыскания плеча, а сама ось может быть названа главной осью манипулятора. Однако, оси шарнира тангажа плеча (J2) и шарнира тангажа локтя (J3) не пересекают главную ось. Другими словами, существует смещение оси J2 от главной оси вдоль X1, а также смещение оси J4 вдоль оси X3, каждое из которых усложняет решение. Упрощённое изображённое геометрии звеньев манипулятора для произвольной позиции ТСР приведено на рисунке 3.

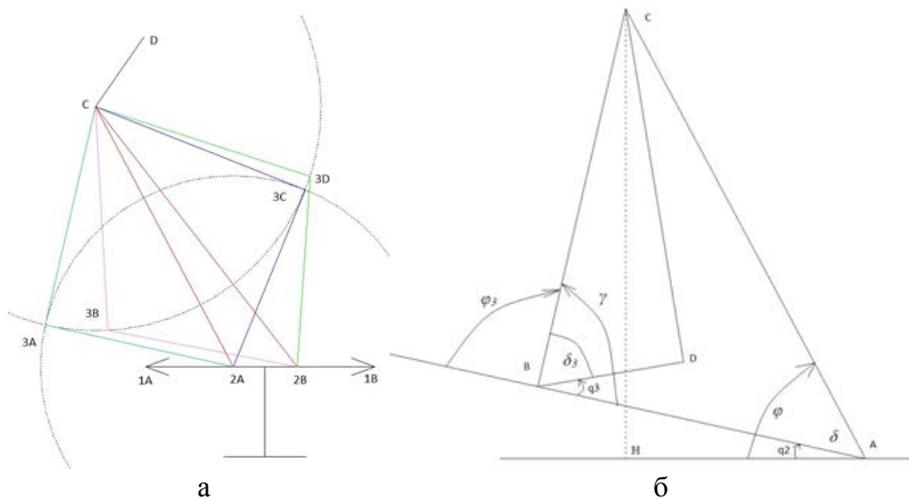


Рисунок 3 – Геометрия ОЗК

### Поиск всех возможных решений ОЗК

На рисунке 3а можно обозначить ряд узловых точек. Точка Т показывает положение ТСР, С – центр сферического кистевого узла, В – центр основания, точки 2А и 2В – возможные положения оси J2 (проходящей перпендикулярно рисунку), точки 3А, 3В, 3С, 3D – возможные положения оси J3. Ориентация инструмента (ТСР) известна, следовательно, её можно записать в форме матрицы размерностью 3 x 3. Так как длина инструмента (отрезок СТ) также известна, положение точки С определяется как

$$C = T - R \cdot r, \quad (1)$$

где r, в общем случае, – вектор координат ТСР в системе координат (СК), привязанной к центру кистевого узла, ориентация которого совпадает с ориентацией J6. В представленном случае  $r = [0 \ 0 \ CT]^T$ .

На рисунке 3б представлен участок чертежа в увеличенном виде. Точка С, как и ранее, соответствует центру кистевого узла, А и В – выбранным положениям J2 и J3, ВD – смещение J3. После определения положения точки С, можно рассмотреть треугольник 234 (АВС – справа). В нём векторы 1А и 1В определяют условное направление J1, а угол q2 (обобщённый угол шарнира J2) образован одним из данных векторов и соответствующей линией 23. Угол между линиями 1А и 24 обозначен как φ, угол между линиями 23 и 24 обозначен как δ. Тогда для случая 2А:

$$q2 = -(\varphi \pm \delta), \quad (2)$$

для случая 2В:

$$q2 = -(\pi - (\varphi \pm \delta)) \quad (3)$$

Если проекцию точки 4 на линию 2А-2В обозначить как Н, то  $\Delta H = Z4 - ZH$ ;  $\Delta R = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$ ;  $\Delta x = XH - X2 = X4 - X2$ ;  $\Delta y = YH - Y2 = Y4 - Y2$ ;  $X2 = a \cdot \cos(q1)$ ;  $Y2 = a \cdot \sin(q1)$ . Здесь q1 – угол поворота шарнира J1, который может быть определён как

$$q1 = \text{atan2}(Y4, X4), \quad (4)$$

$$q1 = \text{atan2}(-Y4, -X4), \quad (5)$$

для случаев А и В соответственно, где  $\text{atan2}(y, x)$  версия функции  $\text{atan}(\alpha)$  для полной окружности. После приведённых предварительных выкладок, φ можно найти как

$$\varphi = \text{atan2}(\Delta H, \Delta R) \quad (6)$$

δ можно рассчитать при помощи теоремы косинусов,

$$\delta = \arccos\left(\frac{l^2 + L^2 - d^2}{2lL}\right) \quad (7)$$

где l – расстояние между точками 2 и 3, L – между точками 2 и 4, d – между точками 3 и 4. Расчёт φ и δ даёт два значения для q2 по формулам (2) и (3).

Возвращаясь к рисунку 2, видно, что фактический угол q3 (АВD) может быть найден как  $q3 = \pi + \varphi3 - \delta3$ , где φ3 – угол между продолжением АВ и ВС, а δ3 может быть найден из прямоугольного треугольника ВСD,

$$\varphi3 = \pm (\gamma - \pi), \quad (\text{случаи 3А и 3С, рисунок 3, слева}) \quad (8)$$

$$\varphi3 = \pm (\pi - \gamma), \quad (\text{случаи 3В и 3D, рисунок 3, слева}) \quad (9)$$

где  $\gamma = \angle ABC$  и может быть рассчитан по теореме косинусов из треугольника АВС. Результатом решения являются четыре набора углов для подсистемы перемещения (J1, J2, J3), для каждого из этих наборов

также существует пара значений для каждого шарнира подсистемы ориентации (J4, J5, J6), которые легко могут быть найдены в рассматриваемом случае сферического кистевого узла [2, с.28]. Общее количество решений – восемь.

### Выбор желаемого решения

Как правило, задача требует определения единственного решения (желаемого), для выбора которого требуется некоторый набор дополнительных критериев. Так как большинство шарниров не обеспечивают вращения на  $360^\circ$ , диапазон вращения шарниров выбран в качестве первого критерия. В случае схемы, близкой к антропоморфной руке, диапазон достаточно строго ограничен вследствие пределов вращения шарниров тангажа плеча и локтя. Таким образом, критерий существенно уменьшает количество возможных решений.

Если количество решений задачи по-прежнему больше одного, вводится критерий близости к опорной конфигурации, в котором близость определяется как отклонение угла поворота шарнира от соответствующего опорного значения. Оптимальным для каждого из шарниров считается решение с наименьшим отклонением. Процедура начинается от основания, сравнением значений для J1, и в случае если решения совпадают по данному критерию, продолжается последовательным сравнением шарниров в порядке увеличения индексов до момента, когда останется лишь одно решение.

Возможно возникновение такой ситуации, что в наборе возможных решений не окажется ни одного решения. Причиной этому может быть невозможность существования ни одного из треугольников на рисунке 3, что означает невозможность размещения ТСР манипулятора в данной точке с требуемой ориентацией. Кроме того, может случиться, что для каждого из возможных решений значение угла поворота для хотя бы одного из шарниров будет за пределами допустимого диапазона. В любом случае, пользователь алгоритма оповещается о проблеме, чтобы предоставить ему возможность справиться с ситуацией (проверить введённые данные, найти другой маршрут движения).

Для оценки предложенной методики, было проведено её сравнение с типовым численным методом решения ОЗК (метод градиентного спуска) по длительности поиска оптимального решения. Тест был проведён в программном пакете Matlab, сравнение проводилось для равномерно распределённого набора конфигураций манипулятора, при этом численный метод был применён для каждой конфигурации дважды, с различными коэффициентами спуска для получения более общей картины. Результаты представлены на рисунке 4, где нижняя линия соответствует предложенному частному решению. Время на решение задачи было ограничено 0.2 с, в то время как численный метод не всегда сходился за указанное время, что видно на рисунке. Таким образом, когда повышенную важность имеет быстрота решения ОЗК, например, при применении в области экстремальной робототехники, разработанный алгоритм будет иметь преимущество при разработке ПО.

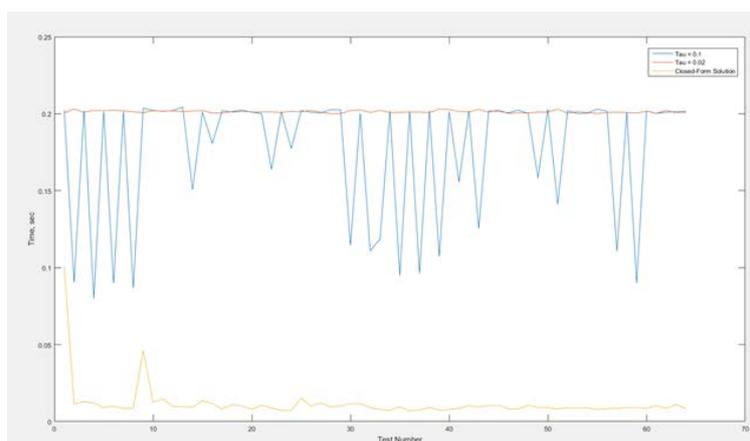


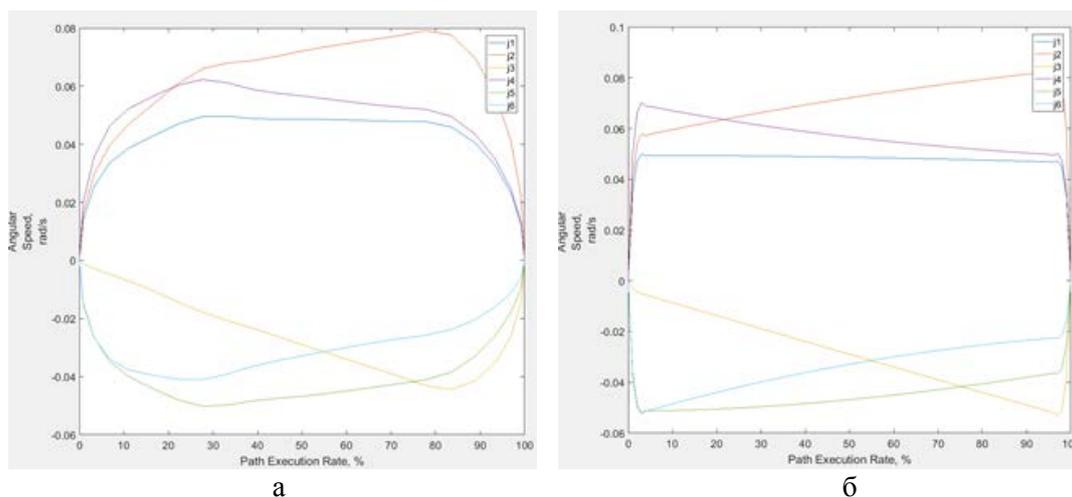
Рисунок 4 – Сравнение производительности разработанного алгоритма и типового численного решения ОЗК

### Вычисление скорости при расчёте траектории

Манипуляторам часто ставится задача плавного движения по некоторой кривой либо контуру с заданной в декартовом пространстве скоростью, обозначенной как скорость ТСР (V). Однако, в любой системе присутствуют ограничения на скорости и ускорения шарниров, связанные с предельным значением мгновенной мощности. Такие ограничения должны быть учтены при расчёте, что, как правило, заключается в определении минимально допустимого времени перехода между



в этот момент времени. Примеры рассчитанных траекторий для шага ТСП по отрезку прямой на 0,2 м представлены на рисунках 5 и 6.



а  
б  
Рисунок 5 – Угловая скорость шарниров

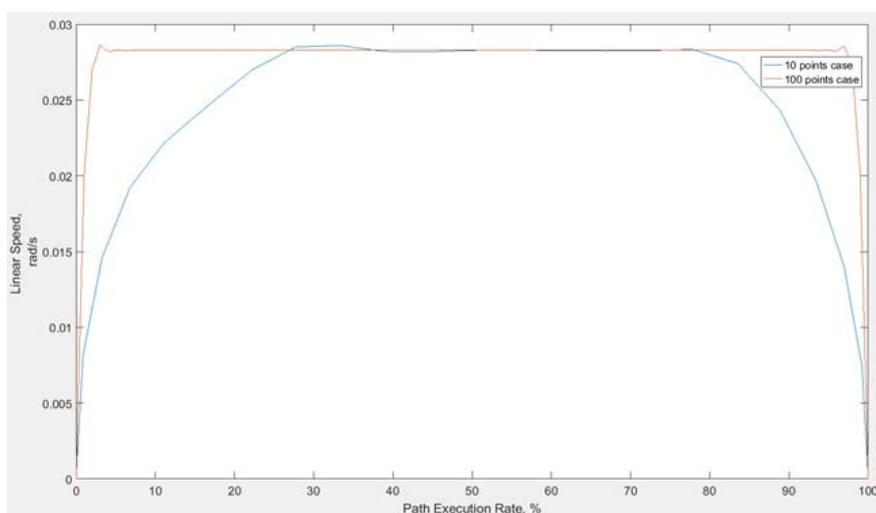


Рисунок 6 – Итоговая линейная скорость ТСП

На рисунке 5 показан итоговый профиль скорости для каждого из шарниров для двух случаев расчёта: с количеством опорных точек равным 10 (рисунок 5а) и равным 100 (рисунок 5б). Сравнение скорости ТСП для данных случаев приведено на рисунке 6. Следует обратить внимание, что горизонтальная ось отражает процент выполнения шага по выполненному перемещению, а не по времени, что представляется более информативным. Данные графики подтверждают приведённые выше тезисы о компромиссах в предложенной методике и её применимости.

### Заключение

В настоящей статье представлены две методики, относящиеся к кинематическому управлению манипуляторами. Предложено частное решение ОЗК для шестистепенного манипулятора с конкретной кинематической схемой. Рассмотрен геометрический подход, позволяющий получить до 8 возможных решений, а также алгоритм выбора оптимального решения. Решение является быстрым и точным, однако, специализированным для узкого класса манипуляторов с аналогичной схемой.

Также описана методика расчёта траектории в формате (P,W,T), а именно, для расчёта значений скорости в промежуточных опорных точках и времени прохода через них. Методика требует лишь одной операции, и, следовательно, является быстрой, но создаёт при этом отклонение от желаемых значений либо скорости, либо позиции ТСП, что тем не менее является приемлемым для широкого набора задач.

Работа выполняется при финансовой поддержке Минобрнауки России. Уникальный идентификационный номер проекта RFMEFI57814X0046.

1. Особенности математического описания манипуляционной системы контроля металла патрубков верхнего блока / Шардыко И.В. // Экстремальная робототехника: Труды международной научно-технической конференции. – СПб: Изд-во «Политехника-сервис», 2016. – с. 339 – 343.
2. Siciliano B., Khatib O. Handbook of Robotics. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. – 1611 p.
3. Lee C.S.G. A Geometric Approach In Solving the Inverse Kinematics of PUMA Robots – College of Engineering, The University of Michigan, 1983. – 86 p.
4. Biagotti L., Melchiorri C. Trajectory Planning for Automatic Machines and Robots. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008 – 514 c.

*V.G. Gradetsky, M.M. Knyazkov, A.N. Sukhanov, V.G. Chashchukhin*

## **OSCILLATORY PROCESSES IN ELECTROMAGNETIC MINIATURE ROBOTSII**

*Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow,  
gradet@ipmnet.ru*

### **Abstract**

The generated oscillations effect on the characteristics of electromagnetic miniature robots under direct and reverse motion along the internal surfaces of small diameter pipes is considered.

The influence of the frequency, length and duration of the control pulses on the change in speed and acceleration of motion is shown. The results of experimental studies are presented.

Keywords: miniature robot, electromagnetic operation principle, oscillatory processes, functional characteristics.

The study of oscillatory processes occurring in miniature electromagnetic robots is carried out at leading world scientific centers [1-6] and is an actual task, since it allows choosing the best possible characteristics, and determining the correspondence of operating variables to the required values, improving the quality and expanding the capabilities of robots.

Miniature robots with electromagnetic drive systems and technological sensors onboard are designed for direct and reversible movement inside small diameter pipes (5mm-20mm) and can be used for analysis of the quality of internal pipe surfaces, non-destructive testing and other inspection operations, for example, in power engineering, in aviation and aerospace industries [6-9].

*В.Г. Градецкий, М.М. Князьков, А.Н. Суханов, В.Г. Чашухин*

## **КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МИНИАТЮРНЫХ РОБОТАХ<sup>1</sup>**

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН (ИПМех РАН),  
gradet@ipmnet.ru*

### **Аннотация**

Рассматривается влияние генерируемых колебаний на характеристики электромагнитных миниатюрных роботов при прямом и реверсивном движении вдоль внутренних поверхностей труб малых диаметров. Показано влияние частоты, протяженности и длительности управляющих импульсов на изменение скорости и ускорения движения. Приводятся результаты экспериментальных исследований.

Ключевые слова: миниатюрный робот, электромагнитный принцип действия, колебательные процессы, функциональные характеристики.

### **1. Введение**

Исследование колебательных процессов, происходящих в миниатюрных электромагнитных роботах, проводится в ведущих мировых научных центрах [1-6] и является актуальной задачей, поскольку позволяет выбрать наилучшие возможные характеристики, определить соответствие рабочих параметров требуемым значениям, улучшить качество и расширить возможности роботов. Миниатюрные роботы с электромагнитными приводными системами и технологическими датчиками на борту предназначены для прямого и реверсивного движения внутри труб малого диаметра (5мм-20мм) и могут быть использованы для анализа качества внутренних поверхностей труб, неразрушающего

контроля и других инспекционных операция, например, в энергетике, в авиационной и авиакосмической промышленности [6-9].

## 2. Исследование колебательных процессов внутритрубных миниатюрных роботов

В состав конструкции исследуемого внутритрубного миниатюрного робота электромагнитного принципа действия входит корпус, соленоид, пружина и шток, который совершает периодические колебания относительно корпуса [1]. Внутри корпуса находится соленоид, в который втягивается шток при подаче напряжения на электрические контакты соленоида. При втягивании шток сжимает надетую на него пружину. Шток и корпус снабжены упорами, посредством которых робот контактирует с внутренней поверхностью трубы. Посредством упоров осуществляется реверсивное движение так, что при движении в желаемом направлении трение между упорами и поверхностью меньше, чем возможность перемещения в противоположном направлении. Движение робота осуществляется повторением колебательных циклов, при выполнении которых шток сначала втягивается соленоидом, а затем выталкивается пружиной из корпуса. Таким образом колебательные процессы следования циклов определяют действие подобных роботов. Изучение колебаний проводилось посредством численного моделирования уравнений движения [1] и проведением экспериментов с образцами миниатюрных роботов [1, 2, 3]. Здесь представим некоторые результаты исследования колебательных процессов.

Зависимости частоты колебаний скоростей штока и корпуса минибота с управляемыми упорами от времени представлены на Рис. 1. Обозначая отношение времени действия электромагнитной силы за период к величине периода посредством  $q_1$ , определим, что скважность импульса равна  $1-q$ . Зависимость скорости минибота от частоты электрических импульсов и их длительности (Рис. 2) позволяет анализировать соотношения между функциональными характеристиками и колебаниями.

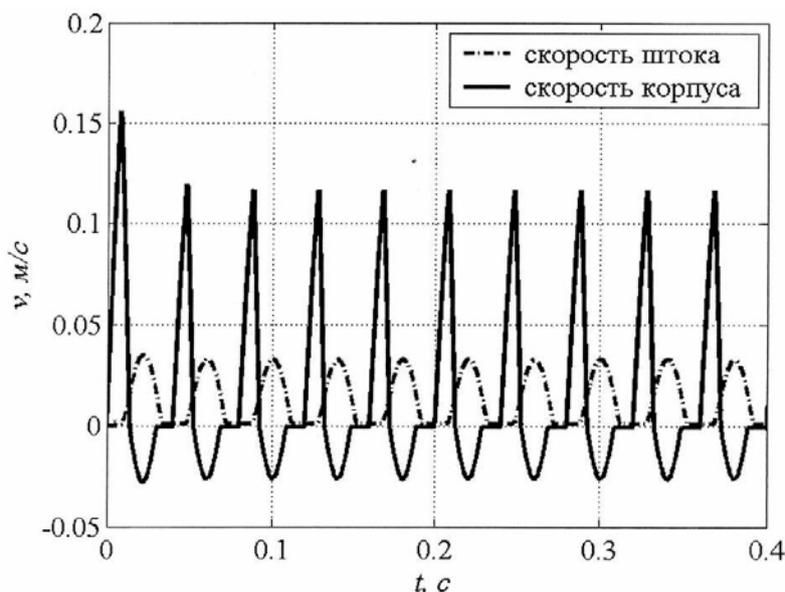


Рисунок 1 – Зависимость скоростей штока и корпуса внутритрубного робота с управляемыми упорами

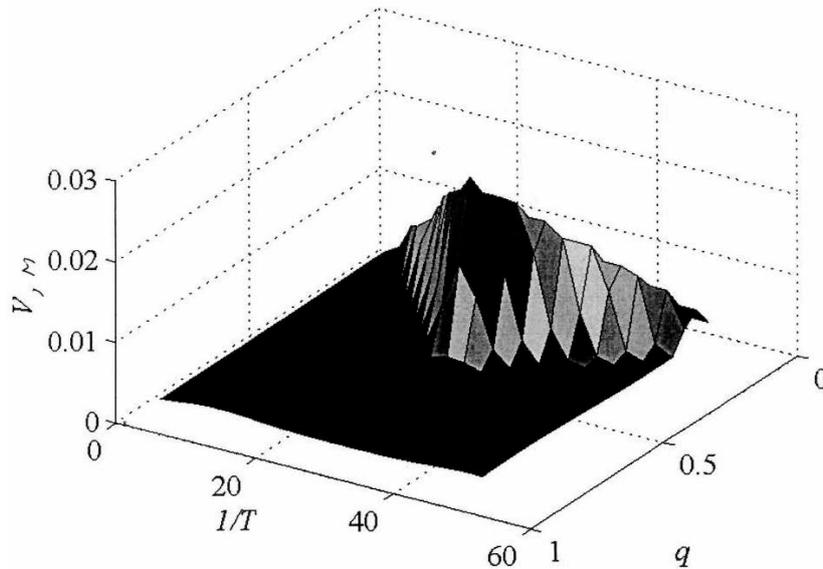


Рисунок 2 – Зависимость скорости робота от частоты и длительности импульса

При анализе колебательных процессов важное значение имеют ускорения системы и ее составляющих компонент, поскольку резонансные явления и колебания отдельных звеньев могут возникать в результате возникающих ускорений, т.е. разных изменений скоростей движения микроботов. Поэтому были получены данные об ускорениях изучаемой системы. Рассмотрение изменения ускорения центра масс робота за период (Рис. 3) показывает, что возвращение робота в исходное положение происходит со значительно меньшим, чем разгон. Ускорение при торможении плавно уменьшается, что исключает возникновение нежелательных колебаний. Изменение усредненного ускорения движения от скважности импульса электромагнитной силы при полученной максимальной скорости движения (Рис. 4) позволяет сделать вывод о возникновении пика ускорений при скважности  $q=0,58$ , что приводит к резкому изменению скорости небольшой амплитуды, происходящему в короткий промежуток времени, оцениваемым в  $0,07$  с.



Рисунок 3 – Изменения ускорения центра масс робота за период

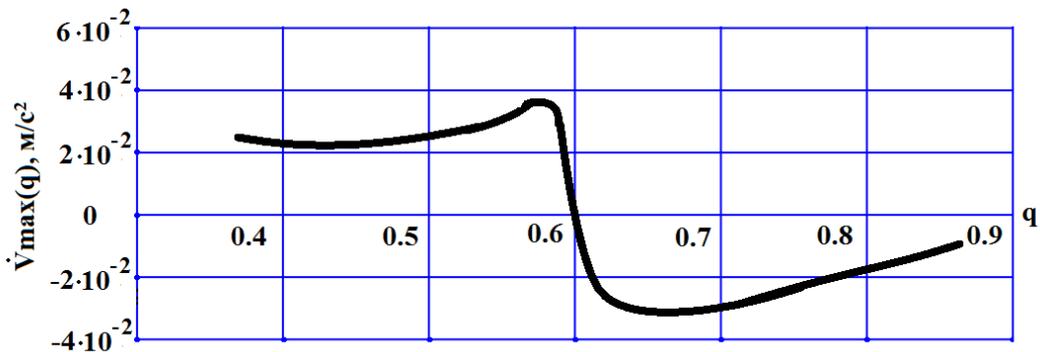


Рисунок 4 – Изменение усредненного ускорения движения от скважности импульса электромагнитной силы при полученной максимальной скорости движения

Получено изменение усредненных ускорений отдельных составляющих – штока и корпуса за период при рабочей скорости, а изменение усредненного ускорения штока и корпуса за период при максимальной скорости движения, которая соответствует  $q=0,518$  и  $T=0,035$  с.

Анализ зависимости средней за период скорости движения миниробота от частоты действия электромагнитной силы и протяженности ее импульса показывает (Рис. 5), что максимальное значение скорости достигается при определенном периоде воздействий и определенной скважности импульса. С помощью представленной номограммы можно определить  $q$  и  $T$ , при которых достигается максимальная скорость движения миниробота с требуемой точностью.

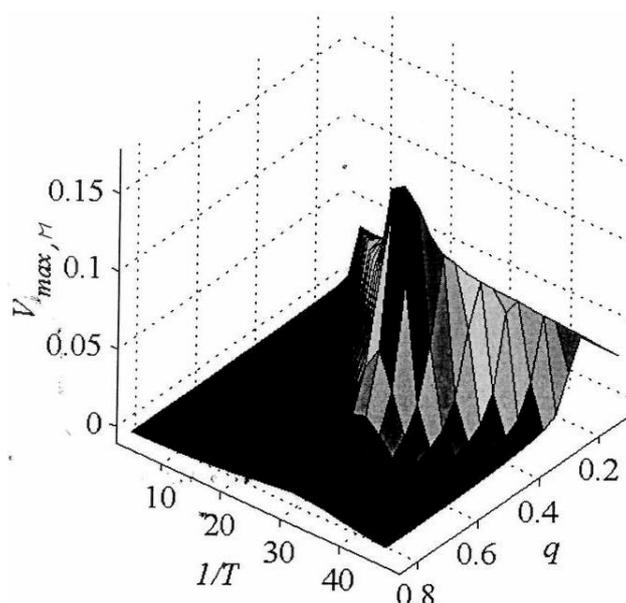


Рисунок 5 – Зависимость скорости робота от частоты внешних воздействий и протяженности импульса

### Заключение

Рассмотрены колебательные процессы, определяющие движение миниатюрных роботов в трубах малых диаметров.

Показано влияние вынужденных колебаний разных частот на функциональные характеристики миниатюрных внутритрубных роботов электромагнитного принципа действия с устройствами сцепления с внутренними поверхностями труб малых диаметров. Наибольшее внимание уделяется влиянию колебаний на скорости и ускорения движения.

1. В.Г. Градецкий, М.М. Князьков, Л.Ф. Фомин, В.Г. Чашухин. Механика миниатюрных роботов, - М.: Наука, 2010. – 271.
2. Madou M. Fundamentals of microfabrication . Boca Raton CRC press, 1997, 723p.
3. Чашухин В.Г. Исследование устройств сцепления с поверхностью мобильных роботов, имеющих адгезионные материалы на контактных площадках, М., 2008, 27 с. (Препринт ИПМех РАН, №861).
4. Sitti M. Micro- and nano-scale robotic // ASME Report / Carnegie Mellon University, Pittsburg, 2006, 8p.
5. Ильясов Г., Даринцев О., Мунасыпов Р. Основы микроробототехники. УФА. УГАТУ. 2004. 161с.
6. The MEMS Handbook. Edited by Mohamed Gad-el-Hak. Boca Raton CRC press, 2002, 17-59 p.
7. Wang Z., Appleton E. The concept and research of a pipe crawling rescue robot // Advanced Robotics. 2003. Vol. 17. N4. P. 339-358.
8. Suzumori Z., Wakimoto S., Takada M. A miniature inspection robot negotiating pipes of widely varying diameter // Proceedings of the 2003 IEEE International Conference of Robotics & Automation, Taipei, Taiwan, 2003, p. 2735-2740.
9. Antheierens C., Betemps M. Design and control of a pneumatic microrobot for in-pipe inspection of nuclear pipes // Journal of Mechatronics, 2001, vol. 1, N2, p. 155-174.

## INITIAL ESTIMATE EVALUATION METHODS IN 3D-SURFACE APPROXIMATION TASKS

*BMSTU, Moscow*

### Abstract

Iterative methods are frequently used in approximation tasks. Their convergence strongly depends on initial estimate. In this article some initial estimate evaluation methods based on geometry analysis of 3D-vision point set are compared. Evaluation results are then used to approximate source points with curvilinear surfaces.

*А.А. Пискарьев, Б.Б. Михайлов*

## МЕТОДЫ ОЦЕНКИ НАЧАЛЬНОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ В ЗАДАЧАХ АППРОКСИМАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

*МГТУ им. Н. Э. Баумана*

### Аннотация

В задачах аппроксимации часто используются итерационные методы, сходимость которых зависит от начального приближения. В этой статье сравниваются методы оценки начального приближения на основе геометрического анализа множества точек, полученных от системы объёмного зрения. Результаты оценки в дальнейшем используются для аппроксимации исходных точек криволинейными поверхностями.

Ключевые слова: Объёмное зрение, аппроксимация поверхностей, нелинейная оптимизация, аналитическая геометрия.

### Введение

Данная статья посвящена задаче описания криволинейных поверхностей с помощью системы объёмного зрения. Результатом работы СТЗ является набор точек с трехмерными координатами (облако). Одной из центральных задач является аппроксимация облака точек криволинейной поверхностью.

В процессе аппроксимации, как правило, используются численные методы оптимизации, позволяющие определить параметры поверхности, соответствующие наименьшему среднеквадратичному отклонению (далее СКО). При этом тип исследуемой поверхности должен быть известен. Также, поскольку используются итерационные методы, необходима оценка начальных значений параметров искомой поверхности, от которой зависит сходимость и производительность процедуры оптимизации.

Целью данной статьи является исследование различных методов оценки начального приближения параметров поверхности на основе множества точек, полученных от СТЗ.

### Постановка задачи

Рассмотрим трехмерное аффинное пространство с осями  $X, Y, Z$ , такое, что ось  $Z$  совпадает с оптической осью СТЗ. Точки СТЗ представлены множеством  $U$ , каждая из точек обозначается символом  $u$  и имеет координаты  $u_x, u_y, u_z$ ,  $i = \overline{1, N}$ . Существует параметрическое уравнение вида  $F_{c_1, \dots, c_M}(x, y, z) = 0$ , которое описывает поверхность в пространстве. Необходимо получить оценку параметров  $\tilde{c}_1, \dots, \tilde{c}_M$ , такую, что сумма квадратов расстояний  $r_{c_1, \dots, c_M}(u_x, u_y, u_z)$  от каждой точки  $u$  до поверхности, описываемой уравнением  $F_{\tilde{c}_1, \dots, \tilde{c}_M}(x, y, z) = 0$ , не превышает заданной величины.

### Описание алгоритмов

В статье рассматриваются следующие методы оценки начального приближения:

- предварительная аппроксимация случайного набора точек — небольшого количества точек, полученных случайной выборкой из исходных данных;
- предварительная аппроксимация точек в скользящем окне — небольшого количества точек,

попавших в заданную прямоугольную область;

- исследование взаимного расположения нормалей к плоскостям, полученным в результате аппроксимации части точек в разных участках сцены.

Методы опробованы на примере цилиндрической, сферической и конической поверхностей. Общий подход к задаче аппроксимации для всех методов одинаковый: выполняется оценка начального приближения для параметров сферы, цилиндра и конуса, далее выполняется аппроксимация точек соответствующей поверхностью с полученным начальным приближением, поверхность с наименьшим СКО считается наиболее подходящей для данного набора точек.

### Предварительная аппроксимация случайного набора точек

Во множестве  $U$  случайным образом выбирается подмножество  $U_0 = \{u^1, \dots, u^L\}$ , число  $L$  задано заранее и имеет величину порядка 10. Для множества  $U_0$  выполняется предварительная процедура аппроксимации с фиксированным начальным приближением.

Для того, чтобы минимизировать СКО, формулируется задача оптимизации: в качестве допустимого множества выбирается множество векторов параметров искомой поверхности  $C = \{(c_1, \dots, c_M)\}$ , ограниченное разумными величинами. В качестве целевой функции выбирается сумма квадратов расстояний от каждой точки до поверхности:

$$f(c_1, \dots, c_M) = \sum_{c_1, \dots, c_M} r_{c_1, \dots, c_M}(u_x^i, u_y^i, u_z^i).$$

Функция  $r_{c_1, \dots, c_M}(x, y, z)$  зависит от типа предполагаемой поверхности и определяет расстояние от точки с координатами  $(x, y, z)$  до поверхности, описываемой уравнением  $F_{c_1, \dots, c_M}(x, y, z) = 0$ . Для поиска оптимальных параметров  $c_1, \dots, c_M$  используется метод Нелдера-Мида.

Если процедура минимизации сходится к достаточно малому значению, полученные в результате параметры поверхности используются в качестве начального приближения. В противном случае итерация повторяется с новым набором точек.

### Предварительная аппроксимация точек в скользящем окне

На осях  $X$  и  $Y$  строятся отрезки  $[X^{min}, X^{max}]$  и  $[Y^{min}, Y^{max}]$ , где  $X^{min}, X^{max}, Y^{min}, Y^{max}$  - соответствующие минимальные и максимальные координаты точек множества  $U$ . Отрезки  $[X^{min}, X^{max}]$  и  $[Y^{min}, Y^{max}]$  разбиваются на  $K$  равных отрезков:  $[X^0, X^1], [X^1, X^2], \dots, [X^{K-1}, X^K]$  и  $[Y^{min}, Y^1], [Y^1, Y^2], \dots, [Y^{K-1}, Y^K]$  соответственно, при этом  $X^0 = X^{min}, X^K = X^{max}, Y^0 = Y^{min}, Y^K = Y^{max}$ . Таким образом, рабочая сцена СТЗ разбивается на прямоугольные области по осям, перпендикулярным оптической оси, а множество  $U$  разбивается на подмножества:

$$U^{i,j} = \{u \in U : u^x \in [X^{i-1}, X^i], u^y \in [Y^{j-1}, Y^j]\},$$

$$i = \overline{1, K}, j = \overline{1, K}$$

Для точек каждого подмножества  $U^{i,j}$ , подобно предыдущему методу, выполняется предварительная процедура аппроксимации, которая также сводится к задаче минимизации суммарного квадратичного отклонения:

$$f(c_1^{i,j}, \dots, c_M^{i,j}) = \sum_{c_1^{i,j}, \dots, c_M^{i,j}} r_{c_1^{i,j}, \dots, c_M^{i,j}}(u_x^k, u_y^k, u_z^k) \rightarrow \min.$$

Здесь  $N^{i,j}$  - количество точек в подмножестве  $U^{i,j}$ . После того, как найдены оптимальные параметры  $c_1^{i,j}, \dots, c_M^{i,j}$ , вычисляется СКО по всем точкам множества  $U$ :

$$f(c_1^{i,j}, \dots, c_M^{i,j}) = \sum_{c_1^{i,j}, \dots, c_M^{i,j}} r_{c_1^{i,j}, \dots, c_M^{i,j}}(u_x^i, u_y^i, u_z^i).$$

Далее среди найденных параметров  $c_1^{i,j}, \dots, c_M^{i,j}$  выбираются те, которые соответствуют минимальному значению СКО:

$$c_1^{min}, \dots, c_M^{min} : f(c_1^{min}, \dots, c_M^{min}) = \min_{i,j} f(c_1^{i,j}, \dots, c_M^{i,j}).$$

Если значение СКО достаточно мало, полученные параметры  $c_1^{min}, \dots, c_M^{min}$  являются искомым начальным приближением.

### Исследование взаимного расположения нормалей

По аналогии с предыдущим алгоритмом рабочая сцена СТЗ разбивается на прямоугольные области по направлениям, перпендикулярным оптической оси  $Z$ , а множество  $U$  разбивается на подмножества  $U^{i,j}$ . Точки каждого множества  $U^{i,j}$  аппроксимируются плоскостью с помощью метода наименьших квадратов:

$$z = A^{i,j}x + B^{i,j}y + C^{i,j}$$

Коэффициенты  $A^{i,j}, B^{i,j}, C^{i,j}$  вычисляются как решение следующей системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{i,j} \sum (u_x^k)^2 + B^{i,j} \sum u_x^k u_y^k + C^{i,j} \sum u_x^k = \sum u_x^k u_z^k \\ A_{i,j} \sum u_x^k u_y^k + B^{i,j} \sum (u_y^k)^2 + C^{i,j} \sum u_y^k = \sum u_y^k u_z^k \\ A_{i,j} \sum u_x^k + B^{i,j} \sum u_y^k + C^{i,j} K = \sum u_z^k \end{array} \right.$$

Через середину параллелограмма, образованного пересечением плоскости с границами области, строится прямая, направленная по нормали к плоскости:

$$\frac{x - \frac{X_i - X_{i-1}}{2}}{A^{i,j}} = \frac{y - \frac{Y_j - Y_{j-1}}{2}}{B^{i,j}} = \frac{z - A^{i,j} \frac{X_i - X_{i-1}}{2} - B^{i,j} \frac{Y_j - Y_{j-1}}{2} - C^{i,j}}{C^{i,j}}$$

Прямые (далее нормали) перебираются попарно, и для каждой пары исследуется их взаимное расположение.

Для оценки начальных параметров сферы вычисляются координаты равноудалённой от обеих нормалей точки: если она достаточно близка к нормальям, а расстояния от точки до соответствующих нормалей плоскостей отличаются незначительно, координаты точки являются начальным приближением для центра сферы, а расстояние от точки до одной из плоскостей — начальным приближением радиуса сферы (см. Рис. 1а).

Для оценки начальных параметров цилиндра вычисляются параметры перпендикулярной к обеим нормальям прямой. Если расстояние от прямой до соответствующих нормалей плоскостей отличается незначительно, параметры найденной прямой используются в качестве начального приближения для оси цилиндрической поверхности, а расстояние от оси до одной из плоскостей используется в качестве начального приближения радиуса цилиндра (см. Рис. 1б).

Для оценки начальных параметров конуса вычисляются параметры прямой, пересекающей обе нормали с выполнением следующих условий:

- углы между прямой и обеими нормальями равны;
- прямая пересекает плоскости, соответствующие нормальям, в одной общей точке.

Параметры найденной прямой используются в качестве начального приближения для параметров оси конической поверхности. В качестве начального приближения угла раствора конуса используется удвоенный угол между прямой и соответствующими нормальям плоскостями, в качестве начального приближения вершины конуса используется точка пересечения этих плоскостей и прямой (см. Рис. 1в).

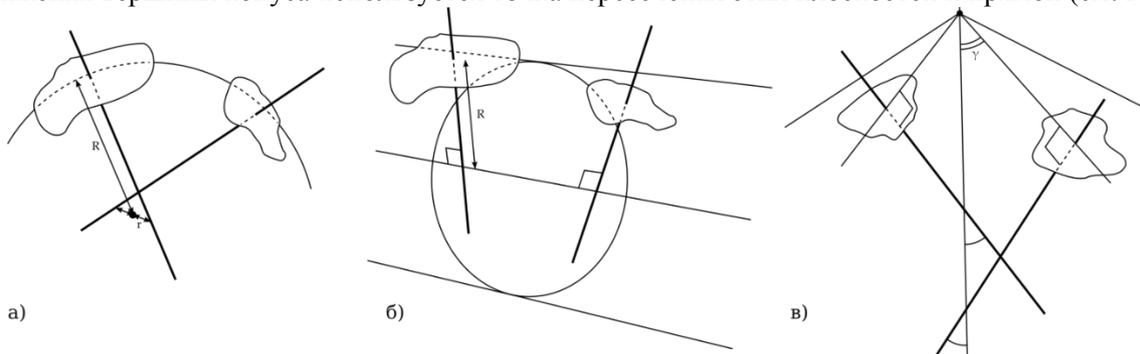


Рисунок 1 – Исследование взаимного расположения нормалей

### Результаты моделирования

Для проверки адекватности методов были смоделированы трехмерные сцены с точками, описывающими поверхности с имитацией работы СТЗ. Все методы были реализованы в виде программ на языке Python и опробованы на каждой из сцен.

Сцены различаются количеством и расположением посторонних по отношению к исследуемой поверхности предметов (неоднородностей): в сцене 1 их нет вообще; в сцене 2 присутствует небольшое количество мелких неоднородностей; в сцене 3 присутствует крупная, но компактно расположенная неоднородность, имитирующая конструкционный элемент или шов; в сцене 4 неоднородностей много, и они распределены по всему полю зрения СТЗ.

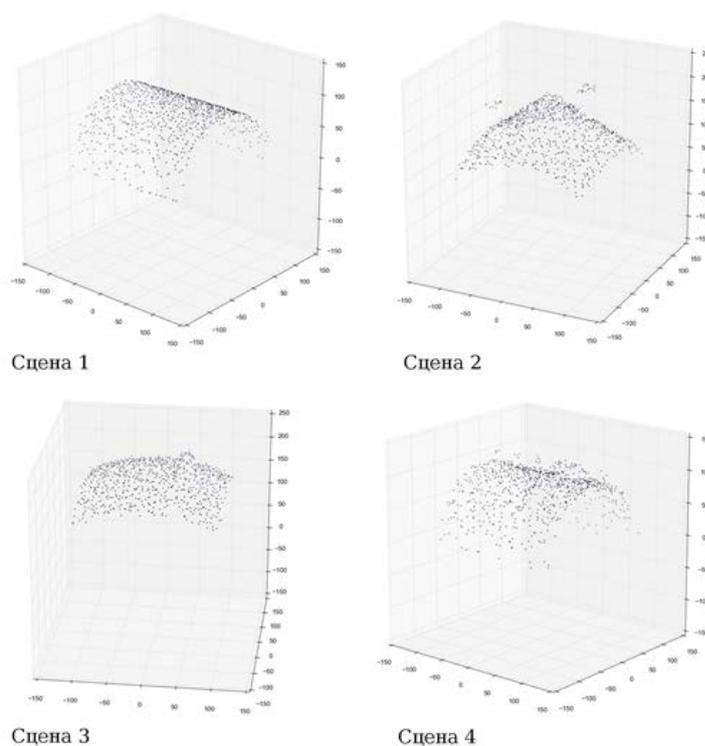


Рисунок 2 – Варианты размещения неоднородностей на исследуемых поверхностях

С помощью исследуемых методов были получены начальные приближения параметров поверхностей во всех сценах. Вычислены значения СКО для этих поверхностей и для поверхностей, полученных в результате аппроксимации, а также проверена сходимость процедуры аппроксимации. Полученные характеристики позволяют оценить работоспособность каждого метода в конкретной сцене. Результаты моделирования приведены в Таблице 1:

Таблица 1. Значения СКО и сходимость различных методов в зависимости от рабочей сцены

Метод	Параметр	Сцена 1	Сцена 2	Сцена 3	Сцена 4
Предварительная аппроксимация случайного набора точек	Начальное СКО	5,2	10,4	55,8	54,2
	Сходимость	есть	есть	нет	нет
	Конечное СКО	0,25	1,20	—	—
Предварительная аппроксимация точек в скользящем окне	Начальное СКО	10,4	15,5	10,2	44,8
	Сходимость	есть	есть	есть	нет
	Конечное СКО	0,26	1,18	1,27	—
Исследование взаимного расположения нормалей	Начальное СКО	8,3	25,3	15,6	16,4
	Сходимость	есть	есть	есть	есть
	Конечное СКО	0,25	1,23	1,24	1,36

### Заключение

По итогам проделанной работы можно заключить, что качество оценки начального приближения на основе данных СТЗ зависит от исследуемой сцены и присутствующих в ней неоднородностей. Метод предварительной аппроксимации случайного набора точек показал хорошие результаты для простых

сцен, где все или почти все точки принадлежат исследуемой поверхности. Метод предварительной аппроксимации точек в скользящем окне оказался наилучшим в сценах, где присутствуют компактно расположенные неоднородности. Метод исследования нормалей оказался работоспособным во всех сценах, но наиболее эффективен там, где неоднородности распределены по всему полю зрения. При этом реализация метода зависит от типа предполагаемой поверхности, что делает его менее универсальным.

1. Ильин В. А., Поздняк Э. Г. - Аналитическая геометрия: учебник для вузов - 5-е изд. - М.: Наука. Физматлит, 1999
2. Юревич В. И. - Основы робототехники - 2-е изд., перераб. и доп. - СПб.: БХВ-Петербург, 2005
3. Линник Ю. В. - Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений - 2-е изд. - М.: 1962
4. Володин Ю. С., Орлов А. В., Михайлов Б. Б. - Калибровка системы трехмерного зрения со структурной подсветкой при помощи плоских объектов - Труды международной конференции с элементами научной школы для молодежи - СПб: Политехника-сервис, 2010
5. Джонс М. Т. - Программирование искусственного интеллекта в приложениях. — М.: ДМК Пресс, 2004, С. 25—42.

*I.V. Vatamaniuk, A.I. Saveliev*

### **MOBILE ROBOTIC PLATFORM AS A COMPONENT OF CYBER-PHYSICAL SMART SPACE<sup>III</sup>**

*St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg  
vatamaniuk@ias.spb.su*

#### **Abstract**

The paper discusses configuration of a mobile robotic platform as a component of a cyber-physical smart space. A structural scheme of the cyber-physical system (CPS) MINOS is briefly overviewed. The components of the mobile robotic platform as well as the services provided to user are formally described. Some scenarios of user-CPS interaction via mobile robotic platform are discussed.

Keywords: cyber-physical system, multimodal interface, smart space, mobile robotic platform

*И.В. Ватаманюк, А.И. Савельев*

### **МОБИЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКАЯ ПЛАТФОРМА КАК КОМПОНЕНТ КИБЕРФИЗИЧЕСКОГО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ПРОСТРАНСТВА<sup>2</sup>**

*Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук,  
Санкт-Петербург, vatamaniuk@ias.spb.su*

#### **Аннотация**

В статье предложена конфигурация мобильной робототехнической платформы (МРП), являющейся элементом киберфизического интеллектуального пространства (КФП). Кратко описана структурная схема КФП МИНОС. Представлено формальное описание компонентов МРП и сервисов, предоставляемых пользователю, а также рассмотрены некоторые сценарии взаимодействия пользователя с киберфизическим пространством (КФП) посредством МРП.

Ключевые слова: киберфизические системы, многомодальные интерфейсы, интеллектуальное пространство, мобильная робототехническая платформа

#### **Введение**

Постоянное увеличение вычислительных мощностей современных технических средств в совокупности с удешевлением и упрощением производства электронных компонентов создали в последнее десятилетие благоприятную среду для стремительного развития технологии интеллектуальных пространств. Сегодня уже никого не удивить словосочетаниями «умный дом» (Smart Space), «интернет вещей» (Internet of Things), «беспроводные сенсорные сети» (Wireless sensor network) несмотря на то, что появились они не так давно. Так или иначе, все они представляют собой класс так называемых киберфизических систем (КФС), основной характеристикой которых является интеграция

вычислительных ресурсов в физические процессы для прогнозирования и адаптации к текущему состоянию среды, проактивного мониторинга, пассивного сбора и обработки больших массивов данных, персонализации предоставляемых пользователю сервисов [1, 2].

Концепция интеллектуального пространства, как помещения, оборудованного в соответствии с его назначением («умный дом», «умная теплица», «интеллектуальный зал совещаний»), позволяющего автоматизировать рутинные процессы или вовсе исключить необходимость управления человеком-оператором, ставит перед исследователями и разработчиками целый ряд задач на стыке разных областей, таких как человеко-машинное взаимодействие (Human-Machine Interaction), слияние данных (Data Fusion), распознавание образов (Pattern Recognition), и т.д. Основными проблемами проектирования интеллектуальных пространств остаются недостаточность данных, описывающих контекст взаимодействия и сложность его формализации, а также конфликт двух парадигм (ограниченность встроенных ресурсов на робототехнических платформах / негибкость стационарных вычислительных центров) [3]. Развитие беспроводных сетевых и облачных технологий позволяет частично устранить данную проблему. Кроме того, интеллектуализация пространства организации/предприятия/частного дома (и т.п.) требует индивидуального решения в каждом конкретном случае и с трудом масштабируется в виду различной конфигурации помещений и их технических характеристик. Вместе с тем, индивидуальный подход в каждом конкретном случае позволяет добиться более тонкой подстройки под предъявляемые к интеллектуальному пространству требования, а также обеспечить широкий спектр сервисов, подобранных в соответствии с непосредственными запросами пользователей.

Поскольку благодаря гибкой конфигурации интеллектуальных КФС практически невозможно перечислить все их возможности и области применения, рассмотрим некоторые подходы к реализации КФС, а также основные аспекты решаемых ими задач. В работе [4] предложены следующие области применения КФС:

- *технологии «умных» электросетей (Smart Grid Technologies)*: интеллектуальный мониторинг и управление электрооборудованием посредством цифровых контроллеров, делающие поставки электричества конечному пользователю надежным, безопасным и эффективным процессом;

- *беспроводные технологии «очувствления», мониторинга и сетевого взаимодействия (Wireless Sensing, Monitoring, and Networking)*: создание распределенных систем мониторинга многочисленных интеллектуальных датчиков и приводов, мобильных устройств, RFID-меток, роботов и т. д. Подобные системы характеризуются компактностью, точностью и масштабируемостью;

- *транспортные интеллектуальные системы (Vehicular Cyber-Physical and Intelligent Transportation Systems)*: интеграция вычислительных и коммуникационных мощностей с управлением транспортными средствами для решения задач безопасной и эффективной логистики;

- *интеллектуальные технологии для жизни (Smart Living Technologies)*: технологии, обеспечивающие безопасность, комфорт, экологичность проживания в масштабах дома, города (Smart City), включая системы здравоохранения и т.д.

### **Обзор существующих решений**

Ограничимся рассмотрением внедрения технологий КФС в рамках создания интерактивных информационных сред. Концептуальная и формальная модели киберфизического интеллектуального пространства (КФИ) предложены в работе [5]. Авторами данной работы предложен подход к распределению сенсорных, сетевых, вычислительных, информационно-управляющих и сервисных задач между компонентами КФС: мобильными роботами, встроенными устройствами, мобильными клиентскими устройствами, стационарным сервисным оборудованием, облачными вычислительными и информационными ресурсами. Данный подход основан на синтезе системы распределения задач многомодального взаимодействия пользователей с мобильными роботами и другими устройствами КФС. Предложенная авторами динамическая интерпретация задач структурно-функционально-параметрического синтеза КФС позволяет подойти к их решению с точки зрения теории управления сложными логико-динамическими объектами с перестраиваемой структурой.

В работе [6] авторы развивают подход к созданию киберфизических систем, основанный на обмене информацией через онтолого-ориентированное интеллектуальное пространство, а также на разработке/верификации отдельных сервисов интеллектуального пространства на базе формализма гибридных автоматов. Использование онтологического описания для взаимодействующих сервисов обеспечивает их децентрализацию и интероперабельность. Описание элементов системы с помощью гибридных автоматов позволяет реализовать концепцию разработки, управляемой моделями (Model-

Driven Development) применительно к распределенным киберфизическим системам, функционирующим на основе интеллектуальных пространств.

В работе [7] рассмотрены аспекты разработки и внедрения автоматизированных систем видеосъемки мероприятий в интеллектуальном пространстве. Авторами предложена система мониторинга участников мероприятия, позволяющая автоматизировать управление оборудованием (камеры, микрофоны, освещение, проектор, и т.д.), процесс регистрации участников и процесс аудио- и видеосъемки, а также ненавязчиво сформировать персональные профили пользователей [8]. Данный интеллектуальный зал вмещает до 42 участников, он предусматривает возможность проведения распределенных совещаний с подключением удаленных участников, а также представляет собой удобный инструмент для накопления и последующего анализа данных об активности пользователей.

Внедрение мобильных робототехнических платформ (МРП) в КФС позволяет существенно расширить как гибкость КФС, так и возможности МРП, в частности, предлагаемые пользователю сервисы. К примеру, появляется возможность перенести трудоемкие вычисления с робототехнической платформы (которая, как правило, обладает ограниченными вычислительными и информационными ресурсами) на удаленный сервер. Кроме того, использование МРП расширяет функциональность интеллектуального пространства и открывает путь для составления множества роботизированных сервисов с тремя функциями: семантическое восприятие, осмысление контекста и приведение в действие соответствующего ему сценария [9]. Особую роль в такой системе играют облачные технологии, дающие существенное преимущество роботам, внедренным в КФС, перед автономными роботами [10].

### Структура многомодальной информационно-навигационной облачной системы

Рассмотрим структуру корпоративного КФС на примере многомодальной информационно-навигационной облачной системы (МИНОС) [11]. На рисунке 1 представлены основные компоненты системы.



Рисунок 1 – Структура МИНОС

Основными компонентами МИНОС являются:

- система корпоративного телевидения [12], позволяющая выводить актуальную информацию в соответствии с календарем событий как на мониторы, расположенные в организации, так и на мобильные устройства пользователей;
- система автоматизации оборудования, отвечающая за видеомониторинг и сохранение электроэнергии;
- система видеоконференцсвязи, предназначенная для коммуникации зарегистрированных в системе удаленных пользователей [13-14];
- система регистрации и идентификации пользователей, позволяющая как персонифицировать сервисы в соответствии с профилем пользователя, так и обнаружить нарушение режима безопасности организации;
- система навигации пользователя внутри помещений организации, предоставляющая в распоряжение пользователя трехмерную карту организации с возможностью проложить маршрут к интересующему его объекту, а также сервис сопровождения МРП.

### Конфигурация МРП в рамках МИНОС

Опишем конфигурацию мобильной робототехнической платформы  $MRP$ , функционирующей в КФП МИНОС (рис. 2):

$$MRP = \langle H, S, SRV \rangle,$$

где  $H = \langle M, T \rangle$  - аппаратное обеспечение, включающее:

$M = \{m_i, i \in N\}$ ,  $N = \{1, \dots, n\}$  – оборудование подвижной части платформы (двигатели, плата управления, датчики расстояния, система заряда и питания, сетевое оборудование),

$T = \{m_j, j \in C\}$ ,  $C = \{1, \dots, c\}$  – терминал, включающий камеру, микрофон, устройство вывода звука и сенсорный экран для взаимодействия с пользователем;

$S = \{S_{dist}, S_{mot}, S_{pow}, S_{CPS}, S_U, S_{cam}, S_{mic}, S_{INT}\}$  – программное обеспечение, включающее следующие модули:

$S_{dist}$  – блок обработки информации датчиков расстояния и одометрии,

$S_{mot}$  – блок управления движением,

$S_{pow}$  – блок управления питанием,

$S_{CPS}$  – блок коммуникации с КФП (посредством проводной или беспроводной связи),

$S_U = \{S_U^{pref}, S_U^{loc}, S_U^{act}, S_U^{stat}\}$  – блок обработки информации о пользователе, включающий:

$S_U^{pref}$  – учет предпочтений пользователей,

$S_U^{loc}$  – последнее зарегистрированное местоположение пользователя,

$S_U^{act}$  – последние действия пользователя в КФП,

$S_U^{stat}$  – психофизическое и эмоциональное состояние пользователя;

$S_{cam}, S_{mic}$  – блоки обработки данных, поступающих с камеры и микрофона, включая:

$S_{spch}$  – блок распознавания речи,

$S_{face}$  – блок распознавания лиц,

$S_{INT}$  - блок взаимодействия с пользователем, включающий:

$S_{INF}$  – блок поиска необходимой информации,

$S_{TV}$  – блок корпоративного телевидения,

$S_{VC}$  – блок видеоконференцсвязи,

$S_{esc}$  – блок навигации и сопровождения пользователя;

$SRV = \{SRV_{INF}, SRV_{TV}, SRV_{VC}, SRV_{esc}\}$  – сервисы, предоставляемые пользователю, включая:

$SRV_{INF}$  – поиск необходимой информации,

$SRV_{TV}$  – показ корпоративного телевидения,

$SRV_{VC}$  – видеоконференцсвязь,

$SRV_{esc}$  – навигация и сопровождение пользователя.

МРП, работающая в интеллектуальном пространстве МИНОС, может предложить пользователю следующие сервисы [15]: в отсутствие каких-либо активных действий со стороны пользователя, в то время, пока он находится в пределах видимости МРП, но не в активной зоне  $D_{act}$  (расстояние от МРП до конца активной зоны  $d_{act}$ ), на экране МРП отображаются слайды корпоративного телевидения. В случае, если пользователь идентифицирован и имеется достаточно информации о его предпочтениях, показ слайдов может быть персонифицирован. Как правило, пользователь уже был идентифицирован и локализован другими средствами КФП, поэтому информация о профиле пользователя передается МРП от КФП.



Рисунок 2 – Структура МРП

В случае, если пользователь подходит к МРП на расстояние  $d \leq d_{act}$ , на экране отображается меню, предлагающее пользователю:

- 1) продолжить показ слайдов;
- 2) найти интересующую его информацию об организации;
- 3) воспользоваться видеоконференцсвязью;
- 4) показать на интерактивном плане организации интересующее пользователя помещение;
- 5) сопроводить пользователя к интересующему его помещению.

Выбрать соответствующий пункт меню пользователь может посредством голосового управления либо при помощи сенсорного экрана. В случае бездействия пользователя МРП переходит в режим показа слайдов. В случае присутствия в  $D_{act}$  двух и более пользователей, МРП выбирает для дальнейшего взаимодействия ближайшего к ней пользователя (на основании алгоритма детектирования лиц оцениваются размеры области лиц пользователей относительно размера кадра [16]. Ближайшим к МРП считается пользователь, размер области лица которого наибольший).

Информация о выборе пользователя и его поведении передается в модуль обработки профилей пользователей МИНОС с целью анализа его активности (что предусматривает не только возможность персонализации сервисов для данного пользователя, но и проверку режима безопасности, в случае, если, к примеру, он был зарегистрирован системой видеомониторинга в другом месте в это же время).

### Заключение

Предложенная в статье обобщенная структура и формализованное описание МРП разработаны для интеграции МРП в КФС МИНОС, однако могут быть легко модифицированы под конкретные требования других КФС. Ввиду этого факта, а также ограниченного формата статьи, автором не делался упор на строгое описание аппаратной части. Предлагаемая МРП является модульной, предполагает событийно-ориентированное управление и может быть использована не только в рамках КФС, но и, к примеру, в роевой робототехнике. Исследование выполнено при поддержке РНФ (грант №16-19-00044).

1. Ronzhin A., Saveliev A., Basov O., Solyonyj S. Conceptual Model of Cyberphysical Environment Based on Collaborative Work of Distributed Means and Mobile Robots // Lecture Notes in Computer Science. 2016. vol. 9812. pp. 32-39.
2. Lee J., Bagheri B., Kao H. A. A Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0-Based Manufacturing Systems // Manufacturing Letters. 2015. vol. 3. pp. 18-23.
3. Ронжин А.Л. Математические модели и средства многомодального интерактивного взаимодействия с робототехническими и киберфизическими системами // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. 2016. № 11 (93). С. 64-71.

4. Stojmenovic I. Machine-to-machine communications with in-network data aggregation, processing, and actuation for large-scale cyber-physical systems // *IEEE Internet of Things Journal*. 2014. vol. 1. no. 2. pp. 122-128.
5. Ронжин А.Л., Басов О.О., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Концептуальная и формальная модели синтеза киберфизических систем и интеллектуальных пространств // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2016. Т. 59. № 11. С. 897-905.
6. Кашевник А.М., Пономарев А.В., Савосин С.В. Управление гибридными системами на основе технологии интеллектуальных пространств // *Труды СПИИРАН*. 2014. № 4 (35). С. 212-226.
7. Ронжин А. Л., Ронжин А. Л. Система аудиовизуального мониторинга участников совещания в интеллектуальном зале // *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники*. 2011. №. 1 (23). С. 153-157.
8. Ронжин А. Л., Будков В. Ю., Ронжин А. Л. Формирование профиля пользователя на основе аудиовизуального анализа ситуации в интеллектуальном зале совещаний // *Труды СПИИРАН*. 2012. Т. 4. №. 23. С. 482-494.
9. Smirnov, A., Kashevnik, A., Mikhailov, S., Mironov, M., Petrov, M. Smart M3-Based Robot Interaction Scenario for Coalition Work // *International Conference on Interactive Collaborative Robotics*. Springer International Publishing, 2016. pp. 199-207.
10. Chibani, A., Amirat, Y., Mohammed, S., Matson, E., Hagita, N., Barreto, M. Ubiquitous robotics: Recent challenges and future trends // *Robotics and Autonomous Systems*. 2013. vol. 61. no. 11. pp. 1162-1172.
11. Левоневский Д.К., Ватаманюк И.В., Савельев А.И. Многомодальная информационно-навигационная облачная система МИНОС для корпоративного киберфизического интеллектуального пространства // *Программная инженерия*. 2017. Т. 8. № 3. С. 120-128.
12. Левоневский Д.К., Ватаманюк И.В., Савельев А.И., Денисов А.В. Корпоративная информационная система обслуживания пользователей как компонент киберфизического интеллектуального пространства // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2016. Т. 59. № 11. С. 906-912.
13. Савельев А.И., Соменков Н.В. Архитектура клиентской части пирингового приложения видеоконференцсвязи // *Математические методы в технике и технологиях - ММТТ*. 2016. № 9 (91). С. 176-179.
14. Saveliev A.I., Ronzhin A.L. Algorithms and Software Tools for Distribution of Multimedia Data Streams in Client-Server Videoconferencing Applications // *Pattern Recognition and Image Analysis (Advances in Mathematical Theory and Applications)*. 2015. vol. 25. no 3. pp. 517-525.
15. Vatamaniuk I., Levonevskiy D., Saveliev A., Denisov A. Scenarios of Multimodal Information Navigation Services for Users in Cyberphysical Environment // *Lecture Notes in Computer Science*. 2016. vol. 9811. pp. 588-595.
16. Ronzhin A., Vatamaniuk I., Železný M. Algorithms for Acceleration of Image Processing at Automatic Registration of Meeting Participants // *Lecture Notes in Computer Science*. 2014. vol. 8773. pp. 89-96.

*O.M. Kapustina*

## **AN ANALYTICAL SOLUTION OF THE INVERSE KINEMATICS PROBLEM OF KUKA YUBOT, PARAMETERIZED BY GENERALIZED COORDINATES OF ITS PLATFORM<sup>IV</sup>**

*National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow,  
KapustinaOM@mpei.ru*

### Annotation

For motions planning and in the process of robots control, it is required to solve the inverse kinematics problem. This task for the kinematically redundant mobile manipulator KUKA youBot has infinitely many solutions that can be represented in an exact analytical form. In this paper all analytical solutions of the inverse kinematics problem of the robot are found that take into account the plane motion of the platform. Any two generalized coordinates of a mobile platform are used as parameters, specifying which one can obtain certain subsets of solutions and choose solutions that satisfy the necessary criteria. Mathematical modeling is implemented in the Mathematica system. The results are confirmed by experiments on a real robot, photos of which are presented in the work. The used approaches can be applied to solve the inverse kinematics problems of the various mobile manipulators.

Keywords: analytical solution of the inverse kinematics problem, mobile manipulator, KUKA youBot.

## Introduction

For kinematically redundant mechanisms, the inverse kinematics problem is undefined, since the number of equations is less than the number of generalized coordinates to be determined [1, 2]. When planning the motions and control the robot, it is important to know all the solutions of this problem and be able to choose individual solutions. Numerical methods find only some of them. The analytical solution does not exist for all robot models.

Here a robot KUKA youBot [3] is considered, which is a controlled platform carrying five-axis manipulator with a gripper on the end of the arm. Mecanum wheels provide the possibility of omnidirectional motion of the platform. The open software of the robot makes it possible to widely use it in research and education.

In [4], an algorithm for obtaining an exact analytical solution to the inverse kinematics problem KUKA youBot taking into account the mobility of the platform is presented. For the selection of individual solutions, three "redundancy parameters" are suggested: the linear and angular coordinate of the position and orientation of the platform relative to the end-effector and the parameter determining the orientation of the third joint ("elbow") relative to the links. In [5] the exact solution of the inverse kinematics problem is obtained for the arm of KUKA youBot without taking into account the mobility of the platform.

In a number of problems, for example, in the task of control a mobile robot in the process of opening drawers [6] in the presence of obstacles, it is necessary to solve the inverse kinematics problem, assuming that the position and orientation of the platform is known in absolute space. In this case, one can use the results of [7], where it is shown that the set of parameters that determine the individual solutions of the kinematics inverse problem KUKA youBot, taking into account the mobility of the platform, is not the only one. These parameters can be any two of three generalized coordinates of the platform in the plane.

Formulas of the exact analytical solution of the inverse kinematics problem KUKA youBot which depend on any two general coordinates of the platform are presented further. An example of calculating exact solutions using Mathematica [8] is considered. Experiments in which the real robot KUKA youBot was exposed in the configurations corresponding to the solutions found in the example, confirmed the correctness of the results.

**The solution of the inverse kinematics problem KUKA youBot.** The mobile manipulator KUKA youBot in Figure 1 consists of five links, connected by revolute joints to the platform and to each other. Link 1 is a rigid body rotating around the vertical axis  $C_1Z_1$ , the point  $C_1$  belongs to the base of the platform, links 2, 3, 4 are rods that rotate about the horizontal axes passing through points  $C_2, C_3, C_4$ , respectively. The link 5 is a rigid body, the palm (the segment of the axis  $C_5z$ ), rotates around the axis  $C_5z$ , which is directed along the link 4. The gripper of the manipulator in the form of two fingers that can be moved translationally relative to link 5 is connected to link 5 at point  $C'_5$ , point  $E$  on the axis  $C_5z$  is the endpoint of the gripper with closed fingers. The platform is a rigid body with a horizontal plane top base, moving along a fixed horizontal plane with the help of four mecanum wheels. The links 1 – 4 and the axis of rotation of the link 5 are located in one vertical plane.

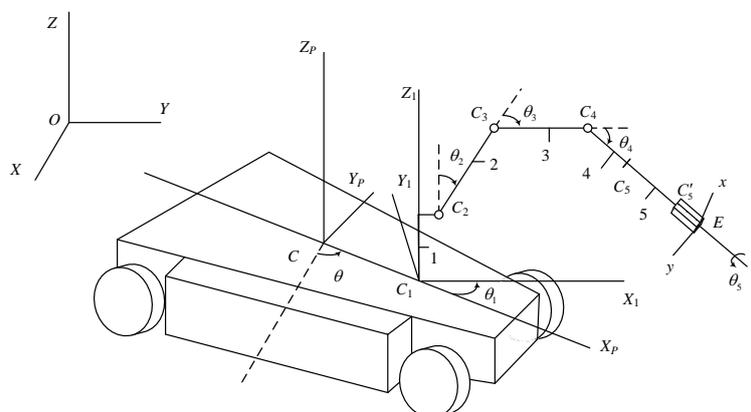


Figure 1 – Scheme of the mobile manipulator KUKA youBot

We introduce coordinate systems:  $OXYZ$  – fixed, absolute, the  $OZ$  axis is vertical, the  $OXY$  plane coincides with the platform's upper base;  $CX_pY_pZ_p$  – rigidly connected to the platform,  $C$  – the point of the platform's upper base, the  $CZ_p$  axis is vertical;  $Exyz$  – rigidly connected with the gripper, rotates around the axis  $C_5z$ ;  $C_1X_1Y_1Z_1$  –

rotates around the vertical axis  $C_1Z_1$  together with the link 1, the axis  $C_1X_1$  is directed from the axis  $C_1Z_1$  to the projection of the point  $C_2$  on the plane  $OXY$ .

We denote:  $h$  – the distance between points  $C$  and  $C_1$ ;  $a_1$  – distance between the point  $C_1$  and the projection of the point  $C_2$  on the horizontal plane;  $d_1$  – distance between the point  $C_1$  and the projection of the point  $C_2$  on the axis  $C_1Z_1$ ,  $a_2 = |\overline{C_2C_3}|$ ,  $a_3 = |\overline{C_3C_4}|$ ,  $a_4 = |\overline{C_4C_5}|$ ,  $a_5 = |\overline{C_5C'}|$ ,  $a_6 = |\overline{C_5E}|$ . Here and below, the vectors are denoted by a straight line placed above the name of a vector or boldface upright font. We denote matrices by the same font.

The position and orientation of the platform and the arms are defined by the generalized coordinates  $X_C, Y_C, \theta, \theta_i, i=1-5$ ,  $X_C, Y_C$  – the coordinates of the point  $C$  relative to  $OX, OY$ ,  $\theta$  – the angle between  $OX$  and  $CX_P$ ,  $\theta_1$  – the angle between  $CX_P$  and  $C_1X_1$ ,  $\theta_2$  – the angle from  $C_1Z_1$  to  $\overline{C_2C_3}$ ,  $\theta_3$  – the angle from  $\overline{C_2C_3}$  to  $\overline{C_3C_4}$ ,  $\theta_4$  – the angle from  $\overline{C_3C_4}$  to  $\overline{C_4C_5}$ ,  $\theta_5$  – the angle of rotation of the link 5 around  $C_5z$ .

In the planes  $OXY, C_1X_1Z_1, Exy$  for the positive direction of the angular measurement, we take the counterclockwise direction if we look from the ends of the axes  $OZ, C_1Y_1, C_5z$ , respectively.

We assume that the transition matrix

$$\mathbf{R} = (r_{ij}), i=1-3, j=1-3,$$

from the basis of the  $OXYZ$  coordinate system to the basis of the  $Exyz$  coordinate system is known, as well as the coordinates  $X_E, Y_E, Z_E$  of the point  $E$  with respect to  $OXYZ$ . The coordinates  $X_E, Y_E, Z_E$  and three independent parameters defining  $\mathbf{R}$  will be called the end-effector pose (EP).

The angles  $\theta_i, i=1-5$ , can be expressed in terms of EP and the generalized coordinates of the platform.

The EP determine the position of the point  $C_4$  with respect to  $OXYZ$ :

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{C_4} &= (X_{C_4} \ Y_{C_4} \ Z_{C_4})^T = \mathbf{r}_E - \overline{C_4E}, \\ \overline{C_4E} &= |\overline{C_4E}| \mathbf{k}, \end{aligned} \quad (1)$$

$\mathbf{r}_{C_4}, X_{C_4}, Y_{C_4}, Z_{C_4}$  – the radius vector and the coordinates of the point  $C_4$  with respect to  $OXYZ$  respectively,

$T$  – the transpose sign,  $|\overline{C_4E}| = a_4 + a_5 + a_6$ ,  $\mathbf{k}$  – the unit vector of  $Ez$  axis.

Since  $\mathbf{k}$  is in  $C_1X_1Z_1$  plane, then

$$\theta + \theta_1 = \text{ATAN}2(r_{23}, r_{13}), \quad (2)$$

if  $r_{13}, r_{23}$  not equal to zero at the same time. Otherwise ( $\mathbf{k}$  is vertical), the angle  $\theta + \theta_1$  is not determined by the EP and can take arbitrary values.

Equation (2) has two solutions with respect to  $\theta_1$  (possibly not satisfying technical constraints):

$$\begin{aligned} \theta_1^{(1)} &= \text{ATAN}2(r_{23}, r_{13}) - \theta, \\ \theta_1^{(2)} &= \text{ATAN}2(r_{23}, r_{13}) - \theta - \pi. \end{aligned} \quad (3)$$

The coordinates  $X_{1C_4}, Y_{1C_4}, Z_{1C_4}$  of the point  $C_4$  relative to  $C_1X_1Y_1Z_1$  are expressed in terms of the coordinates of the platform and the coordinates  $X_{C_4}, Y_{C_4}, Z_{C_4}$  by the relations

$$\begin{aligned} X_{1C_4} &= (X_{C_4} - X_C) \cos(\theta + \theta_1) + (Y_{C_4} - Y_C) \sin(\theta + \theta_1) - h \cos(\theta_1), \\ Y_{1C_4} &= 0, \\ Z_{1C_4} &= Z_{C_4}. \end{aligned} \quad (4)$$

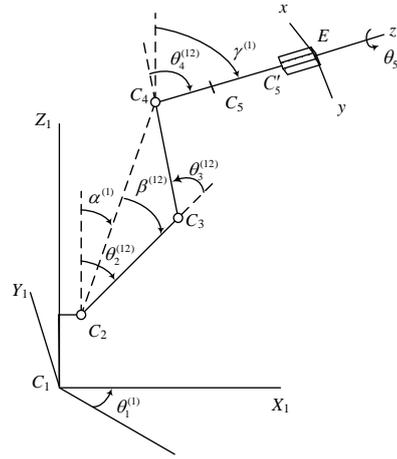
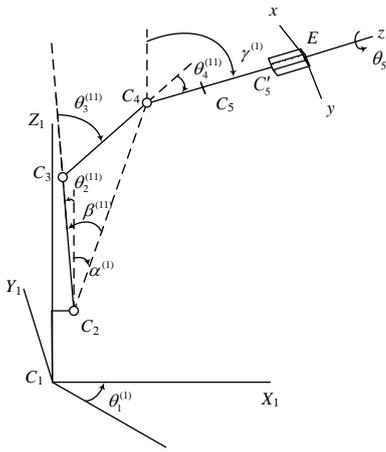


Figure 2 – The scheme of the arm with  $\theta_1^{(1)}, \beta^{(11)}$  Figure 3 – The scheme of the arm with  $\theta_1^{(1)}, \beta^{(12)}$

Solving the triangles in Figures 2, 3, we find

$$\theta_2^{(ij)} = \alpha^{(i)} + \beta^{(ij)},$$

$$\alpha^{(i)} = \text{ATAN2}\left(X_{1C_4} \Big|_{\theta_1=\theta_1^{(i)}} - a_1, Z_{1C_4} - d_1\right),$$

$$\beta^{(ij)} = \text{ATAN2}\left(\sin \beta^{(ij)}, \cos \beta^{(ij)}\right), \cos \beta^{(ij)} = \frac{(u^{(i)})^2 + a_2^2 - a_3^2}{2u^{(i)}a_2}, \sin \beta^{(ij)} = (-1)^{(j)} \sqrt{1 - \cos^2 \beta^{(ij)}},$$

$$u^{(i)} = \left| \overline{C_2 C_4} \Big|_{\theta_1=\theta_1^{(i)}} = \sqrt{\left(X_{1C_4} \Big|_{\theta_1=\theta_1^{(i)}} - a_1\right)^2 + \left(Z_{1C_4} - d_1\right)^2}, \quad (5)$$

$$\theta_3^{(ij)} = \text{ATAN2}\left(\sin \theta_3^{(ij)}, \cos \theta_3^{(ij)}\right), \cos \theta_3^{(ij)} = \frac{(u^{(i)})^2 - a_2^2 - a_3^2}{2a_2a_3}, \sin \theta_3^{(ij)} = (-1)^{(j-1)} \sqrt{1 - \cos^2 \theta_3^{(ij)}},$$

$$\theta_4^{(ij)} = \gamma^{(i)} - \theta_2^{(ij)} - \theta_3^{(ij)}, \gamma^{(i)} = \text{ATAN2}\left((-1)^{(i-1)} \sqrt{r_{13}^2 + r_{23}^2}, r_{33}\right), i=1,2, j=1,2,$$

$\alpha^{(i)}, i=1,2$ , – the angles between  $C_1Z_1$  and  $\overline{C_2C_4}$ ,  $\beta^{(ij)}, j=1,2$ , – the angles between  $\overline{C_2C_4}$  and  $\overline{C_2C_3}$ , corresponding to solutions  $\theta_1^{(i)}, i=1,2$ , respectively.

For finding  $\theta_5$ , we define a coordinate system  $EX_1'Y_1'Z_1', EX_1'' \parallel C_1X_1, EY_1' \parallel C_1Y_1, EZ_1' \parallel C_1Z_1$  at the point  $E$ . We compatible the axis  $EZ_1'$  with the axis  $Ez$  by rotating through an angle  $\gamma^{(j)}, j=1,2$ , around the axis  $EY_1'$ , in this case  $EX_1'$  goes to  $EX_1''$ . The angle  $\theta_5$  measured from the axis  $EX_1''$  is:

$$\theta_5^{(i)} = \text{ATAN2}\left[(-1)^{i-1}(-r_{23}r_{11} + r_{13}r_{21}), (-1)^{i-1}(-r_{23}r_{12} + r_{13}r_{22})\right], i=1,2. \quad (6)$$

Equations (1) – (6) define four solutions  $\theta_i, i=1-5$ , as EP and the platform coordinates functions. To determine one of the solutions, it is necessary to choose  $\theta_1^{(i)}, i=1,2$ , in (3) and set the sign of  $\sin \beta^{(ij)}, i=1,2, j=1,2$ , in (5).

The equation connecting the EP and the generalized coordinates of the platform, we obtain [9] from the equation of the horizontal line coinciding with the axis  $C_1X_1$ ,

$$\frac{X_C + h \cos \theta - X_E}{r_{13}} = \frac{Y_C + h \sin \theta - Y_E}{r_{23}}. \quad (7)$$

From (1) – (7) it is seen that any two generalized coordinates of the platform can be taken as free parameters, and the remaining third coordinate of the platform depends on them by (7).

Thus, there are infinitely many solutions of the inverse kinematics problem KUKA youBot, which can be obtained by specifying any two generalized coordinates of the platform. We do not consider here the question of the sets of values of these coordinates that ensure the existence of real solutions of the inverse kinematics problem and the satisfaction the conditions of technical restrictions on numerical values  $\theta_i, i=1-5$ .

**Example.** Using Mathematica programs [8] we find four solutions of the inverse kinematics problem for arbitrary fixed values of EP and arbitrary values of any two general coordinates of the platform, for example,  $X_C, \theta$ . The orientation of  $Exyz$  with respect to  $OXYZ$  is given by the Euler angles  $\psi, \theta_E, \varphi$ .

According to the technical description of KUKA youBot [4]:  $h=151$  mm,  $d_1=147$  mm,  $a_1=33$  mm,  $a_2=155$  mm,  $a_3=135$  mm,  $a_4=81$  mm,  $a_5=90$  mm,  $a_6=47$  mm.

Let:  $\psi=189,36^\circ$ ,  $\theta_E=42,48^\circ$ ,  $\varphi=5,73^\circ$ ,  $X_E=150$  mm,  $Y_E=-208$  mm,  $Z_E=526$  mm,

$$X_C=287,83 \text{ mm}, \theta=126,024^\circ. \quad (8)$$

By carrying out calculations according to (1) – (7), we find:

$$Y_C = -627,533 \text{ mm}, \theta_1^{(1)} = -26,664^\circ, \theta_2^{(11)} = 0,714^\circ, \theta_3^{(11)} = 61,358^\circ, \theta_4^{(11)} = -19,59^\circ, \theta_5^{(1)} = 95,73^\circ, \quad (9)$$

$$Y_C = -627,533 \text{ mm}, \theta_1^{(1)} = -26,664^\circ, \theta_2^{(12)} = 57,384^\circ, \theta_3^{(12)} = -61,358^\circ, \theta_4^{(12)} = 46,455^\circ, \theta_5^{(1)} = 95,73^\circ, \quad (10)$$

$$Y_C = -627,533 \text{ mm}, \theta_1^{(2)} = 153,336^\circ, \theta_2^{(21)} = -47,628^\circ, \theta_3^{(21)} = 15,051^\circ, \theta_4^{(21)} = -9,9^\circ, \theta_5^{(2)} = -84,27^\circ, \quad (11)$$

$$Y_C = -627,533 \text{ mm}, \theta_1^{(2)} = 153,336^\circ, \theta_2^{(22)} = -33,621^\circ, \theta_3^{(22)} = -15,051^\circ, \theta_4^{(22)} = 6,191^\circ, \theta_5^{(2)} = -84,27^\circ. \quad (12)$$



Figure 4 – Robot in configuration (8), (9)



Figure 5 – Robot in configuration (8), (10)



Figure 6 – Robot in configuration (8), (11)



Figure 7 – Robot in configuration (8), (12)

With the help of the program in C language, KUKA youBot was exposed in the found configurations. Figures 4 – 7 show photos of the robot in configurations (8), (9) – (12).

**Conclusion.** The obtained exact analytical solution of the inverse kinematics problem KUKA youBot can be used in the analysis of various theoretical and practical problems of control. The method of parameterization of the solution by generalized coordinates of the platform is applicable to other types of mobile robots.

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research in the framework of the scientific project No. 16-01-00429.

1. Zenkevich S.L., Yushchenko A.S. *Osnovy upravleniya manipulyatsionnymi robotami* [Fundamentals of manipulation robots control]. Moscow, Izdatelstvo MGTU im. N.E. Baumana Publ, 2004.
2. Springer Handbook of Robotics, ed. by Siciliano B., Khatib O., Springer, Berlin, Heidelberg, 2008.
3. <http://www.youbot-store.com/>
4. Sharma S., Kraetzschmar G., Scheurer C. Unified Closed Form Inverse Kinematics for the KUKA youBot . Proceedings of ROBOTIK . 7-th German Conference on Robotics, 2012, pp. 1-6.
5. Brandstätter M., Angerer A., Hofbauer M. An Analytical Solution of the Inverse Kinematics Problem of Industrial Serial Manipulators with an Ortho-parallel Basis and a Spherical Wrist . Proceedings of the Austrian Robotics Workshop, 2014, pp. 7-11.
6. Kapustina O.M. Description of the set of exact solutions of the inverse kinematics problem of the robot KUKA youBot with the help of the generalized coordinates of its platform. *Yestestvennyye i tekhnicheskiye nauki* [Natural and technical sciences], 2016, no 12, pp. 176-180. (in Russian)
7. Pin, F.G., Culioli, J.C. Optimal Positioning of Combined Mobile Platform-Manipulator Systems for Material Handling Tasks. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 6, Numbers 2-3, pp. 165-182, 1992.
8. Kapustina O.M. The program for calculating the exact solution of the inverse kinematics problem KUKA youBot [Programma dlya raschota tochnogo resheniya obratnoy zadachi kinematiki KUKA youBot]. Certificate of state registration of the computer program No. 2017612009, Federal Service for Intellectual Property (Rospatent), 14.02.2017.

*О.М. Капустина*

#### **АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ КИНЕМАТИКИ КУКА YOUBOT, ПАРАМЕТРИЗОВАННОЕ ОБОБЩЁННЫМИ КООРДИНАТАМИ ЕГО ПЛАТФОРМЫ<sup>4</sup>**

*Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”, Москва,  
KapustinaOM@mpei.ru*

##### **Аннотация**

При планировании движений и в процессе управления роботами требуется решать обратную задачу кинематики. Эта задача для кинематически избыточного мобильного манипулятора KUKA youBot имеет бесконечно много решений, которые могут быть представлены в точной аналитической форме. В работе построено учитывающее плоское движение платформы всё множество аналитических решений обратной задачи кинематики робота. В качестве параметров используются любые две обобщённые координаты мобильной платформы, задавая которые можно получать отдельные подмножества решений и выбирать решения, удовлетворяющие нужным критериям. Математическое моделирование реализовано в системе Mathematica. Результаты подтверждены экспериментами на реальном роботе, фотографии которого представлены в работе. Используемые подходы могут быть применены при решении обратных задач кинематики различных мобильных манипуляторов.

Ключевые слова: аналитическое решение обратной задачи кинематики, мобильный манипулятор, KUKA youBot.

**Введение.** Для кинематически избыточных механизмов обратная задача кинематики является неопределённой, т.к. число уравнений меньше числа подлежащих определению обобщённых координат [1, 2]. Планируя движения и управляя роботом, важно знать все решения этой задачи и иметь возможность выбирать отдельные решения. Численными методами находятся только некоторые из них. Аналитическое решение существует не для всех моделей роботов.

Здесь рассматривается робот KUKA youBot [3], представляющий собой управляемую платформу, несущую пятиосный манипулятор со схватом на конце руки. Меканум колёса обеспечивают

возможность всенаправленного движения платформы. Открытое программное обеспечение робота позволяет широко применять его в исследованиях и образовании.

В [4] представлен алгоритм получения точного аналитического решения обратной задачи кинематики KUKA youBot с учётом мобильности платформы. Для отбора отдельных решений предложено три “параметра многозначности”: линейная и угловая координата положения платформы относительно рабочего органа и параметр, определяющий положение третьего шарнира руки (“локтя”) относительно звеньев. В работе [5] точное решение обратной задачи кинематики получено для руки KUKA youBot без учёта мобильности платформы.

В ряде задач, например, в задаче об управлении мобильным роботом при наличии препятствий в процессе выдвигания ящика шкафа [6] требуется решать обратную задачу кинематики, считая известным положение платформы в абсолютном пространстве. При этом можно использовать результаты [7], где показано, что набор параметров, определяющих отдельные решения обратной задачи кинематики KUKA youBot с учётом мобильности платформы не является единственным. Такими параметрами могут быть любые две из трёх обобщённых координат платформы на плоскости.

Далее представлены формулы точного аналитического решения обратной задачи кинематики KUKA youBot в зависимости от каких-либо двух обобщённых координат платформы. Рассмотрен пример вычисления точных решений с помощью Mathematica [8]. Эксперименты, в которых реальный робот KUKA youBot был выставлен в положения, отвечающие найденным в примере решениям, подтвердили правильность результатов.

**Решение обратной задачи кинематики KUKA youBot.** Мобильный манипулятор KUKA youBot на рисунке 1 состоит из установленных на платформе пяти последовательно соединённых звеньев, связанных соединениями вращательного типа с платформой и между собой. Звено 1 – твёрдое тело, вращающееся вокруг вертикальной оси  $C_1Z_1$ , точка  $C_1$  принадлежит основанию платформы, звенья 2, 3, 4 – стержни, которые вращаются вокруг горизонтальных осей, проходящих через точки  $C_2, C_3, C_4$  соответственно. Звено 5 – твёрдое тело, ладонь (отрезок  $C_5C'_5$  оси  $C_5z$ ), вращается вокруг оси  $C_5z$ , направленной вдоль звена 4. Со звеном 5 в точке  $C'_5$  соединён схват манипулятора в виде двух пальцев, которые могут перемещаться поступательно относительно звена 5, точка  $E$  на оси  $C_5z$  – крайняя точка схвата при сомкнутых пальцах. Платформа – твёрдое тело с горизонтальным верхним основанием, перемещающееся по неподвижной горизонтальной плоскости с помощью четырёх меканум колёс. Звенья 1-4 и ось вращения звена 5 расположены в одной вертикальной плоскости.

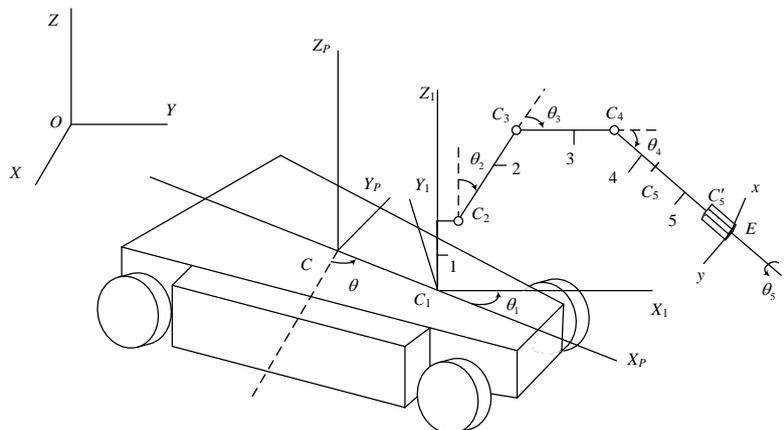


Рисунок 1 – Схема мобильного манипулятора KUKA youBot

Введём системы координат:  $OXYZ$  – неподвижная, абсолютная, ось  $OZ$  вертикальна, плоскость  $OXY$  совпадает с плоскостью верхнего основания платформы;  $CXPYPZP$  – жёстко связана с платформой,  $C$  – точка верхнего основания платформы, ось  $CZP$  вертикальна;  $C5x5y5z5$  – жёстко связана со схватом, вращается вокруг оси  $C5z$ ;  $C1X1Y1Z1$  – вращается вокруг вертикальной оси  $C1Z1$  вместе со звеном 1, ось  $C1X1$  направлена от оси  $C1Z1$  к проекции точки  $C2$  на плоскость  $OXY$ .

Обозначим:  $h$  – расстояние между точками  $C$  и  $C1$ ;  $a_1$  – расстояние между точкой  $C1$  и проекцией точки  $C2$  на горизонтальную плоскость;  $d_1$  – расстояние между точкой  $C1$  и проекцией точки  $C2$  на ось  $C1Z1$ ,  $a_2 = |C_2C_3|$ ,  $a_3 = |C_3C_4|$ ,  $a_4 = |C_4C_5|$ ,  $a_5 = |C_5C'|$ ,  $a_6 = |C_5E|$ . Здесь и далее векторы обозначены чертой сверху или прямым полужирным шрифтом. Этим же шрифтом будем обозначать матрицы.

Положение платформы и руки определим обобщёнными координатами  $X_C, Y_C, \theta, \theta_i, i=1-5, X_C, Y_C$  – координаты точки  $C$  относительно  $OX, OY, \theta$  – угол между  $OX$  и  $CX_P, \theta_1$  – угол между  $CX_P$  и  $C_1X_1, \theta_2$  – угол от  $C_1Z_1$  до  $\overline{C_2C_3}, \theta_3$  – угол от  $\overline{C_2C_3}$  до  $\overline{C_3C_4}, \theta_4$  – угол от  $\overline{C_3C_4}$  до  $\overline{C_4C_5}, \theta_5$  – угол поворота звена 5 вокруг  $C_5z$ .

В плоскостях  $OXY, C_1X_1Z_1, Exy$  за положительное направление отсчёта углов примем направление против часовой стрелки, если смотреть из концов осей  $OZ, C_1Y_1, C_5z$  соответственно.

Будем считать известной матрицу

$$\mathbf{R} = (r_{ij}), i=1-3, j=1-3,$$

перехода от базиса системы координат  $OXYZ$  к базису системы координат  $Exyz$ , а также координаты  $X_E, Y_E, Z_E$  точки  $E$  относительно  $OXYZ$ . Три независимых параметра, определяющих  $\mathbf{R}$ , и координаты  $X_E, Y_E, Z_E$  будем называть параметрами локации рабочего органа (ПЛРО).

Углы  $\theta_i, i=1-5$ , можно выразить через ПЛРО и обобщённые координаты платформы.

ПЛРО определяют положение точки  $C_4$  относительно  $OXYZ$ :

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{C_4} &= (X_{C_4} \ Y_{C_4} \ Z_{C_4})^T = \mathbf{r}_E - \overline{C_4E}, \\ \overline{C_4E} &= |\overline{C_4E}| \mathbf{k}, \end{aligned} \quad (1)$$

$\mathbf{r}_{C_4}, X_{C_4}, Y_{C_4}, Z_{C_4}$  – радиус-вектор и координаты точки  $C_4$  относительно  $OXYZ$  соответственно,  $T$  – знак транспонирования,  $|\overline{C_4E}| = a_4 + a_5 + a_6, \mathbf{k}$  – орт оси  $Ez$ .

Так как  $\mathbf{k}$  находится в плоскости  $C_1X_1Z_1$ , то

$$\theta + \theta_1 = \text{ATAN2}(r_{23}, r_{13}), \quad (2)$$

если  $r_{13}, r_{23}$  не равны нулю одновременно. В противном случае ( $\mathbf{k}$  вертикален) угол  $\theta + \theta_1$  не определяется ПЛРО и может принимать произвольные значения.

Уравнение (2) имеет два решения относительно  $\theta_1$  (возможно, не удовлетворяющих техническим ограничениям):

$$\begin{aligned} \theta_1^{(1)} &= \text{ATAN2}(r_{23}, r_{13}) - \theta, \\ \theta_1^{(2)} &= \text{ATAN2}(r_{23}, r_{13}) - \theta - \pi. \end{aligned} \quad (3)$$

Координаты  $X_{1C_4}, Y_{1C_4}, Z_{1C_4}$  точки  $C_4$  относительно  $C_1X_1Y_1Z_1$  выражаются через координаты платформы и координаты  $X_C, Y_C, Z_C$  соотношениями

$$\begin{aligned} X_{1C_4} &= (X_C - X_C) \cos(\theta + \theta_1) + (Y_C - Y_C) \sin(\theta + \theta_1) - h \cos(\theta_1), \\ Y_{1C_4} &= 0, \\ Z_{1C_4} &= Z_C. \end{aligned} \quad (4)$$

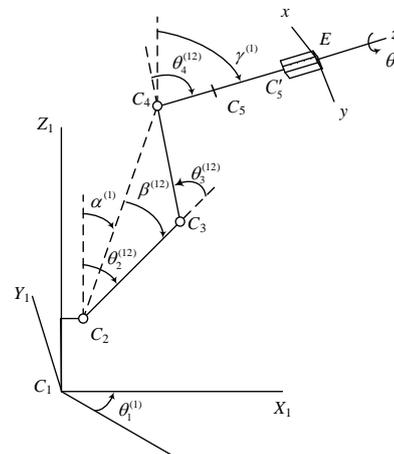
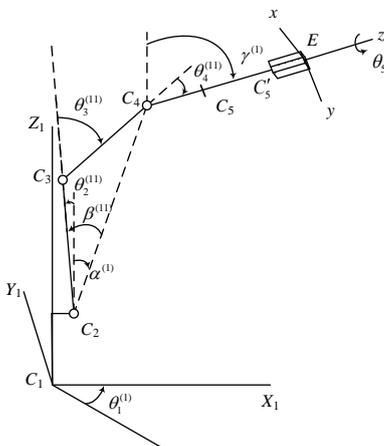


Рисунок 2 – Схема руки при  $\theta_1^{(1)}, \beta^{(11)}$

Рисунок 3 – Схема руки при  $\theta_1^{(1)}, \beta^{(12)}$

Решая треугольники на рисунках 2, 3, найдём

$$\begin{aligned}\theta_2^{(ij)} &= \alpha^{(i)} + \beta^{(ij)}, \\ \alpha^{(i)} &= \text{ATAN2}\left(X_{1C_4}|_{\theta_1=\theta_1^{(i)}} - a_1, Z_{1C_4} - d_1\right), \\ \beta^{(ij)} &= \text{ATAN2}\left(\sin \beta^{(ij)}, \cos \beta^{(ij)}\right), \cos \beta^{(ij)} = \frac{(u^{(i)})^2 + a_2^2 - a_3^2}{2u^{(i)}a_2}, \sin \beta^{(ij)} = (-1)^{(j)}\sqrt{1 - \cos^2 \beta^{(ij)}}, \\ u^{(i)} &= \left|C_2C_4\right|_{\theta_1=\theta_1^{(i)}} = \sqrt{\left(X_{1C_4}|_{\theta_1=\theta_1^{(i)}} - a_1\right)^2 + \left(Z_{1C_4} - d_1\right)^2}, \\ \theta_3^{(ij)} &= \text{ATAN2}\left(\sin \theta_3^{(ij)}, \cos \theta_3^{(ij)}\right), \cos \theta_3^{(ij)} = \frac{(u^{(i)})^2 - a_2^2 - a_3^2}{2a_2a_3}, \sin \theta_3^{(ij)} = (-1)^{(j-1)}\sqrt{1 - \cos^2 \theta_3^{(ij)}}, \\ \theta_4^{(ij)} &= \gamma^{(i)} - \theta_2^{(ij)} - \theta_3^{(ij)}, \gamma^{(i)} = \text{ATAN2}\left((-1)^{(i-1)}\sqrt{r_{13}^2 + r_{23}^2}, r_{33}\right), i=1,2, j=1,2,\end{aligned}\quad (5)$$

$\alpha^{(i)}, i=1,2$ , – углы между  $C_1Z_1$  и  $\overline{C_2C_4}$ ,  $\beta^{(ij)}, j=1,2$ , – углы между  $\overline{C_2C_4}$  и  $\overline{C_2C_3}$ , отвечающие решениям  $\theta_1^{(i)}, i=1,2$ , соответственно.

Для нахождения  $\theta_5$  построим в точке  $E$  систему координат  $EX_1'Y_1'Z_1', EX_1' \parallel C_1X_1, EY_1' \parallel C_1Y_1, EZ_1' \parallel C_1Z_1$ . Поворотом на угол  $\gamma^{(i)}, i=1,2$ , вокруг  $EY_1'$  совместим ось  $EZ_1'$  с осью  $Ez$ , при этом  $EX_1'$  перейдёт в  $EX_1''$ . Угол  $\theta_5$ , отсчитываемый от оси  $EX_1''$ , равен:

$$\theta_5^{(i)} = \text{ATAN2}\left[(-1)^{i-1}(-r_{23}r_{11} + r_{13}r_{21}), (-1)^{i-1}(-r_{23}r_{12} + r_{13}r_{22})\right], i=1,2. \quad (6)$$

Соотношения (1)-(6) определяют четыре решения  $\theta_i, i=1-5$ , в виде функций ПЛРО и координат платформы. Для определения одного из решений следует выбрать  $\theta_1^{(i)}, i=1,2$ , в (3) и задать знак  $\sin \beta^{(ij)}, i=1,2, j=1,2$ , в (5).

Уравнение, связывающее ПЛРО и обобщённые координаты платформы, получим [9] из уравнения горизонтальной прямой, совпадающей с осью  $C_1X_1$ ,

$$\frac{X_C + h \cos \theta - X_E}{r_{13}} = \frac{Y_C + h \sin \theta - Y_E}{r_{23}}. \quad (7)$$

Из (1)-(7) видно, что при заданных ПЛРО любые две обобщённые координаты платформы могут быть приняты за свободные параметры, а оставшаяся третья зависит от них в силу (7).

Таким образом существует бесконечно много решений обратной задачи кинематики КУКА youBot, которые могут быть получены путем задания любых двух обобщённых координат платформы. Здесь не рассматривается вопрос о множествах значений этих координат, обеспечивающих существование действительных решений обратной задачи кинематики и выполнение условий технических ограничений на числовые значения  $\theta_i, i=1-5$ .

**Пример.** Найдём с помощью разработанной [8] программы Mathematica четыре решения обратной задачи кинематики при произвольных фиксированных значениях ПЛРО и произвольных фиксированных значениях каких-либо двух обобщённых координат платформы, например,  $X_C, \theta$ . Ориентацию  $Exyz$  относительно  $OXYZ$  зададим углами Эйлера  $\psi, \theta_E, \varphi$ .

Согласно техническому описанию КУКА youBot [4]:  $h=151$  мм,  $d_1=147$  мм,  $a_1=33$  мм,  $a_2=155$  мм,  $a_3=135$  мм,  $a_4=81$  мм,  $a_5=90$  мм,  $a_6=47$  мм.

Пусть:  $\psi=189,36^\circ$ ,  $\theta_E=42,48^\circ$ ,  $\varphi=5,73^\circ$ ,  $X_E=150$  мм,  $Y_E=-208$  мм,  $Z_E=526$  мм,

$$X_C=287,83 \text{ мм}, \theta=126,024^\circ. \quad (8)$$

Выполнив расчёты по (1)-(7), найдём:

$$Y_C = -627,533 \text{ мм}, \theta_1^{(1)} = -26,664^\circ, \theta_2^{(11)} = 0,714^\circ, \theta_3^{(11)} = 61,358^\circ, \theta_4^{(11)} = -19,59^\circ, \theta_5^{(1)} = 95,73^\circ, \quad (9)$$

$$Y_C = -627,533 \text{ мм}, \theta_1^{(1)} = -26,664^\circ, \theta_2^{(12)} = 57,384^\circ, \theta_3^{(12)} = -61,358^\circ, \theta_4^{(12)} = 46,455^\circ, \theta_5^{(1)} = 95,73^\circ, \quad (10)$$

$$Y_C = -627,533 \text{ мм}, \theta_1^{(2)} = 153,336^\circ, \theta_2^{(21)} = -47,628^\circ, \theta_3^{(21)} = 15,051^\circ, \theta_4^{(21)} = -9,903^\circ, \theta_5^{(2)} = -84,27^\circ, \quad (11)$$

$$Y_C = -627,533 \text{ мм}, \theta_1^{(2)} = 153,336^\circ, \theta_2^{(22)} = -33,621^\circ, \theta_3^{(22)} = -15,051^\circ, \theta_4^{(22)} = 6,191^\circ, \theta_5^{(2)} = -84,27^\circ. \quad (12)$$



Рисунок 4 – Робот в положении (8), (9)



Рисунок 5 – Робот в положении (8), (10)



Рисунок 6 – Робот в положении (8), (11)



Рисунок 7 – Робот в положении (8), (12)

Робот KUKA youBot с помощью программы на языке С был выставлен в найденные положения. На рисунках 4-7 представлены фотографии робота в положениях (8), (9)-(12).

**Заключение.** Полученное точное аналитическое решение обратной задачи кинематики KUKA youBot может быть использовано при анализе различных теоретических и практических проблем управления. Метод параметризации решения обобщёнными координатами платформы применим и для других типов мобильных роботов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках выполнения научного проекта №16-01-00429.

1. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Основы управления манипуляционными роботами // М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004.
2. Springer Handbook of Robotics // ed. by Siciliano B., Khatib O., Springer, Berlin, Heidelberg, 2008.

3. <http://www.youbot-store.com/>
4. Sharma S., Kraetzschmar G., Scheurer C. Unified Closed Form Inverse Kinematics for the KUKA youBot // Proceedings of ROBOTIK / 7-th German Conference on Robotics, 2012. P. 1-6.
5. Brandstötter M., Angerer A., Hofbauer M. An Analytical Solution of the Inverse Kinematics Problem of Industrial Serial Manipulators with an Ortho-parallel Basis and a Spherical Wrist // Proceedings of the Austrian Robotics Workshop, 2014. P. 7-11.
6. Капустина О.М. Описание множества точных решений обратной задачи кинематики робота KUKA youBot с помощью обобщённых координат его платформы // Естественные и технические науки. 2016. №12. С. 176-180.
7. Pin, F.G., Culioli, J.C. Optimal Positioning of Combined Mobile Platform-Manipulator Systems for Material Handling Tasks // Journal of Intelligent & Robotic Systems, vol. 6, Numbers 2-3, p. 165-182, 1992.
8. Капустина О.М. Программа для расчёта точного решения обратной задачи кинематики KUKA youBot // программа ЭВМ / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017612009, Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент), 14.02.2017.

**V.A. Glazunov, A.K. Aleshin, K.A. Shalyukhin, G.V. Rashoyan, A.V. Antonov, A.M. Popov, V.M. Yudkin**

### **SYNTHESIS AND ANALYSIS OF PARALLEL STRUCTURE ROBOTS FOR WORKING IN EXTREME ENVIRONMENTS<sup>V</sup>**

*Institute of Machines Science named after A.A. Blagonravov of the Russian Academy of Sciences, Moscow*  
*vaglznnv@mail.ru, aleshin\_ak@mail.ru, constmeister@gmail.com, gagik\_r@bk.ru, ant.ant.rk@gmail.com,*  
*aproximandra@mail.ru, vfyudkin@mail.ru*

#### Abstract

A parallel structure mechanism with six degrees of freedom, designed for working in extreme environments, is considered. Methods for finding analytical solution of the inverse kinematics problem and numeric solution of the direct kinematics problem for a given mechanism are shown. Examples of these problems' solution are considered, the working space of the mechanism is determined. The obtained theoretical results were successfully tested in the experimental setup.

Keywords: extreme environment, parallel structure, kinematic analysis, working space.

1. Glazunov V.A., Koliskor A.Sh., Kraynev A.F. *Prostranstvennyye mekhanizmy parallelnoy struktury* [Spatial mechanisms of parallel structure]. Moscow: Nauka [Science]. 1991. 96 P.
2. Glazunov V.A., Chunikhin A.Yu. *Razvitiye issledovaniy mekhanizmov parallelnoy struktury* [Development of research on parallel structure mechanisms] // *Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin* [Journal of Machinery Manufacture and Reliability]. 2014. Iss. 3. P. 37–43.
3. Kalendarev A.V., Lysogorskiy A.E., Glazunov V.A. *Strukturnyy analiz mekhanizmov parallelnoy struktury s chetyrmya i pyatyu stepenyami svobody* [Structure analysis of parallel structure mechanisms with four and five degrees of freedom] // *Izvestiya VUZov: mashinostroyeniye* [News of HEI: machinery manufacture]. 2013. Iss. 3. P. 7–10.
4. IRSBot-2: A Novel Two-DOF Parallel Robot for High-Speed Operations / Germain C., Briot S., Glazunov V. et al. // ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. 2011. Vol. 6. P. 899–909.
5. Merlet J.P. *Parallel robots*. Kluwer Academic Publishers, 2006. 372 p.
6. *Modelirovaniye zon osobykh polozheniy mekhanizmov parallelnoy struktury* [Modeling of singularities zones for parallel structure mechanisms] / Glazunov V.A., Kraynev A.F., Rashoyan G.V. et. al // *Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin* [Journal of Machinery Manufacture and Reliability]. 2000. Iss. 2. P. 97–104.
7. Glazunov V.A., Esina M.G., Bykov R.E. *Upravleniye mekhanizmami parallelnoy struktury pri perekhode cherez osobyye polozheniya* [Control of the Parallel-Structure Mechanisms when Passing Through the Singular Positions] *Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin* [Journal of Machinery Manufacture and Reliability]. 2004. Iss. 2. P. 78–84.
8. Glazunov V. Twists of Movements of Parallel Mechanisms Inside Their Singularities // *Mechanism and Machine Theory*. 2006. Vol. 41. P. 1185–1195.

9. Ganiyev R.F., Glazunov V.A. *Manipulyatsionnyye mekhanizmy parallelnoy struktury i ikh prilozheniya v sovremennoy tekhnike* [Manipulation mechanisms of parallel structure and their applications in modern technology] // DAN. 2014. B. 459. Iss. 4. P. 1–4.
10. Koliskor A.Sh. *Razrabotka i issledovaniye promyshlennykh robotov na osnove l-koordinat* [Development and research of industrial robot based on l-coordinates] // *Stanki i instrument* [Machine tools and instrument]. 1982. Iss. 12. P. 21–24.
11. *Manipulyatsionnyye mekhanizmy parallelnoy struktury i nekotoryye ikh primeneniya v meditsine* [Manipulation mechanisms of parallel structure and their several applications in medicine] / Glazunov V.A., Dykhov A.V., Sheptunov S.A. et. al // *Kachestvo. Innovatsii. Obrazovaniye* [Quality. Innovations. Education]. 2016. B. 2. Iss. 2. P. 84–88.
12. Kheylo S.V., Glazunov V.A., Shirinkin M.A., Kalendarev A.V. *Vozmozhyye primeneniya mekhanizmov parallelnoy struktury* [Possible applications of parallel structure mechanisms] // *Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin* [Journal of Machinery Manufacture and Reliability]. 2013. Iss. 5. P. 19–24.
13. Patent 147057 Russian Federation. *Prostranstvennyi mekhanizm s shestyu stepenyami svobody* [Spatial mechanism with six degrees of freedom] // Glazunov V.A., Lastochkin A.B., Levin S.V., Rashoyan G.V., Shalyukhin K.A., F16H 21/02. Request 2014125459/11, 24.06.2014. *Op.* 27.10.2014. *Byul.* 30.
14. Hunt K.H. *Kinematic Geometry of Mechanisms*. Oxford: Glaredon Press, 1978, 469 p.
15. Bykov R.E., Glazunov V.A., Glazunova O.V., Chan Duk Khay. *Modelirovaniye rabochego prostranstva mekhanizma parallelnoy struktury s cheturmya kinematicheskimi tsepyami* [Working space modeling of parallel structure mechanism with four kinematic chains] // *Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin* [Journal of Machinery Manufacture and Reliability]. 2005. Iss. 5. P. 10–15.

**В.А. Глазунов, А.К. Алешин, К.А. Шалюхин., Г.В. Рашоян, А.В. Антонов, А.М. Попов, В.Ф. Юдкин**

## СИНТЕЗ И АНАЛИЗ РОБОТОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ДЛЯ РАБОТЫ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СРЕДАХ<sup>5</sup>

*Институт машиноведения имени А.А. Благонравова РАН, г. Москва*  
*vaglznnv@mail.ru, aleshin\_ak@mail.ru, constmeister@gmail.com, gagik\_r@bk.ru, ant.ant.rk@gmail.com,*  
*aproximandra@mail.ru, vfyudkin@mail.ru*

### Аннотация

Рассмотрен механизм параллельной структуры с шестью степенями свободы, предназначенный для работы в экстремальных средах. Приведены методы поиска аналитического решения обратной задачи о положении и численного решения прямой задачи о положении для данного механизма. Рассмотрены примеры решения этих задач, определена рабочая зона механизма. Полученные теоретические результаты успешно проверены на экспериментальной установке.

Ключевые слова: экстремальная среда, параллельная структура, кинематический анализ, рабочая зона.

Механизмы параллельной структуры состоят из нескольких кинематических цепей, соединяющих выходное звено с основанием, и могут воспринимать нагрузку подобно пространственным фермам. Данная конструкция наделяет механизмы параллельной структуры повышенными показателями точности и грузоподъемности по сравнению с традиционными манипуляционными механизмами консольного типа. Еще одним достоинством механизмов параллельной структуры является возможность установки приводов вне рабочей зоны, что позволяет снизить инерционность и повысить быстродействие [1–5].

Хотя механизмы параллельной структуры обладают рядом недостатков, связанных с небольшой рабочей зоной и наличием особых положений [6–8], перечисленные выше преимущества позволяют использовать данные механизмы в самых разнообразных областях техники. Известны многочисленные примеры использования механизмов параллельной структуры в качестве тренажеров, медицинских роботов, испытательных и измерительных устройств [9–12].

В настоящее время одной из серьезных проблем является решение задачи манипулирования моделями аэрокосмических систем в аэродинамической трубе в условиях интенсивного воздушного потока. Для решения этой задачи была разработана схема механизма параллельной структуры с шестью степенями свободы [13], отличительной особенностью которой является расположение всех приводов

вне рабочей зоны. Такая конструкция позволяет как защитить приводы от воздействия окружающей среды, так и сохранить чистой окружающую среду от воздействия приводов. Подобное решение может найти применение и в других технических приложениях, в частности при испытаниях в таких агрессивных средах, как космос или океан.

В текущей работе рассматриваются кинематический анализ данного механизма, включающий решение прямой и обратной задач о положении, а также построение рабочей зоны механизма.

Кинематическая схема рассматриваемого механизма приведена на рис. 1.

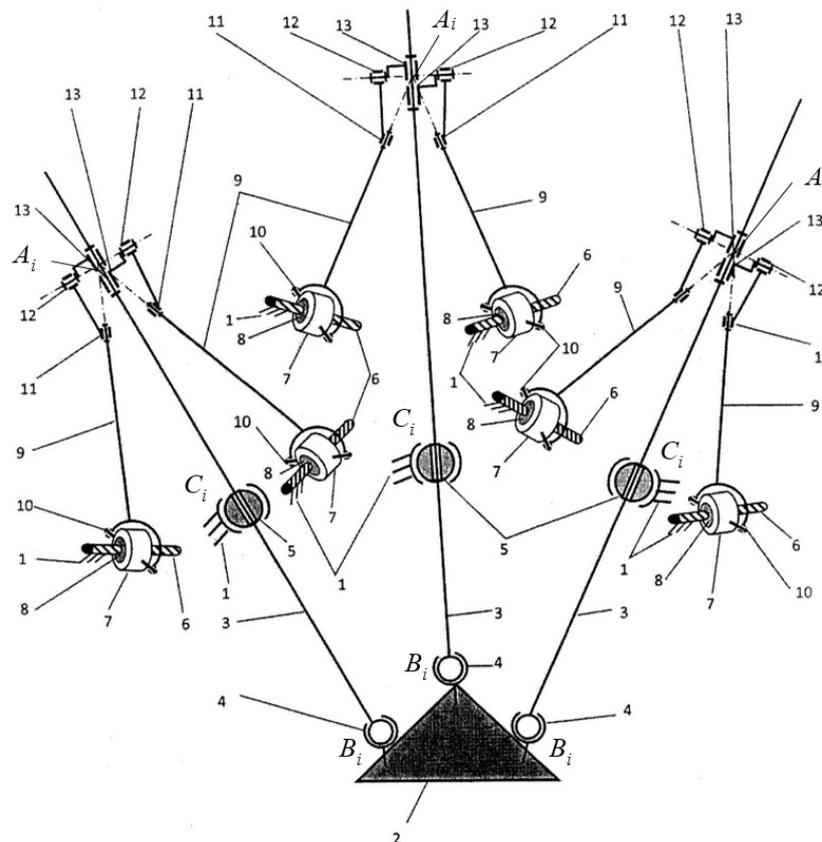


Рисунок 1 – Кинематическая схема рассматриваемого механизма

Выходное звено (платформа) 2 механизма связано с основанием 1 посредством трех кинематических цепей. Каждая такая цепь включает в себя стержень 3, один из концов которого соединен с платформой 2 при помощи сферического шарнира 4. Стержень 3 также соединен с основанием 1 сферическим шарниром 5 с отверстием, обеспечивающим поступательное перемещение в нем стержня 3. Другой конец стержня 3 соединен с парой промежуточных звеньев 9, каждое из которых одним своим концом соединено со стержнем 3 при помощи трех вращательных кинематических пар 11, 12 и 13, оси которых пересекаются в одной точке. С противоположной стороны каждое из промежуточных звеньев 9 соединено с корпусом 7 линейного двигателя при помощи вращательного шарнира 10. Каждый из линейных двигателей также включает приводную гайку 8, осуществляющую движение по винтовой оси 6, закрепленной на основании 1. Данная винтовая ось, ось вращательного шарнира 10 и ось вращательного шарнира 11 также пересекаются в одной точке.

Механизм обеспечивает выходному звену 2 шесть степеней свободы.

Обратная задача о положении заключается в определении значений обобщенных координат механизма  $\mathbf{q}$  при известных векторе положении  $(x_{pl} \ y_{pl} \ z_{pl})^T$  и углах ориентации  $\varphi_{pl}, \theta_{pl}, \psi_{pl}$  платформы. Для рассматриваемого механизма существует аналитическое решение данной задачи. Решение основано на записи уравнения прямой, проходящей через три точки:

- 1) Точку пересечения осей шарниров 11, 12 и 13 – точку  $A_i$  (рисунок 1);
- 2) Точку положения сферического шарнира 4 – точку  $B_i$ ;
- 3) Точку положения сферического шарнира 5 с отверстием – точку  $C_i$ .

Здесь  $i = 1, \dots, 6$  – номер кинематической цепи (рассматривается шесть кинематических цепей, а не три, поскольку каждый из трех стержней 3, будучи соединенным одним из своих концов с двумя промежуточными звеньями 9, образует с основанием 1 еще по две кинематических цепи). Уравнение такой прямой будет иметь вид:

$$(x_{Ci} - x_{Ai}) / (x_{Bi} - x_{Ai}) = (y_{Ci} - y_{Ai}) / (y_{Bi} - y_{Ai}) = (z_{Ci} - z_{Ai}) / (z_{Bi} - z_{Ai}), \quad (1)$$

где  $(x_{Ai} \ y_{Ai} \ z_{Ai})^T$ ,  $(x_{Bi} \ y_{Bi} \ z_{Bi})^T$  и  $(x_{Ci} \ y_{Ci} \ z_{Ci})^T$  – координаты точек  $A_i$ ,  $B_i$  и  $C_i$  соответственно.

Координаты точки  $C_i$  являются конструктивным параметром механизма и считаются известными. Координаты точки  $B_i$  зависят от положения и ориентации платформы механизма и ее геометрических характеристик и при решении обратной задачи о положении также считаются известными. Добавляя к соотношению (1) уравнение, связывающее координаты точек  $A_i$  и  $B_i$  с известной длиной отрезка  $A_iB_i$  (рисунок ), получим систему из двух линейных и одного квадратного уравнения относительно трех неизвестных  $x_{Ai}$ ,  $y_{Ai}$  и  $z_{Ai}$ . Данная система имеет аналитическое решение.

С другой стороны, координаты точки  $A_i$  зависят от трех неизвестных: обобщенной координаты механизма  $q_i$  (линейного перемещения приводной гайки 8 по винтовой оси 6), угла между приводной гайкой 8 и корпусом 7 линейного двигателя и угла во вращательном шарнире 10. Таким образом, можно составить еще одну систему из трех уравнений, для которой также существует решение в аналитическом виде, и определить искомые значения обобщенных координат механизма  $\mathbf{q}$ .

### Пример решения обратной задачи о положении

Пусть законы движения платформы относительно некоторой глобальной неподвижной системы координат имеют вид:

$$x_{pl}(t) = 365 + 30 \cos(5t) \text{ мм}, \quad y_{pl}(t) = 225 + 20 \sin(10t) \text{ мм}, \quad z_{pl}(t) = 275 \text{ мм},$$

$$\varphi_{pl}(t) = -\frac{\pi}{18} t^2 \text{ рад}, \quad \theta_{pl}(t) = \frac{\pi}{6} \text{ рад}, \quad \psi_{pl}(t) = 0 \text{ рад},$$

где  $t$  – время, с.

Результаты расчета – графики зависимостей  $q_i(t)$  – показаны на рис. 2.

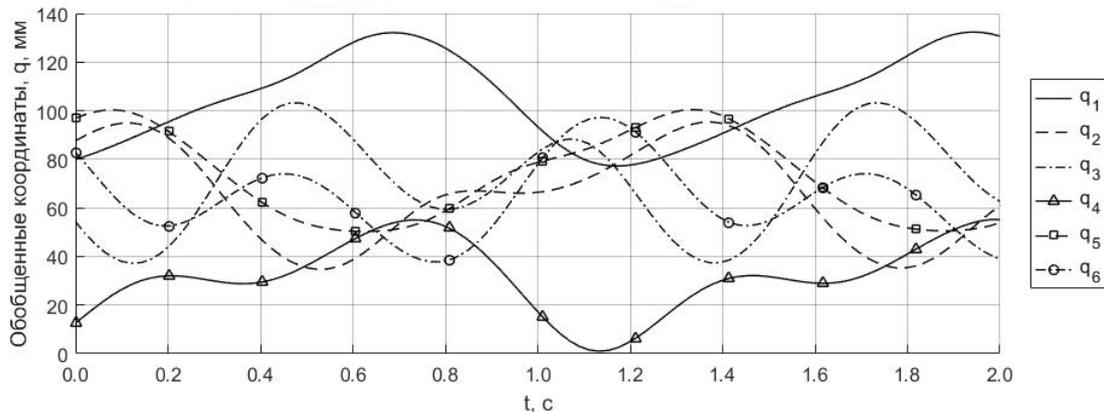


Рисунок 2 – Решение обратной задачи о положении

Прямая задача о положении заключается в определении вектора положения  $(x_{pl} \ y_{pl} \ z_{pl})^T$  и углов ориентации  $\varphi_{pl}$ ,  $\theta_{pl}$ ,  $\psi_{pl}$  платформы при известных значениях обобщенных координат механизма  $\mathbf{q}$ . Рассмотрим геометрическое решение данной задачи.

При известных значениях обобщенных координат  $\mathbf{q}$  точка  $A_i$  лежит на поверхности сферы  $S_i$  радиуса  $l_i$  с центром в точке  $O_{Si}$  (рис. 3). Для кинематических цепей с номерами 1 и 2 точка  $A_i$  является общей (обозначим ее  $A_{12}$ ) и лежит на пересечении сферических поверхностей  $S_1$  и  $S_2$ . В общем случае данные поверхности пересекаются по окружности  $K_{A_{12}}$  (рисунок 3). Аналогично для пар кинематических цепей 3–4 и 5–6 соответствующие общие точки  $A_{34}$  и  $A_{56}$  будут лежать на пересечении сфер  $S_3$ ,  $S_4$  и  $S_5$ ,  $S_6$ , а сферические поверхности будут пересекаться по окружностям  $K_{A_{34}}$  и  $K_{A_{56}}$ . Соотношения, описывающие пересечения данных сфер, можно представить в виде шести квадратных уравнений [14].

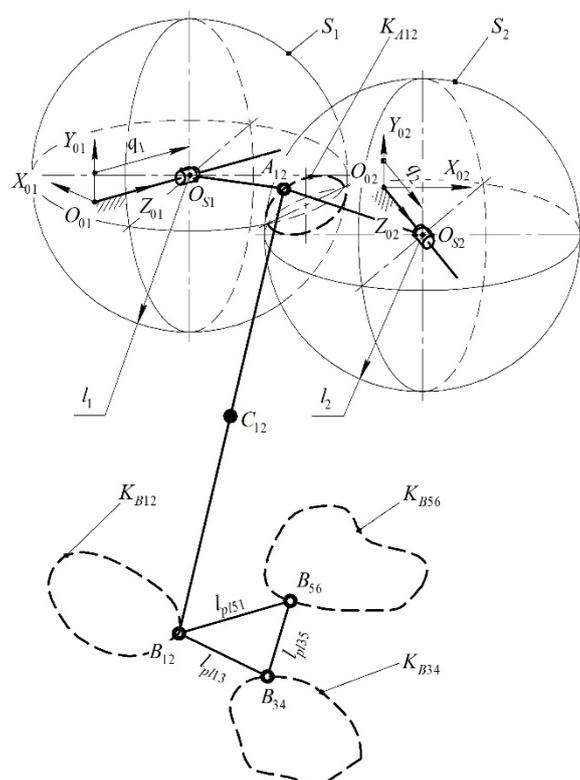


Рисунок 3 – Геометрическое решение прямой задачи о положении

Обозначим точки  $B_i$  и  $C_i$ , принадлежащие парам кинематических цепей 1–2, 3–4 и 5–6,  $B_{12}$ ,  $B_{34}$ ,  $B_{56}$  и  $C_{12}$ ,  $C_{34}$ ,  $C_{56}$  соответственно. Аналогично пункту о решении обратной задачи о положении можно составить уравнения прямых, проходящих через точки  $A_i$ ,  $B_i$  и  $C_i$ , а также соотношения, связывающие известные длины отрезков  $A_{12}B_{12}$ ,  $A_{34}B_{34}$  и  $A_{56}B_{56}$  с координатами вершин этих отрезков, где  $B_{12}$ ,  $B_{34}$  и  $B_{56}$ . Таким образом, получим еще шесть линейных и три квадратных уравнения.

При движении точки  $A_{12}$  по окружности  $K_{A_{12}}$  точка  $B_{12}$  будет описывать в пространстве кривую  $K_{B_{12}}$  (рисунок). Аналогичные кривые  $K_{B_{34}}$  и  $K_{B_{56}}$  будут для точек  $B_{34}$  и  $B_{56}$  соответственно. При этом точки  $B_{12}$ ,  $B_{34}$  и  $B_{56}$  должны занимать такое положение на своих кривых, что длины отрезков  $B_{12}B_{34}$ ,  $B_{34}B_{56}$  и  $B_{56}B_{12}$  были бы равны известным длинам сторон платформы  $l_{pl13}$ ,  $l_{pl35}$  и  $l_{pl51}$  соответственно (рисунок 3). Это условие приводит к еще трем квадратным уравнениям.

В результате имеем систему из 18 уравнений, 12 из которых являются квадратными и 6 – линейными, относительно 18 неизвестных, которыми являются координаты шести точек:  $A_{12}$ ,  $A_{34}$ ,  $A_{56}$  и  $B_{12}$ ,  $B_{34}$ ,  $B_{56}$ . Для этой системы уравнений не существует решения в аналитическом виде, поэтому будем искать численное решение. В качестве начального приближения для численного решения задаем вектор начального положения платформы  $(x_{pl}^0 \ y_{pl}^0 \ z_{pl}^0)^T$  и начальные значения углов ориентации  $\varphi_{pl}^0, \theta_{pl}^0, \psi_{pl}^0$  платформы. Далее аналитически решаем обратную задачу о положении согласно предыдущему пункту и определяем начальное приближение для координат точек  $A_{12}$ ,  $A_{34}$ ,  $A_{56}$ ,  $B_{12}$ ,  $B_{34}$  и  $B_{56}$ , а затем численно решаем систему составленных уравнений. Далее, зная координаты трех вершин платформы  $B_{12}$ ,  $B_{34}$  и  $B_{56}$ , при помощи математических операций [14] можно аналитически вычислить значения вектора положения  $(x_{pl} \ y_{pl} \ z_{pl})^T$  и углов ориентации  $\varphi_{pl}, \theta_{pl}, \psi_{pl}$  платформы.

### Пример решения прямой задачи о положении

Пусть законы изменения обобщенных координат механизма  $q_i(t)$  соответствуют решению обратной задачи о положении, приведенному в примере в предыдущем пункте. Начальное приближение для поиска численного решения выберем следующее:

$$(x_{pl}^0 \ y_{pl}^0 \ z_{pl}^0)^T = (330 \ 250 \ 250)^T \text{ мм}, \quad \varphi_{pl}^0 = \theta_{pl}^0 = \psi_{pl}^0 = 0 \text{ рад.}$$

Результаты расчета в виде графиков зависимостей  $x_{pl}(t)$ ,  $y_{pl}(t)$ ,  $z_{pl}(t)$ ,  $\phi_{pl}(t)$ ,  $\theta_{pl}(t)$  и  $\psi_{pl}(t)$  приведены на рисунке 4. Как видно из рисунка, полученное решение полностью совпадает с заданными выражениями из примера решения обратной задачи о положении.

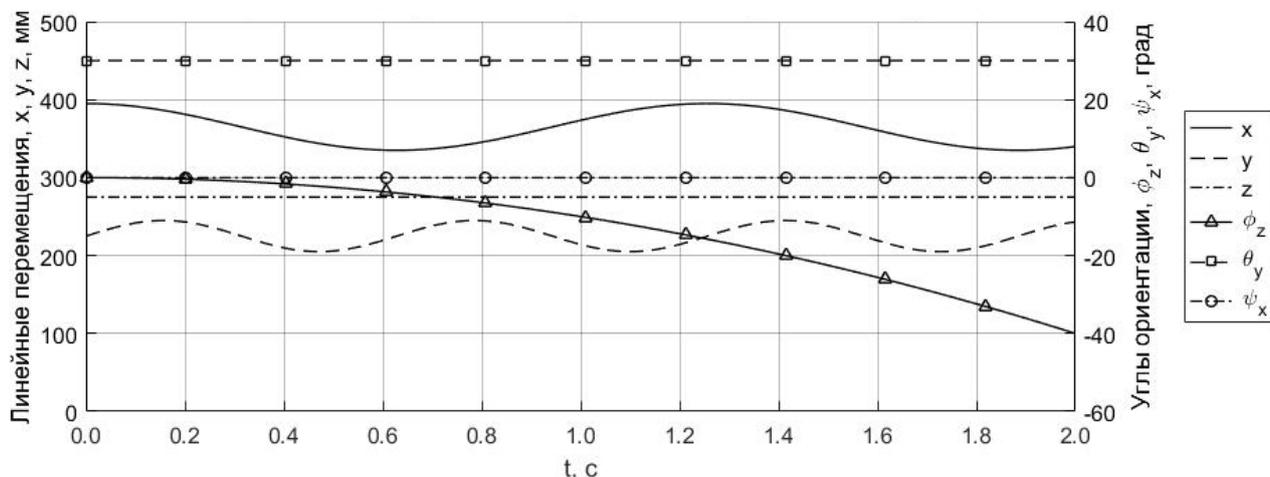


Рисунок 4 – Решение прямой задачи о положении

Построение рабочей зоны механизма заключается в определении области пространства, которую может занимать выходное звено механизма (платформа) с учетом конструктивных и прочих ограничений. В рассматриваемом механизме такими ограничениями являются ограничения на диапазон изменения обобщенных координат механизма  $q_i$ :

$$q_{i\min} < q_i < q_{i\max}, \quad (1)$$

где  $q_{i\min}$  и  $q_{i\max}$  – соответственно минимально и максимальное допустимые значения обобщенной координаты  $q_i$ , обусловленные конструктивными ограничениями.

Определение рабочей зоны механизма будем проводить методом сканирования пространства вокруг платформы механизма с использованием решения обратной задачи о положении [15]. Для построения рабочей зоны был составлен алгоритм. На основе полученного после сканирования пространства массива точек, принадлежащих рабочей зоне механизма, строится поверхность, охватывающая эти точки, а также определяется объем рабочей зоны. Результаты работы соответствующей программы приведены на рисунок 5.

Как видно из рисунка, форма рабочей зоны механизма напоминает форму двух треугольных пирамид, имеющих общее основание. Несимметричность обусловлена несимметричностью конструкции механизма, а также различными значениями ограничений (2) для разных кинематических цепей механизма. Объем рабочей зоны составил  $92,37 \text{ см}^3$ .

Для проверки результатов, полученных при моделировании, была изготовлена экспериментальная установка (рис. 6). Установка включает в себя механизм, а также систему управления этим механизмом.

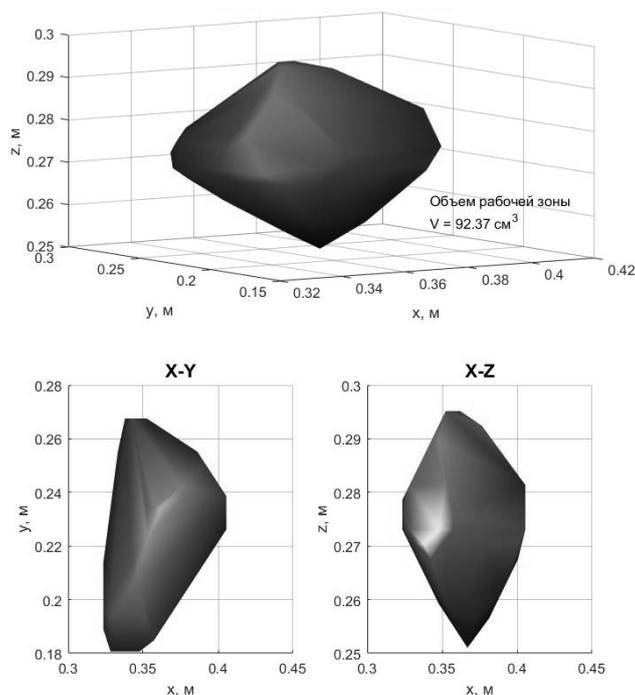


Рисунок 5 – Построение рабочей зоны механизма

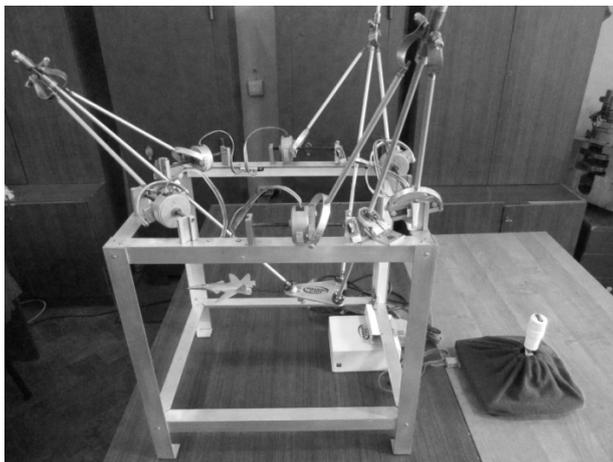


Рисунок 6 – Экспериментальная установка

В состав механизма входят следующие компоненты:

- 1) Непосредственно конструкция механизма;
- 2) Шесть линейных шаговых двигателей с резьбой на валу 57BYZ01-B01;
- 3) Шесть механических концевых выключателей, служащих для калибровки шаговых двигателей.

Система управления механизмом включает следующие элементы:

- 1) Микроконтроллер на базе Arduino Mega 2560;
- 2) Шестикоординатное задающее устройство для управления положением и ориентацией выходного звена;
- 3) Шесть драйверов ULN2064В для управления шаговыми двигателями;
- 4) Блок питания LRS-75-12 на 12 В для работы двигателей и драйверов;
- 5) Преобразователь напряжения (DC-DC конвертер) на 5 В на базе LM2596 для работы микроконтроллера, задающего устройства и концевых выключателей.

В ходе испытаний по управлению положением и ориентацией платформы можно визуально наблюдать подтверждение теоретических расчетов из пункта о решении обратной задачи о положении. Особенно наглядным является раздельное управление по какой-либо одной координате (углу ориентации): можно отчетливо наблюдать движение платформы вдоль этой координаты (изменение этого угла ориентации) с сохранением остальных координат и углов постоянными и соответствующими начальному положению платформы.

В ходе данной работы были поставлены и выполнены следующие задачи:

1) Решена обратная задача о положении для механизма параллельной структуры *аналитическим* методом: рассмотрен порядок определения обобщенных координат механизма при заданных векторе положения и углах ориентации платформы механизма.

2) Решена прямая задача о положении для данного механизма *численным* методом: рассмотрен порядок определения вектора положения и углов ориентации платформы механизма при известных значениях обобщенных координат механизма.

3) Определена рабочая зона механизма методом сканирования пространства вокруг платформы механизма.

4) Разработана экспериментальная установка, включающая механизм и его систему управления. Результаты испытаний полностью подтвердили теоретические расчеты.

Результаты данной работы могут непосредственно использоваться в дальнейших исследованиях механизма, связанных с анализом особых положений, решением задачи о скоростях, динамическим анализом механизма. Полученное решение обратной позиционной задачи может использоваться для кинематического управления движением платформы, что было успешно продемонстрировано на экспериментальной установке<sup>(5)</sup>.

1. Глазунов В.А., Колискор А.Ш., Крайнев А.Ф. Пространственные механизмы параллельной структуры. М.: Наука, 1991. 95 с.
2. Глазунов В.А., Чунихин А.Д. Развитие исследований механизмов параллельной структуры // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2014. № 3. С. 37–43.
3. Календарев А.В., Лысогорский А.Е., Глазунов В.А. Структурный анализ механизмов параллельной структуры с четырьмя и пятью степенями свободы // Известия высших учебных заведений: машиностроение. 2013. № 3. С. 7–10.
4. IRSBot-2: A Novel Two-DOF Parallel Robot for High-Speed Operations / Germain C., Briot S., Glazunov V. et al. // ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. 2011. Vol. 6. P. 899–909.
5. Merlet J.P. Parallel robots. Kluwer Academic Publishers, 2006. 372 p.
6. Моделирование зон особых положений механизмов параллельной структуры / Глазунов В.А., Крайнев А.Ф., Рашоян Г.В. и др. // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2000. № 2, С. 97–104.
7. Глазунов В.А., Есина М.Г., Быков Р.Э. Управление механизмами параллельной структуры при переходе через особые положения // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2004. № 2. С. 78–84.
8. Glazunov V. Twists of Movements of Parallel Mechanisms Inside Their Singularities // Mechanism and Machine Theory. 2006. Vol. 41. P. 1185–1195.
9. Ганиев Р.Ф., Глазунов В.А. Манипуляционные механизмы параллельной структуры и их приложения в современной технике // ДАН. 2014. Т.459. № 4. С.1–4.
10. Колискор А.Ш. Разработка и исследование промышленных роботов на основе *l*-координат // Станки и инструмент. 1982. № 12. С. 21–24.
11. Манипуляционные механизмы параллельной структуры и некоторые их применения в медицине / Глазунов В.А., Духов А.В., Шептунов С.А. и др. // Качество. Инновации. Образование. 2016. Т. 2. № 2. С. 84–88.
12. Хейло С.В., Глазунов В.А., Ширинкин М.А., Календарев А.В. Возможные применения механизмов параллельной структуры // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013. № 5. С. 19–24.
13. Патент РФ на полезную модель № 147057. Пространственный механизм с шестью степенями свободы // Глазунов В.А., Ласточкин А.Б., Левин С.В., Рашоян Г.В., Шалюхин К.А. F16H 21/02, Заявка 2014125459/11, 24.06.2014. Оп. 27.10.2014. Бюл. № 30.
14. Hunt К.Н. Kinematic Geometry of Mechanisms. Oxford: Glaredon Press, 1978, 469 p.
15. Быков Р.Э., Глазунов В.А., Глазунова О.В., Чан Дык Хай. Моделирование рабочего пространства механизма параллельной структуры с четырьмя кинематическими цепями // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2005. № 5. С. 10–15.

COMPARATIVE ANALYSIS OF DYNAMICS OF ONE-DEGREE OF FREEDOM  
MANIPULATORS ON MOVABLE AND HINGED FOUNDATION

Bauman Moscow State Technical University,  
byelonozhko@mail.ru

**Introduction**

Independent dynamic equation of relative motion of one-degree of freedom space manipulator on movable foundation is obtained in [1-2] in the form of Routhan equation for the case of lack of external forces and moments. Qualitative analysis of plane inertial motions is executed, essentially differentiated modes – oscillation mode and rotary mode – are emphasized. In spite of model pattern of problem, where possibility of qualitative analytical study and pictorial result interpretation is its important aspect, obtained equation supposes also direct application use at study, for example, of some traffic conditions of assembly and service self-contained robotic space modules [3-4].

Free motion of two-link manipulator - one-degree of freedom manipulator at hinged foundation is examined in [5] conformably to problem of use of proper inertial motions of manipulator at control construction. Manipulator movement is described by differential equation system circumscribing absolute foundation motion and relative load motion. Independent dynamic equation of relative motion is not used in [5]. The report represents that such equation may be obtained, at the same time load motion relative to hinged foundation accurate within expressions for coefficients is described by the same equation that dynamics of relative motion of one-degree of freedom manipulator on movable foundation.

**Model problem. Kinetic energy**

Let us consider plane motion of two solids system 1 and 2 (foundation and load), connected by ideal one-degree of freedom rotary joint for a case of movable and hinged foundation.

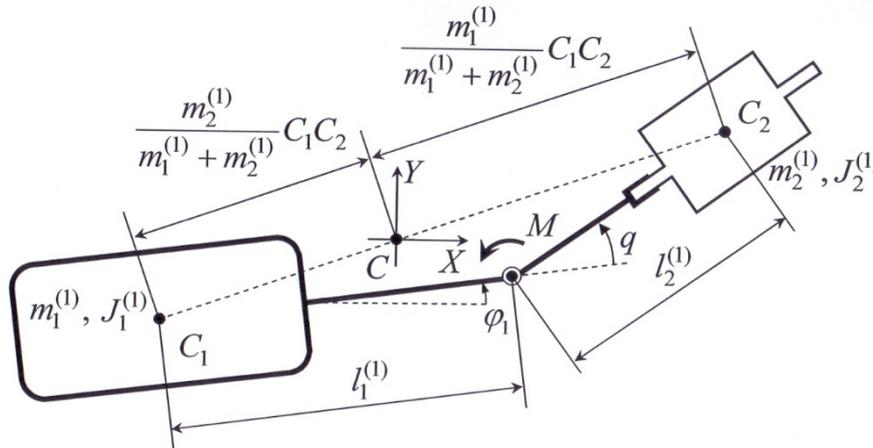


Figure 1 – One-degree of freedom manipulator on movable foundation

Figure 1 represents a case of movable foundation. Masses of bodies 1 and 2 are correspondingly  $m_1^{(1)}$  and  $m_2^{(1)}$ ,  $J_1^{(1)}$  and  $J_2^{(1)}$  are moments of inertia of bodies 1 and 2 accordingly relative to their centers of mass  $C_1$  and  $C_2$ ,  $l_1^{(1)}$  and  $l_2^{(1)}$  are distances from centers of mass to joint. We examine motion against non-rotary co-ordinates  $XCY$  with origin at center of mass of system  $C$  (Fig. 1), where these co-ordinates will be inertials in the absence of action of external forces and moments on the system. System position against  $XCY$  is determined by angle  $\varphi_1$ , defining absolute motion of foundation (Fig. 1), and hinge angle  $q$  (Fig. 1), defining load motion relative to foundation.

Expression for system's kinetic energy as quadratic form of independent generalized coordinates  $\varphi_1$  and  $q$  appears as

$$T^{(1)} = \frac{1}{2} \dot{\varphi}_1^2 \left( J_1^{(1)} + J_2^{(1)} + \tilde{m} l_1^{(1)2} + \tilde{m} l_2^{(1)2} + 2\tilde{m} l_1^{(1)} l_2^{(1)} \cos q \right) + \dot{\varphi}_1 \dot{q} \left( J_2^{(1)} + \tilde{m} l_2^{(1)2} + \tilde{m} l_1^{(1)} l_2^{(1)} \cos q \right) + \frac{1}{2} \dot{q}^2 \left( J_2^{(1)} + \tilde{m} l_2^{(1)2} \right), \quad (1)$$

where 
$$\tilde{m} = \frac{m_1^{(1)} m_2^{(1)}}{m_1^{(1)} + m_2^{(1)}}.$$

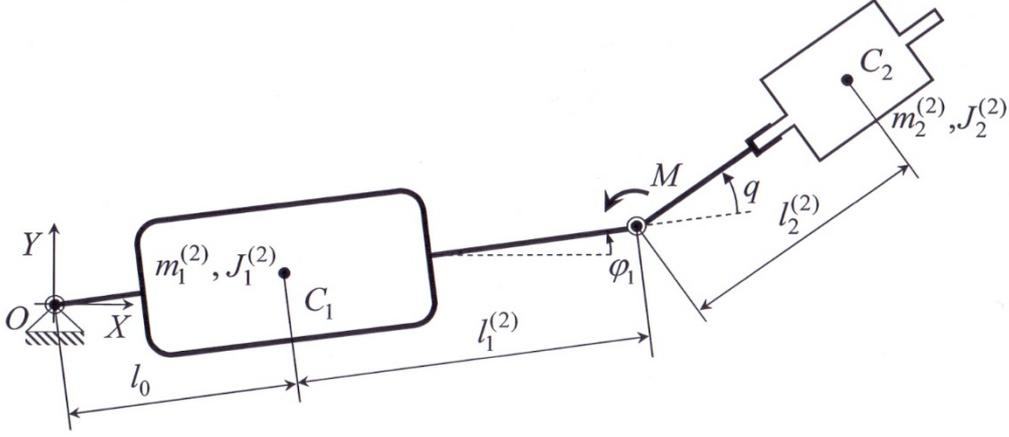


Figure 2 – One-degree of freedom manipulator on hinged foundation

Figure 2 represents a case of hinged foundation. Masses of bodies 1 and 2 are correspondingly  $m_1^{(2)}$  and  $m_2^{(2)}$ ,  $J_1^{(2)}$  and  $J_2^{(2)}$  are moments of inertia of bodies 1 and 2 accordingly relative to their centers of mass  $C_1$  and  $C_2$ ,  $l_1^{(2)}$  and  $l_2^{(2)}$  are distances from centers of mass to joint,  $l_0$  is distance from ideal rotary joint  $O$ , by means of which foundation (body 1) is fastened at the origin of immovable inertial co-ordinates  $XOY$ , against which motion of system is examined, to center of mass of foundation  $C_1$ . System position against  $XOY$  also is determined by angle  $\varphi_1$ , defining absolute motion of foundation (Fig. 2), and hinge angle  $q$  (Fig. 2), defining load motion relative to foundation.

Expression for system's kinetic energy as quadratic form of independent generalized coordinates  $\varphi_1$  and  $q$  appears as

$$T^{(2)} = \frac{1}{2} \dot{\varphi}_1^2 \left( J_1^{(2)} + J_2^{(2)} + m_1^{(2)} l_0^2 + m_2^{(2)} (l_0 + l_1^{(2)})^2 + m_2^{(2)} l_2^{(2)2} + 2m_2^{(2)} (l_0 + l_1^{(2)}) l_2^{(2)} \cos q \right) + \dot{\varphi}_1 \dot{q} \left( J_2^{(2)} + m_2^{(2)} l_2^{(2)2} + m_2^{(2)} (l_0 + l_1^{(2)}) l_2^{(2)} \cos q \right) + \frac{1}{2} \dot{q}^2 \left( J_2^{(2)} + m_2^{(2)} l_2^{(2)2} \right). \quad (2)$$

Expression (2) agrees with expression for kinetic energy given in [5] within used designations and accepted admissions.

Control moment  $M$  is applied in joint linking foundation and load in both examined cases (Fig 1 and 2). Let's designate

$$\gamma_{11} = J_1^{(1)} + \tilde{m} l_1^{(1)2}, \gamma_{21} = J_2^{(1)} + \tilde{m} l_2^{(1)2}, \gamma_{31} = \tilde{m} l_1^{(1)} l_2^{(1)}. \quad (3)$$

Then expression for kinetic energy (1) will take on form

$$T^{(1)} = \frac{1}{2} \dot{\varphi}_1^2 (\gamma_{11} + \gamma_{21} + 2\gamma_{31} \cos q) + \dot{\varphi}_1 \dot{q} (\gamma_{21} + \gamma_{31} \cos q) + \frac{1}{2} \dot{q}^2 \gamma_{21} \quad (4)$$

Let's designate

$$\gamma_{12} = J_1^{(2)} + m_1^{(2)} l_0^2 + m_2^{(2)} (l_0 + l_1^{(2)})^2, \gamma_{22} = J_2^{(2)} + m_2^{(2)} l_2^{(2)2}, \gamma_{32} = m_2^{(2)} (l_0 + l_1^{(2)}) l_2^{(2)}. \quad (5)$$

Then expression for kinetic energy (2) will take on form

$$T^{(2)} = \frac{1}{2} \dot{\varphi}_1^2 (\gamma_{12} + \gamma_{22} + 2\gamma_{32} \cos q) + \dot{\varphi}_1 \dot{q} (\gamma_{22} + \gamma_{32} \cos q) + \frac{1}{2} \dot{q}^2 \gamma_{22} \quad (6)$$

It is easy to see that expressions (4) and (6) agree within designations (3) and (5). Let's introduce common designations for coefficients (3) and (5) which are functions of mass and lag parameters of appropriate analytical models

$$\gamma_{11} = \gamma_{12} = \gamma_1, \quad \gamma_{21} = \gamma_{22} = \gamma_2, \quad \gamma_{31} = \gamma_{32} = \gamma_3. \quad (7)$$

Then expression for kinetic energy will take on form

$$T = \frac{1}{2} \dot{\phi}_1^2 (\gamma_1 + \gamma_2 + 2\gamma_3 \cos q) + \dot{\phi}_1 \dot{q} (\gamma_2 + \gamma_3 \cos q) + \frac{1}{2} \dot{q}^2 \gamma_2 \quad (8)$$

Accordingly expressions for kinetic energy of system of two solid bodies, linked by ideal one-degree of freedom rotary hinge, performing plane motion appears as (8) for cases of movable and hinged foundation.

### Equation of dynamics of relative movement in the form of Rouhan equation

It is evident from (8) that coordinate  $q$  is positional and coordinate  $\phi_1$  is cyclic in the absence of external forces and moments. Cyclic integral occurs

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\phi}_1} = \dot{\phi}_1 (\gamma_1 + \gamma_2 + 2\gamma_3 \cos q) + \dot{q} (\gamma_2 + \gamma_3 \cos q) = L = const, \quad (9)$$

where  $L$  is system kinetic moment.

Let's express cyclic speed  $\dot{\phi}_1$  from (9)

$$\dot{\phi}_1 = \dot{\phi}_1(\dot{q}, q, L) = -\dot{q} \frac{(\gamma_2 + \gamma_3 \cos q)}{(\gamma_1 + \gamma_2 + 2\gamma_3 \cos q)} + L \frac{1}{(\gamma_1 + \gamma_2 + 2\gamma_3 \cos q)} \quad (10)$$

Substituting (10) to (8) we obtain expression for system kinetic energy as function of positional speed  $\dot{q}$ , positional coordinate  $q$  and kinetic moment  $L$

$$T^*(\dot{q}, q, L) = [T(\dot{\phi}_1, \dot{q}, q)]_{\dot{\phi}_1 = \dot{\phi}_1(\dot{q}, q, L)} = \frac{1}{2} \dot{q}^2 \frac{\gamma_1 \gamma_2 - \gamma_3^2 \cos^2 q}{(\gamma_1 + \gamma_2 + 2\gamma_3 \cos q)} + L^2 \frac{1}{(\gamma_1 + \gamma_2 + 2\gamma_3 \cos q)} \quad (11)$$

Let's write expression for Rouhan function [6]

$$R = R(\dot{q}, q, L) = T^*(\dot{q}, q, L) - \dot{\phi}_1(\dot{q}, q, L) \cdot L = \frac{1}{2} \dot{q}^2 \frac{\gamma_1 \gamma_2 - \gamma_3^2 \cos^2 q}{(\gamma_1 + \gamma_2 + 2\gamma_3 \cos q)} + \dot{q} L \frac{(\gamma_2 + \gamma_3 \cos q)}{(\gamma_1 + \gamma_2 + 2\gamma_3 \cos q)} - \frac{1}{2} L^2 \frac{1}{(\gamma_1 + \gamma_2 + 2\gamma_3 \cos q)}. \quad (12)$$

Rouhan equation [6] for positional coordinate occurs

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial R}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial R}{\partial q} = M \quad (13)$$

Substituting (12) to (13) we obtain

$$\ddot{q} \frac{\gamma_1 \gamma_2 - \gamma_3^2 \cos^2 q}{(\gamma_1 + \gamma_2 + 2\gamma_3 \cos q)} + \dot{q}^2 \frac{\gamma_3 \sin q (\gamma_1 + \gamma_3 \cos q) (\gamma_2 + \gamma_3 \cos q)}{(\gamma_1 + \gamma_2 + 2\gamma_3 \cos q)^2} + L^2 \frac{\gamma_3 \sin q}{(\gamma_1 + \gamma_2 + 2\gamma_3 \cos q)^2} = M. \quad (14)$$

Being linearized in neighborhood of statement  $q = 0$  equation (14) will take on form:

$$\ddot{q} \frac{\gamma_1 \gamma_2 - \gamma_3^2}{(\gamma_1 + \gamma_2 + 2\gamma_3)} + q L^2 \frac{\gamma_3}{(\gamma_1 + \gamma_2 + 2\gamma_3)^2} = M. \quad (15)$$

In the absence of control moment in joint  $M = 0$  equation (10) takes on form of harmonic oscillator

$$\ddot{q} + \omega^2 q = 0, \quad (16)$$

where proper frequency is determined by correlation

$$\omega = \sqrt{\frac{\gamma_3}{(\gamma_1 \gamma_2 - \gamma_3^2) (\gamma_1 + \gamma_2 + 2\gamma_3)}} L. \quad (17)$$

In case of  $\gamma_1 = \gamma_{11}, \gamma_2 = \gamma_{21}, \gamma_3 = \gamma_{31}$  expressions (9) - (17) evidently coincide with corresponding expressions for manipulator on movable foundation mentioned in [1].

In case of  $\gamma_1 = \gamma_{12}, \gamma_2 = \gamma_{22}, \gamma_3 = \gamma_{32}$  expressions (9) - (17) represent cyclic integral (9), Rouhan function (12), independent dynamic equation of relative motion (14) and linearized independent dynamic equation of relative motion (15) for manipulator on hinged foundation received at present paper.

### Conditions of equivalence of loading diagrams

It is evident from coincidence of expression shape (8) – (17) that relations (7) are conditions of equivalence of loading diagrams on consideration, in expanded form appearing as

$$\begin{aligned} J_1^{(1)} + \tilde{m}l_1^{(1)2} &= J_1^{(2)} + m_1^{(2)}l_0^2 + m_2^{(2)}(l_0 + l_1^{(2)})^2, \\ J_2^{(1)} + \tilde{m}l_2^{(1)2} &= J_2^{(2)} + m_2^{(2)}l_2^{(2)2}, \\ \tilde{m}l_1^{(1)}l_2^{(1)} &= m_2^{(2)}(l_0 + l_1^{(2)})l_2^{(2)}. \end{aligned} \quad (18)$$

For example, when foundation is hinged at center of mass conditions (18) may be written in the form of

$$\begin{aligned} J_1^{(1)} &= J_1^{(2)}, \\ l_1^{(1)} &= l_1^{(2)}, \\ l_2^{(1)} &= l_2^{(2)}, \\ \tilde{m} &= m_2^{(2)}. \end{aligned} \quad (19)$$

Fulfillment of conditions (18) (or (19) at particular case) means that at equal initial conditions and equal control action  $M$  systems of two solid bodies linked by ideal one-degree of freedom rotary joint will execute identical motions along coordinates  $\varphi_1$  and  $q$  for cases of movable and hinged foundation.

At the same time system center of mass is stationary relative to inertial coordinates  $XCY$  in case of movable foundation (Fig. 1), and system center of mass is in motion relative to coordinates  $XOY$  in case of hinged foundation (Fig. 2) under the action of reaction force in joint  $O$  outside against the system (for the case (19) evidently directed along straight passing through joint  $O$  and center of mass  $C_2$  of body 2 at every instant).

### Conclusion

Formal approach to acquisition of independent dynamic equation in the form of Routhan equation, which was proposed at [1-2] conformably to model problem of research of plane motion of two-link hinged manipulator free in inertial space, where this problem has pictorial applied interpretation (space manipulator on movable foundation [3-4]), is realized conformably to the same analytical model for the case of hinged foundation.

Received results had shown mechanical equivalence of analytical models under consideration from the point of view of identical motions along coordinates  $\varphi_1$  and  $q$ ; at the same time relevant equivalence conditions having the appearance of relations between mass and lag parameters and geometrical parameters should be performed. At the same time motions of centers of mass of systems will be different.

Obtained results provide a possibility of most sophisticated comparative analysis of cases of hinged manipulator foundation, the more typical for ground robotics, and of foundation movable at inertial space, the more typical for space robotics.

1. Belonozhko P.P. Research of Plane Inertial Motions of Space Manipulator on Movable Foundation as Nonlinear Oscillation System. // "Robotics and Engineering Cybernetics", № 4(13) 2016. – P. 52 – 58.
2. Belonozhko P.P. Methodical Features of Acquisition of Independent Dynamic Equation of Relative Movement of One-Degree of Freedom Manipulator on Movable Foundation as Control Object // Smart Electromechanical Systems: The Central Nervous System. Studies in Systems, Decision and Control 95. Andrey E. Gorodetskiy, Vugar G. Kurbanov (ed.) – Springer International Publishing Switzerland, 2017 – P. 261 – 270. 10.1007/978-3-319-53327-8\_19
3. Belonozhko P.P. Promising Assembly and Service Robotic Space Modules. // Robotics and Engineering Cybernetics 2015. . – № 2(7). – P. 18 – 23.
4. Belonozhko P.P. Space Robotics. Current State, Prospective Problems, Development Trends. Analytical survey. // Science and Education. Bauman Moscow State Technical University. E-zine 2016. № 12. P. 110 153. DOI: 10.7463/1216.0853919.
5. Smol'nikov B.A. Problemy mekhaniki i optimizatsii robotov [Problems of mechanics and optimization of robots]. Moscow, Nauka Publ., 1991. 232 p. (in Russian)
6. Lurie A.I. Analiticheskaya mekhanika [Analytical Mechanics]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1961. 824 p. (in Russian)

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ОДНОСТЕПЕННЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ НА ПОДВИЖНОМ И ШАРНИРНО ЗАКРЕПЛЕННОМ ОСНОВАНИИ**

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва,  
byelonozhko@mail.ru*

### **Аннотация**

Показано, что в отсутствие внешних сил и моментов независимое уравнение динамики относительного движения одностепенного манипулятора имеет один и тот же вид для случаев подвижного и шарнирно закрепленного основания. При выполнении определенных условий, имеющих вид соотношений между массо-инерционными и геометрическими параметрами сопоставляемых расчетных схем, имеет место их эквивалентность в смысле одинаковых движений по соответственным координатам. Рассмотренная модельная задача представляет интерес с точки зрения анализа особенностей плоских инерционных движений манипулятора с целью их использования при построении управления.

Ключевые слова: одностепенный манипулятор, уравнение динамики относительного движения, подвижное основание, шарнирно закрепленное основание, эквивалентность расчетных схем.

### **Введение**

В [1–2] в форме уравнения Рауса получено независимое уравнение динамики относительного движения одностепенного космического манипулятора на подвижном основании для случая отсутствия внешних сил и моментов. Выполнен качественный анализ плоских инерционных движений, выделены существенно различающиеся режимы – колебания и круговращения. Несмотря на модельный характер задачи, важной особенностью которой являются возможность качественного аналитического исследования и наглядной интерпретации результатов, полученное уравнение предполагает также непосредственное прикладное использование при исследовании, например, некоторых режимов движения монтажно-сервисных автономных роботизированных космических модулей [3–4].

В [5] применительно к вопросу об использовании собственных инерционных движений манипулятора при построении управления рассматривается свободное движение шарнирного двухзвенника – одностепенного манипулятора на шарнирно закрепленном основании. Динамика манипулятора описывается системой дифференциальных уравнений, описывающих абсолютное движение основания и относительное движение груза. Независимое уравнение динамики относительного движения в [5] не используется. В докладе показано, что такое уравнение может быть получено, при этом движение груза относительно шарнирно закрепленного основания с точностью до выражений для коэффициентов описывается тем же уравнением, что и динамика относительного движения одностепенного манипулятора на подвижном основании.

### **Модельная задача. Кинетическая энергия**

Рассмотрим плоское движение системы двух твердых тел 1 и 2 (основания и груза), связанных идеальным одностепенным вращательным шарниром для случаев подвижного и шарнирно закрепленного основания.

На рис. 1 представлен случай подвижного основания. Массы тел 1 и 2 соответственно –  $m_1^{(1)}$  и  $m_2^{(1)}$ ,  $J_1^{(1)}$  и  $J_2^{(1)}$  – моменты инерции тел 1 и 2 соответственно относительно их центров масс  $C_1$  и  $C_2$ ,  $l_1^{(1)}$  и  $l_2^{(1)}$  – расстояния от центров масс тел до шарнира. Рассматривается движение по отношению к не вращающейся система координат  $ХСУ$  с началом в центре масс системы  $С$  (рис. 1), которая в отсутствие действия на систему внешних сил и моментов будет инерциальной. Положение системы по отношению к  $ХСУ$  определяется углом  $\varphi_1$ , характеризующим абсолютное движение основания (рис. 1), и шарнирным углом  $q$  (рис. 1), характеризующим движение груза относительно основания.

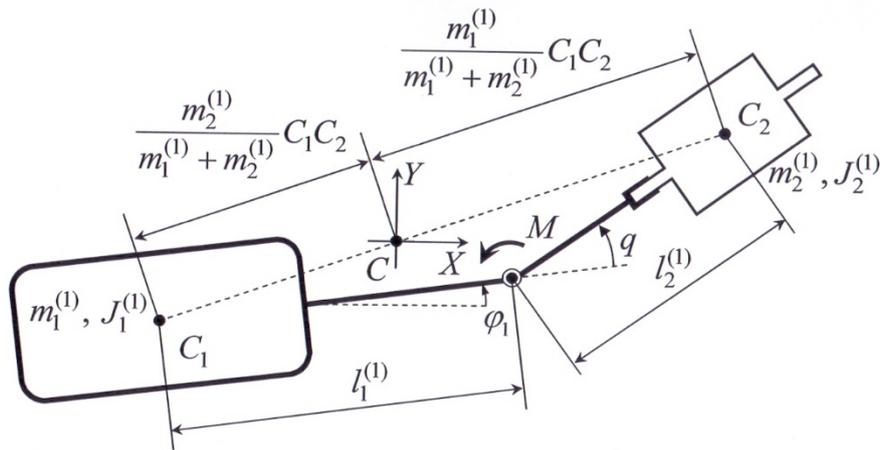


Рисунок 1 – Одностепенный манипулятор на подвижном основании

Выражение для кинетической энергии системы как квадратичной формы независимых обобщенных координат  $\varphi_1$  и  $q$  имеет вид

$$T^{(1)} = \frac{1}{2} \dot{\varphi}_1^2 \left( J_1^{(1)} + J_2^{(1)} + \tilde{m} l_1^{(1)2} + \tilde{m} l_2^{(1)2} + 2\tilde{m} l_1^{(1)} l_2^{(1)} \cos q \right) + \dot{\varphi}_1 \dot{q} \left( J_2^{(1)} + \tilde{m} l_2^{(1)2} + \tilde{m} l_1^{(1)} l_2^{(1)} \cos q \right) + \frac{1}{2} \dot{q}^2 \left( J_2^{(1)} + \tilde{m} l_2^{(1)2} \right), \quad (1)$$

где 
$$\tilde{m} = \frac{m_1^{(1)} m_2^{(1)}}{m_1^{(1)} + m_2^{(1)}}.$$

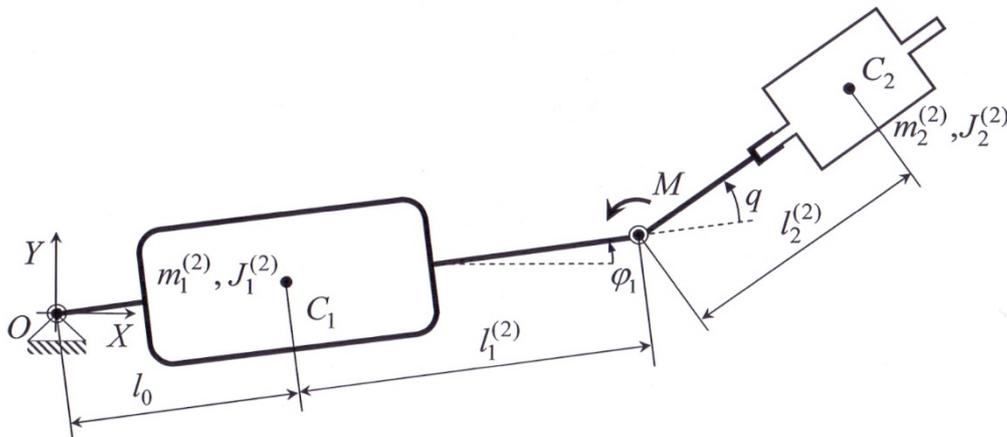


Рисунок 2 – Одностепенный манипулятор на шарнирно закрепленном основании

На рис. 2 представлен случай шарнирно закрепленного основания. Массы тел 1 и 2 соответственно –  $m_1^{(2)}$  и  $m_2^{(2)}$ ,  $J_1^{(2)}$  и  $J_2^{(2)}$  – моменты инерции тел 1 и 2 соответственно относительно их центров масс  $C_1$  и  $C_2$ ,  $l_1^{(2)}$  и  $l_2^{(2)}$  – расстояния от центров масс тел до шарнира,  $l_0$  – расстояние от идеального вращательного шарнира  $O$ , при помощи которого основание (тело 1) закреплено в начале неподвижной инерциальной системы координат  $XOY$ , по отношению к которой рассматривается движение системы, до центра масс основания  $C_1$ . Положение системы по отношению к  $XOY$  также определяется углом  $\varphi_1$ , характеризующим абсолютное движение основания (рис. 2), и шарнирным углом  $q$  (рис. 2), характеризующим движение груза относительно основания.

Выражение для кинетической энергии системы как квадратичной формы независимых обобщенных координат  $\varphi_1$  и  $q$  имеет вид

$$T^{(2)} = \frac{1}{2} \dot{\phi}_1^2 \left( J_1^{(2)} + J_2^{(2)} + m_1^{(2)} l_0^2 + m_2^{(2)} (l_0 + l_1^{(2)})^2 + m_2^{(2)} l_2^{(2)2} + 2m_2^{(2)} (l_0 + l_1^{(2)}) l_2^{(2)} \cos q \right) + \dot{\phi}_1 \dot{q} \left( J_2^{(2)} + m_2^{(2)} l_2^{(2)2} + m_2^{(2)} (l_0 + l_1^{(2)}) l_2^{(2)} \cos q \right) + \frac{1}{2} \dot{q}^2 \left( J_2^{(2)} + m_2^{(2)} l_2^{(2)2} \right). \quad (2)$$

С точностью до используемых обозначений и принятых допущений выражение (2) совпадает с выражением для кинетической энергии, приведенным в [5].

В обоих рассматриваемых случаях в шарнире, связывающем основание и груз, приложен управляющий момент  $M$  (рис. 1 и 2).

Обозначим

$$\gamma_{11} = J_1^{(1)} + \tilde{m} l_1^{(1)2}, \gamma_{21} = J_2^{(1)} + \tilde{m} l_2^{(1)2}, \gamma_{31} = \tilde{m} l_1^{(1)} l_2^{(1)}. \quad (3)$$

Тогда выражение для кинетической энергии (1) примет вид

$$T^{(1)} = \frac{1}{2} \dot{\phi}_1^2 (\gamma_{11} + \gamma_{21} + 2\gamma_{31} \cos q) + \dot{\phi}_1 \dot{q} (\gamma_{21} + \gamma_{31} \cos q) + \frac{1}{2} \dot{q}^2 \gamma_{21}. \quad (4)$$

Обозначим

$$\gamma_{12} = J_1^{(2)} + m_1^{(2)} l_0^2 + m_2^{(2)} (l_0 + l_1^{(2)})^2, \gamma_{22} = J_2^{(2)} + m_2^{(2)} l_2^{(2)2}, \gamma_{32} = m_2^{(2)} (l_0 + l_1^{(2)}) l_2^{(2)}. \quad (5)$$

Тогда выражение для кинетической энергии (2) примет вид

$$T^{(2)} = \frac{1}{2} \dot{\phi}_1^2 (\gamma_{12} + \gamma_{22} + 2\gamma_{32} \cos q) + \dot{\phi}_1 \dot{q} (\gamma_{22} + \gamma_{32} \cos q) + \frac{1}{2} \dot{q}^2 \gamma_{22}. \quad (6)$$

Легко видеть, что, с точностью до обозначений (3) и (5), выражения (4) и (6) совпадают. Введем единые обозначения для коэффициентов (3) и (5), являющихся функциями массо-инерционных параметров соответствующих расчетных схем

$$\gamma_{11} = \gamma_{12} = \gamma_1, \quad \gamma_{21} = \gamma_{22} = \gamma_2, \quad \gamma_{31} = \gamma_{32} = \gamma_3. \quad (7)$$

Тогда выражение для кинетической энергии примет вид

$$T = \frac{1}{2} \dot{\phi}_1^2 (\gamma_1 + \gamma_2 + 2\gamma_3 \cos q) + \dot{\phi}_1 \dot{q} (\gamma_2 + \gamma_3 \cos q) + \frac{1}{2} \dot{q}^2 \gamma_2. \quad (8)$$

Таким образом, с точностью до обозначений (3) и (5), выражения для кинетической энергии совершающей плоское движение системы двух твердых тел, связанных идеальным одностепенным вращательным шарниром, для случаев подвижного и шарнирно закрепленного основания имеют вид (8).

### Уравнения динамики относительного движения в форме уравнения Рауса

Из (8) очевидно, что в отсутствие внешних сил и моментов координата  $q$  является позиционной, а координата  $\phi_1$  – циклической. Имеет место циклический интеграл

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\phi}_1} = \dot{\phi}_1 (\gamma_1 + \gamma_2 + 2\gamma_3 \cos q) + \dot{q} (\gamma_2 + \gamma_3 \cos q) = L = const, \quad (9)$$

где  $L$  – кинетический момент системы.

Из (9) выразим циклическую скорость  $\dot{\phi}_1$

$$\dot{\phi}_1 = \dot{\phi}_1(\dot{q}, q, L) = -\dot{q} \frac{(\gamma_2 + \gamma_3 \cos q)}{(\gamma_1 + \gamma_2 + 2\gamma_3 \cos q)} + L \frac{1}{(\gamma_1 + \gamma_2 + 2\gamma_3 \cos q)}. \quad (10)$$

Подставив (10) в (8), получим выражение для кинетической энергии системы как функции позиционной скорости  $\dot{q}$ , позиционной координаты  $q$  и кинетического момента  $L$

$$T^*(\dot{q}, q, L) = [T(\dot{\phi}_1, \dot{q}, q)]_{\dot{\phi}_1 = \dot{\phi}_1(\dot{q}, q, L)} = \frac{1}{2} \dot{q}^2 \frac{\gamma_1 \gamma_2 - \gamma_3^2 \cos^2 q}{(\gamma_1 + \gamma_2 + 2\gamma_3 \cos q)} + L^2 \frac{1}{(\gamma_1 + \gamma_2 + 2\gamma_3 \cos q)}. \quad (11)$$

Запишем выражение для функции Рауса [6]

$$\begin{aligned} R &= R(\dot{q}, q, L) = T^*(\dot{q}, q, L) - \dot{\phi}_1(\dot{q}, q, L) \cdot L = \\ &= \frac{1}{2} \dot{q}^2 \frac{\gamma_1 \gamma_2 - \gamma_3^2 \cos^2 q}{(\gamma_1 + \gamma_2 + 2\gamma_3 \cos q)} + \dot{q} L \frac{(\gamma_2 + \gamma_3 \cos q)}{(\gamma_1 + \gamma_2 + 2\gamma_3 \cos q)} - \frac{1}{2} L^2 \frac{1}{(\gamma_1 + \gamma_2 + 2\gamma_3 \cos q)}. \end{aligned} \quad (12)$$

Уравнение Рауса [6] для позиционной координаты имеет вид

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial R}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial R}{\partial q} = M. \quad (13)$$

Подставив (12) в (13), получим

$$\ddot{q} \frac{\gamma_1 \gamma_2 - \gamma_3^2 \cos^2 q}{(\gamma_1 + \gamma_2 + 2\gamma_3 \cos q)} + \dot{q}^2 \frac{\gamma_3 \sin q (\gamma_1 + \gamma_3 \cos q)(\gamma_2 + \gamma_3 \cos q)}{(\gamma_1 + \gamma_2 + 2\gamma_3 \cos q)^2} + L^2 \frac{\gamma_3 \sin q}{(\gamma_1 + \gamma_2 + 2\gamma_3 \cos q)^2} = M. \quad (14)$$

Будучи линеаризовано в окрестности положения  $q = 0$ , уравнение (14) примет вид:

$$\ddot{q} \frac{\gamma_1 \gamma_2 - \gamma_3^2}{(\gamma_1 + \gamma_2 + 2\gamma_3)} + q L^2 \frac{\gamma_3}{(\gamma_1 + \gamma_2 + 2\gamma_3)^2} = M. \quad (15)$$

В отсутствие управляющего момента в шарнире  $M = 0$  уравнение (10) принимает вид уравнения гармонического осциллятора

$$\ddot{q} + \omega^2 q = 0, \quad (16)$$

где собственная частота определяется соотношением

$$\omega = \sqrt{\frac{\gamma_3}{(\gamma_1 \gamma_2 - \gamma_3^2)(\gamma_1 + \gamma_2 + 2\gamma_3)}} L. \quad (17)$$

В случае  $\gamma_1 = \gamma_{11}, \gamma_2 = \gamma_{21}, \gamma_3 = \gamma_{31}$  выражения (9) – (17), очевидно, совпадают с соответствующими выражениями для манипулятора на подвижном основании, приведенными в [1].

В случае  $\gamma_1 = \gamma_{12}, \gamma_2 = \gamma_{22}, \gamma_3 = \gamma_{32}$  выражения (9) – (17) представляют полученные в настоящей работе циклический интеграл (9), функцию Рауса (12), независимое уравнение динамики относительного движения (14), и линеаризованное независимое уравнение динамики относительного движения (15) для манипулятора на шарнирно закрепленном основании.

#### Условия эквивалентности расчетных схем

Из совпадения формы выражений (8) – (17) следует, что соотношения (7) есть условия эквивалентности рассматриваемых расчетных схем, в развернутой форме имеющие вид

$$\begin{aligned} J_1^{(1)} + \tilde{m} l_1^{(1)2} &= J_1^{(2)} + m_1^{(2)} l_0^2 + m_2^{(2)} (l_0 + l_1^{(2)})^2, \\ J_2^{(1)} + \tilde{m} l_2^{(1)2} &= J_2^{(2)} + m_2^{(2)} l_2^{(2)2}, \\ \tilde{m} l_1^{(1)} l_2^{(1)} &= m_2^{(2)} (l_0 + l_1^{(2)}) l_2^{(2)}. \end{aligned} \quad (18)$$

Например, при шарнирном закреплении основания в центре масс ( $l_0 = 0$ ), условия (18) могут быть записаны в виде

$$\begin{aligned} J_1^{(1)} &= J_1^{(2)}, \\ l_1^{(1)} &= l_1^{(2)}, \\ l_2^{(1)} &= l_2^{(2)}, \\ \tilde{m} &= m_2^{(2)}. \end{aligned} \quad (19)$$

Выполнение условий (18) (или (19) в частном случае) означает, что при одинаковых начальных условиях и одинаковом управляющем воздействии  $M$  системы двух твердых тел, связанных идеальным одноступенным вращательным шарниром, для случаев подвижного и шарнирно закрепленного основания будут совершать одинаковые движения по координатам  $\varphi_1$  и  $q$ . При этом центр масс системы в случае подвижного основания (рис. 1) неподвижен относительно инерциальной системы координат  $XSY$ , а центр масс системы в случае шарнирно закрепленного основания (рис. 2) движется относительно системы координат  $XOY$  под действием внешней по отношению к системе силы реакции в шарнире  $O$  (для случая (19), очевидно, в каждый момент времени направленной вдоль прямой, проходящей через шарнир  $O$  и центр масс  $C_2$  тела 2).

#### Заключение

Предложенный в [1–2] применительно к модельной задаче исследования плоского движения свободного в инерциальном пространстве шарнирного двухзвенника, имеющей при определенных допущениях наглядную прикладную интерпретацию (космический манипулятор на подвижном основании [3–4]) формальный подход к получению независимого уравнения динамики в форме уравнения Рауса, реализован применительно к той же расчетной схеме для случая шарнирно закрепленного основания.

Полученные результаты показали механическую эквивалентность (при выполнении соответствующих условий эквивалентности, имеющих вид соотношений между массо-инерционными и геометрическими параметрами) рассматриваемых расчетных схем в смысле одинаковых движений по координатам  $\varphi_1$  и  $q$ . При этом движения центров масс систем будут различными.

Полученные результаты дают возможность более глубокого сопоставительного анализа случаев закрепленного основания манипулятора, более характерного для наземной робототехники, и основания подвижного в инерциальном пространстве, более характерного для робототехники космической.

1. Белоножко П.П. Исследование плоских инерционных движений космического манипулятора на подвижном основании как нелинейной колебательной системы // «Робототехника и техническая кибернетика», № 4(13) 2016. – С. 52 – 58.
2. Belonozhko P.P. Methodical Features of Acquisition of Independent Dynamic Equation of Relative Movement of One-Degree of Freedom Manipulator on Movable Foundation as Control Object // Smart Electromechanical Systems: The Central Nervous System. Studies in Systems, Decision and Control 95. Andrey E. Gorodetskiy, Vugar G. Kurbanov (ed.) – Springer International Publishing Switzerland, 2017 – P. 261 – 270. 10.1007/978-3-319-53327-8\_19
3. Белоножко П.П. Перспективные монтажно-сервисные роботизированные космические модули // Робототехника и техническая кибернетика. 2015. – № 2(7). – С. 18 – 23.
4. Белоножко П.П. Космическая робототехника. Современное состояние, перспективные задачи, тенденции развития. Аналитический обзор. // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2016. № 12. С. 110 153. DOI: 10.7463/1216.0853919.
5. Смольников Б.А. Проблемы механики и оптимизации роботов. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. – 232 с.
6. Лурье А. И. Аналитическая механика / А. И. Лурье. — М. : Физматгиз, 1961. — 824 с.

*V.N. Kazantsev, V.A. Pavlov*

## **TERMINOLOGY AND APPROACHES TO A DEFINITION OF MODULAR ROBOT STRUCTURE**

*RTC, St. Petersburg,  
kazantsev@rtc.ru*

### **Abstract**

A general approach to an interpretation of the existing terminology and to an application of the service robot component modularity classifications is considered. Concepts of the modular robot architecture development are considered from positions of the component and functional approaches. A brief overview of the morphotronic methods being developed currently and the contact & channel method used for the robots structural design is presented.

Keywords: robot, modularity, module, modular robot architecture.

*В.Н. Казанцев, В.А. Павлов*

## **ТЕРМИНОЛОГИЯ И ПОДХОДЫ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ МОДУЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ РОБОТОВ**

*ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург,  
kazantsev@rtc.ru*

### **Аннотация**

Рассмотрен общий подход к интерпретации существующей терминологии и применению классификаций модульности компонентов сервисных роботов. Концепции разработки модульной архитектуры роботов рассмотрены с позиций компонентного и функционального подходов. Представлен краткий обзор разрабатываемых в настоящее время методов морфотроники и контактно-канального метода для структурного проектирования роботов.

Ключевые слова: робот, модульность, модуль, модульная архитектура робота.

В международном стандарте [1], выпущенном тремя международными организациями ИСО, МЭК и IEEE, дано следующее определение модульности: «Модульность (modularity): качество, при котором

система или компьютерная программа состоит из таких дискретных компонентов, у которых изменения в одном компоненте оказывают минимальное влияние на другие компоненты». Такие компоненты и являются модулями в соответствии с определением из проекта международного стандарта ИСО [2]: «Модуль (module): компонент с особыми свойствами, обеспечивающими удобство проектирования, интероперабельность, легкость реконfigurирования, простоту интеграции и т.д.». Например, при проектировании модуль может рассматриваться в виде «чёрного ящика», для интеграции модуль должен иметь доступные интерфейсы, а интероперабельность обеспечивается унификацией и стандартизацией интерфейсов. При этом любые изменения, производимые внутри «чёрного ящика», никак не влияют или оказывают минимальное влияние на работу других модулей системы.

Существуют несколько классификаций модулей. По функциональному признаку модули подразделяются на основные, вспомогательные, специальные и адаптивные [3]. Кроме того, модули могут быть необходимыми и возможными.

*Основные модули* являются необходимыми для системы и должны обязательно присутствовать в системе, например, манипулятор робота. Они реализуют основные функции системы непосредственно или в комбинации с другими модулями.

*Вспомогательные модули* реализуют вспомогательные функции системы, поддерживающие выполнение основных функций, которые реализуются основными модулями, например модули, обеспечивающие энергообеспечение или смазку. Вспомогательные модули включаются в систему вместе с обслуживаемыми ими основными модулями. Вспомогательные модули, как правило, являются необходимыми.

*Специальные модули* создаются для реализации функций, специфичных для конкретных задач, которые не относятся к функциям, присущим системе для всех случаев ее применения, например, захватное устройство манипулятора, предназначенное для работы с конкретным типом объектов. В данной классификации специальные модули являются возможными модулями, т.к. они являются возможными дополнительными аксессуарами для основных модулей.

*Адаптивные модули* реализуют функции адаптации к другим системам или ограничивающим условиям. Характеристики адаптивных модулей не полностью фиксируются заранее и, следовательно, позволяют их настраивать в зависимости от конкретных условий применения, например модули, обеспечивающие изменение клиренса мобильного робота в зависимости от условий местности. Адаптивные модули могут быть как необходимыми, так и возможными.

Отдельно в данной классификации выделяются компоненты, специфичные для конкретного заказчика, которые не реализуются модулями, входящими в базовое исполнение модульной системы. Такие специфические функции могут быть реализованы не в модульном исполнении.

По структурному признаку модули классифицируются на базовые (входные, обрабатывающие, выходные и инфраструктурные), составные (состоят из нескольких базовых модулей) и главные (состоят из нескольких базовых и/или составных модулей, являются аналогом основных модулей по функциональной классификации) [2]. Модули могут быть аппаратными и/или программными.

*Входной модуль* (input module): тип модуля, предназначенный для сбора информации и данных, сигналов или команд, которые необходимы для эффективного функционирования модуля, робота или системы роботов. Например, сенсоры систем осязания или модули ввода команд пользователя. Базовые входные программные модули соответствуют базовым входным аппаратным модулям. Примерами базовых программных модулей являются модули, воспринимающие сигналы от дальномеров и телевизионных камер, воспринимающие сигналы от тактильных датчиков, воспринимающие звуковые сигналы, модули ввода данных от пользователя и т.д.

*Выходной модуль* (output module): тип модуля, предназначенный для выработки и/или доставки информации и данных, сигналов, энергии, мощности или работы, которые необходимы для эффективного функционирования робота или системы роботов. Например, исполнительные приводы для перемещения робота или части робота. Более сложные модули исполнительных приводов, включающие сенсоры, драйверы, микропроцессорные узлы и силовую электронику, относятся к составным выходным модулям.

*Обрабатывающий модуль* (processing module): тип модуля, предназначенный для преобразования данных, сигналов и информации в соответствии с назначением модуля. Например, часть аппаратных средств, необходимых для поддержки выполнения алгоритмов и предоставления инфраструктуры системам управления исполнительными устройствами. Обрабатывающим программным модулям не требуется доступ к аппаратным модулям через слой абстракции, т.к. они реализуют только вычислительные алгоритмы, например, планирование траектории, решение задачи обратной

кинематики, фильтрация, математические расчеты, навигация, программы распознавания и т.д. Обработывающие программные модули могут быть как базовыми, так и составными модулями в зависимости от их сложности. Обработывающие программные модули получают входные данные от входных программных модулей и посылают выходные данные выходным программным модулям.

*Инфраструктурный модуль (infrastructure module):* тип модуля, реализующий основные возможности и сервисы, необходимые для конфигурирования и реконфигурирования модулей робота при создании конкретных реализаций робота. Примерами аппаратных инфраструктурных модулей являются блок питания, шина питания, шина данных или механический корпус. К программным инфраструктурным модулям относится промежуточное программное обеспечение (middleware). Интеллектуальный источник питания робота является составным инфраструктурным модулем.

Общие абстрактные определения и наименования модулей конкретизируются при описании модульной архитектуры конкретного класса роботов. Классификация модулей по функциональному признаку разработана для машиностроительной продукции и мало пригодна для описания структуры систем. Структурная классификация модулей в большей степени ориентирована на описания модулей различных систем и подсистем робота, но использовать её для описания модульной структуры механических устройств достаточно сложно. При определении модульной структуры роботов целесообразно использовать обе классификации.

Общей технологии проектирования модульной архитектуры роботов в настоящее время не существует. Сформированы скорее различные для аппаратных средств и программного обеспечения роботов подходы, принципы и некоторые вспомогательные методы структурного анализа.

Для разработки модульной архитектуры аппаратных средств используются компонентный и/или функциональный подходы. При *компонентном подходе* структура изделия описывается с помощью так называемой «Матрицы структурного проектирования» (англ. Design Structure Matrix, DSM), представляющей собой обычную матрицу смежности, расширенную столбцом и строкой входных и выходных воздействий [4]. Заголовки столбцов и строк матрицы соответствуют входам и выходам компонентов, расположенных на главной диагонали матрицы. Связи компонентов в ячейках матрицы инструментальными программными средствами DSM классифицируются по типам связей: механическая, гидравлическая и т.д. Матрица, составленная, например, из главных компонентов робота, может быть декомпозирована простой вставкой вместо компонента на главной диагонали соответствующей этому компоненту DSM матрицы. Декомпозиция выполняется до уровня типовых технических решений и заимствованных компонентов.

В целях структурного анализа матрица DSM приводится к треугольному виду для расслоения структуры связей между компонентами. Операция преобразования, в силу разреженности структурных матриц, выполняется методом уплотнения. Все связи исходной матрицы сохраняются, но столбцы или строки треугольной матрицы будут соответствовать определённому слою в структуре компонентов робота. Обратные связи при уплотнении остаются симметричными относительно главной диагонали матрицы. Для определения модулей в структуре робота используется операция кластеризации компонентов. Например, сформировав метрику оценки связности группы компонентов с другими элементами структуры робота и используя генетические алгоритмы, можно определить группы компонентов с минимальной внешней связностью, которые и будут являться возможными вариантами модулей в структуре изделия. Применение матрицы DSM для определения модульной архитектуры особенно эффективно при большом количестве компонентов в составе робота. Метод DSM поддерживается инструментальными средствами Loomo, Cambridge Advanced Modeller, Lattix Enterprise Suite и другими программными инструментами.

*Функциональное модульное проектирование архитектуры* применяется для анализа состава функций, реализующих требования технического задания и декомпозиции функций на подфункции (операции) с целью определения состава модулей, реализующих функционал проектируемого робота. Для функционального модульного проектирования разработан метод развёртывания функции модульности (англ. Modular Function Deployment, MFD) [5], основу которого составляет построение специальной морфологической таблицы, называемой «Матрица идентификации модулей» (англ. Module Identification Matrix, MIM). Заголовки столбцов таблицы содержат наименования *независимых друг от друга функций* проектируемого изделия и типов модулей (базовый, составной, главный), реализующих эти функции. Заголовки строк таблицы содержат следующий перечень факторов, влияющих на возможность реализации функции в изделии в виде отдельного модуля:

1. Компонент или система не будут перепроектироваться в течение жизненного цикла робота (заимствованное техническое решение или необходимость в серьёзных инвестициях в технологии

производства). В некоторых случаях, компоненты или системы ожидаемо будут модифицироваться и для сохранения модульной архитектуры изделия их также следует объединить в отдельный модуль.

2. Существует несколько вариантов реализации функции с различными спецификациями, учитывающих различные требования заказчика и вероятные их изменения. Возможно создание одного унифицированного модуля или ряда модулей с унифицированными интерфейсами.

3. Функция реализуется компонентом, используемым во всех изделиях модельного ряда.

4. Существующий технологический процесс позволяет реализовать функцию в виде отдельного модуля.

5. Функция реализуется унифицированным или заимствованным компонентом, прошедшим испытания перед поставкой.

6. Компоненты объединяются в один модуль для облегчения технического обслуживания, ремонта и замены.

7. Заказчику предоставляется возможность самостоятельно вносить изменения в изделие путём замены модуля.

8. Компоненты объединяются в один модуль для облегчения или обеспечения безопасности утилизации.

Перечень факторов модульности зависит от назначения проектируемого изделия и может уточняться. В матрице идентификации модулей каждой функции изделия выставляется экспертная оценка степени использования факторов модульности. Функции с наибольшими суммарными оценками отбираются для их реализации в виде отдельных модулей. Отобранные модули являются опорными точками для дальнейшего проектирования модульной архитектуры изделия. Для функций, отобранных для реализации в виде отдельных модулей, разрабатываются матрицы ММ с подфункциями второго уровня иерархии и т.д. В результате формируется иерархическое дерево модулей. Листьями дерева являются типовые (заимствованные) технические решения или новые компоненты, дальнейшая декомпозиция которых на подфункции нецелесообразна. Разработка модульной архитектуры является итерационной процедурой, чередующей подходы к проектированию «сверху-вниз» и «снизу-вверх». Функциональный подход разработки модульной архитектуры сервисных мобильных роботов базируется на поведенческих моделях целевого назначения робота. Например, для медицинских роботов на передний план при проектировании модульной архитектуры выступают оценки риска и минимизация возможного ущерба здоровью.

Во многих случаях из-за сложности и новизны проектируемого изделия обобщённую архитектуру системы составить экспертным путём с достаточной степенью достоверности не представляется возможным. Подход к формальному синтезу обобщённой архитектуры систем рассмотрен в [6], где предложена многомерная модель для моделирования сложных систем, получившая наименование «морфотроника», которая является некоторым обобщением понятия «мехатроника». Слагаемое «морфо» в словосочетании означает форму, структуру, сеть, организацию и вместе со словом «мехатроника» определяет некоторую структуру, состоящую из мехатронных устройств. В теории морфотроники предлагается новый класс преобразований для определения оптимальных взаимодействий, которые связывают идеальную коммуникационную модель системы с внешними контекстными условиями. С использованием аппарата неевклидовой геометрии разработан инструментарий контекстного моделирования и определения операций проектирования идеальной структуры системы, являющейся прообразом обобщённой архитектуры. Концепция морфотроники базируется на теории бондграфов [7]. В теории бондграфов физические процессы в системе любой природы описываются процессами перераспределения энергии в анализируемой системе. Вводится обобщённая система характеристик. Например, обобщённому потоку в морфотронике соответствуют линейная и угловая скорости в механических системах, сила тока в электрических системах, объём расхода в гидравлических и пневматических системах; обобщённому усилию соответствуют сила и крутящий момент в механике, напряжение в электротехнике и давление в гидравлике. Аналогично вводятся и другие обобщённые характеристики. Таким образом, используя принципы теории бондграфов можно с единых позиций описать процессы в смешанных системах, состоящих из механических, электронных, гидравлических и других устройств. Причём этот подход распространяется и на описание динамических систем с использованием хорошо известного в теории управления метода пространства состояний. Бондграфы строятся не на общих рассуждениях, а на строгом формальном выводе с изменениями компонентов тензора преобразования в соответствии с переменными моделируемой системы. Энергетические модели могут быть полезны для описания обобщённых

структур роботов космического назначения и роботов, предназначенных для функционирования в нескольких средах.

Одним из подходов, дополняющий обычные методы проектирования архитектур роботов, является функциональный подход, разрабатываемый Институтом проектирования изделий (ИРЕК) Технологического университета Карлсруэ. В публикации [8] представлены следующие основные понятия разработанного в ИРЕК контактно-канального подхода (Contact & Channel Approach) для комплексного моделирования функций, релевантных физическим свойствам механических систем.

*Рабочие поверхности* (Working Surfaces, WS) формируются парами (Working Surface Pairs, WSP) всех попарных интерфейсов между компонентом и его окружением. Это может быть твердая поверхность тела или границы с поверхностями жидкостей, газов или полей, которые находятся в постоянном или случайном контакте с рабочей поверхностью. Они принимают участие в обмене энергией, материалами и информацией в рамках технической системы.

*Канальные и опорные конструкции* (Channel and Support Structures, CSS) представляют собой физические компоненты, объемы жидкостей, газов или пространственных поддерживающих полей, которые соединяют только две рабочие поверхности пар.

*Ограничивающие поверхности* (Limiting Structures, LS) являются поверхностями, которые не участвуют в выполнении функций рассматриваемой системы, но являются потенциальными рабочими поверхностями.

Для моделирования мехатронных систем с динамическими структурами контактно-канальный подход дополняется конструкциями унифицированного языка моделирования UML2 инструментальной среды инженерного проектирования систем SysML, разработанной в 2007 году группой OMG. В ИРЕК для SysML разработано расширение ССА, позволяющее моделировать функциональную архитектуру системы с использованием контактно-канального подхода. Функциональные компоненты контактно-канального подхода последовательно моделируются на диаграммах деятельности, диаграммах компонентов и связываются с физическими системами. В работе [9] подробно обсуждается синтез сустава руки гуманоидного робота Armar III с использованием контактно-канального подхода. На первом этапе проектирования была создана укрупнённая функциональная структура для передачи движения и энергии от локтевого сустава к кисти робота с обратной связью о выполняемых движениях. На втором этапе было найдено принципиальное решение задачи передачи движения в любом направлении и спроектирован двухканальный прототип сустава. На третьем этапе описана функциональная архитектура изделия. Канальные конструкции  $CSS_i$ , характеризующие функциональное назначение компонентов, сопрягаются через попарные интерфейсы  $WSP_j$  и формируют матрицу DSM. Весовой фактор  $I_{CSS}$  каждого компонента в ячейке матрицы рассчитывался в зависимости от веса коэффициента  $W_{WSP}$  функционального взаимодействия компонента с другим компонентом и весовых факторов  $S_{CSS}$  компонентов, участвующих во взаимодействии. Модульность конструкции оценивалась по индексу удовлетворения конструкции требованиям модульности, т.е. минимальной связности с компонентами, не входящими в состав модулей. Кластеризация элементов в исходной DSM матрице выполнена с использованием генетического алгоритма. Были выявлены четыре кластера, которые в дальнейшем стали конструктивными модульными компонентами сустава руки робота. Применение контактно-канального подхода позволяет представить мехатронные устройства роботов в виде системы компонентов, имеющих входы и выходы и использовать системное представление для разработки модульных конструкций.

Представленные в публикациях различные определения терминов, связанных с модульным подходом к разработке промышленной продукции, объясняются различными точками зрения к моделированию модульных структур. Например, с функциональной точки зрения реализация функций в виде отдельных модулей эквивалентна обеспечению минимальной связности модулей с другими компонентами с точки зрения структурного подхода. Структурный подход предполагает менее жёсткие требования к модульной архитектуре промышленной продукции и поэтому представляется более приемлемым для использования при проектировании модульных роботов.

1. ISO/IEC/IEEE 24765:2010 Systems and software engineering – Vocabulary.
2. ISO/NP 22166-1:2016 Robotics – Modularity for service robots – Part 1: General requirements.
3. G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen, K.-H. Grote Engineering design: a systematic approach. – 3rd ed, Springer, 2007.
4. T.R. Browning, Applying the Design Structure Matrix to System Decomposition and Integration Problems: A Review and new Directions. – IEEE Transactions on Engineering Management, Vol. 48, No. 3, August 2001.

5. Erixon G. The chart of Modular Function Deployment. - Centre for Industrial Engineering at Dalarna University, Stockholm, 1998.
6. Resconi G., Chaczko Z. Morphotronic System (theory). – Computer Aided Systems Theory/EUROCAST, 2009.
7. Воронин А.В. Моделирование мехатронных систем.- Томский ПУ, 2008.
8. Albers A., Zingel C. Extending SysML for Engineering Designers by Integration of the Contact & Channel – Approach (C&C<sup>2</sup>-A) for Function-Based Modeling of Technical Systems. - Procedia Computer Science, 16, 2013.
9. Albers A., Korkiat S., Sauter C., Burger W. A Method to define a Product Architecture Early in Product Development Using the Contact and Channel Model/ Proceedings of ICED 09, the 17th International Conference on Engineering Design, Vol. 5, Design Methods and Tools (pt. 1), Palo Alto, CA, USA, 2009.

*V.M. Kopylov*

## **A METHOD FOR MEASURING SMALL OSCILLATIONS OF SPACECRAFT PAYLOAD**

*Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics  
v.kopylov@rtc.ru*

### Abstract

Long flexible bodies' deformation and stress measuring is an important problem in aerospace engineering. Currently the main method of deformation measuring is photogrammetry. Photogrammetry mountings are not compact or portable, and cannot be installed onboard. It is possible to use force-torque sensors for stress measuring, but they can't separate oscillatory and translational movement, which is important for control system. In this paper a way to measure deformations and stress in flexible body, firmly fixed on the spacecraft, is suggested. This method is based on combination of direct interferometric distance measuring and following mathematical processing using a finite element body model. Finite element convolution by modal analysis or Craig-Bampton method allow to derive a relation between deformations and stresses of any finite element of body and generalized oscillation coordinates of all body. Since the number of generalized coordinates corresponds to the number of natural frequencies, and usually does not exceed 20, it becomes possible for a relatively small number of measurements to determine a complete picture of the fluctuations. For these measurements it is suggested to use a Michelson scheme interferometer with multiple measuring arms and one base arm. The basic method's equations, the scheme of the device and its approximate characteristics is provided.

Keywords: long flexible parts, observations spacecraft, interferometer, mode shape.

*V.M. Копылов*

## **СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ КОЛЕБАНИЙ ПОЛЕЗНОЙ НАГРУЗКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

*ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург  
v.kopylov@rtc.ru*

### Аннотация

Измерение деформаций и усилий, возникающих при колебаниях протяженных упругих тел, является важной задачей в механике аэрокосмических объектов. Основным методом определения деформаций в настоящее время является фотограмметрия. Установки для фотограмметрии не являются компактными, и не могут использоваться на борту управляемого объекта. Для определения упругих сил могут использоваться силомоментные датчики, однако они не позволяют разделить колебательную и поступательную составляющие движения, что важно для управления. В данной статье предложен подход к измерению деформаций и усилий в упругом теле, закрепленном на жестком объекте (например, космическом аппарате), с помощью комбинации прямых интерферометрических измерений расстояния и последующей математической обработки с использованием конечно-элементной модели тела. Свертка конечно-элементной модели с помощью частотного анализа или методом Крайга-Бамптона позволяет получить связь деформаций и усилий, возникающих в любом конечном элементе тела, с обобщенными координатами колебаний всего тела. Так как число обобщенных координат

соответствует числу собственных частот, и обычно не превосходит 20, появляется возможность по относительно малому числу замеров определить полную картину колебаний. Для этих измерений предлагается использовать интерферометр схемы Майкельсона с несколькими измерительными и одним базовым плечом. Приведены основные расчетные соотношения метода, схема прибора и его ориентировочные характеристики.

Ключевые слова: протяженные упругие элементы, КА наблюдения, интерферометр, форма колебаний.

### **Введение**

В настоящее время существует множество космических аппаратов (КА) наблюдения, в составе которых используются протяженные упругие элементы. Как правило, к таким элементам относятся солнечные батареи и основной инструмент наблюдения (телескопическая система для КА наблюдения в оптическом диапазоне, панели радиоинтерферометра для КА радиоразведки, рефлекторы для КА ретрансляции и радиотелескопов, и т.д.). При ужесточении угловой точности позиционирования КА со стороны системы управления возникают высокочастотные колебания, которые могут войти в резонанс с собственными частотами конструкции. Таким образом, одним из основных технических противоречий при проектировании КА наблюдения является усиление колебаний конструкции при увеличении частоты и точности работы системы управления движением, а также при увеличении размеров инструмента наблюдения. Опубликован ряд работ ([1], [2]), позволяющих учесть колебания инструмента наблюдения (например, антенны, рефлектора или корпуса телескопа) в алгоритмах управления КА. Общими недостатками этих работ, затрудняющими их практическое использование, являются отсутствие в настоящее время способа получения необходимых данных о колебаниях системы в реальном времени, и достаточно сложная математическая обработка входного сигнала, связанная с решением многомерной вариационной задачи (что, обычно, невозможно осуществить средствами бортового компьютера).

Существуют способы минимизации или учета погрешностей, вносимых колебаниями инструмента наблюдения. Чаще всего применяются следующие решения:

*Применение композитов с малым КЛТР.* Композитные материалы с малым коэффициентом линейного термического расширения (углерод-углеродные композиции типа ВКУ-39 с КЛТР~2мкм/м/°С [3],[4]), разработанные специально для космического применения, позволяют значительно снизить роль температурных деформаций. Их применение позволило достичь существенного улучшения основных технических характеристик КА. Однако такие материалы достаточно дороги, а их внедрение требует освоения сложной и дорогостоящей технологии изготовления. Фактически, в РФ существует единственное предприятие, способное проводить весь спектр работ с такими материалами - ЦНИИСМ, г. Хотьково. Несмотря на значительное улучшение температурной размеростабильности, данные материалы не обеспечивают полной компенсации температурных деформаций, и не компенсируют упругие деформации, вызванные усилиями органов управления КА.

*Конструктивные меры увеличения жесткости* Для конструкций, испытывающих значительные термические нагрузки, применяют различные защитные экраны, снижающие градиент температуры. Существует множество способов увеличения жесткости конструкции. Любые конструктивные меры защиты увеличивают массу изделия, как правило пропорционально квадрату характерного размера. Таким образом, применение конструктивных мер сильно ограничено.

*Использование высокоточных звездных датчиков* На некоторых ответственных элементах полезной нагрузки КА возможно закрепление высокоточных звездных датчиков, позволяющих определить угловое рассогласование между различными площадками с точностью до 3 угловых минут, при шуме порядка 0,5 угловой минуты (например, датчики БОКЗ-М, ИКИ РАН [5]). Такие измерения могут проводиться с частотой до 10Гц, что позволяет получить актуальную картину колебаний рабочего элемента, и учесть результаты измерений при обработке результата наблюдения или в алгоритмах управления КА. Применение данного способа ограничено, во-первых, высокой стоимостью звездных датчиков, во-вторых, достаточно большой массой ЗД. При текущем уровне развития техники масса оптической головки ЗД составляет не менее 0,5-1,5кг, что не позволяет устанавливать ЗД на поверхности раскрываемых рефлекторов и антенн, масса которых в целом может быть менее 100кг, с учетом крепления и системы расфиксации. В настоящее время ЗД устанавливаются на жесткие антенные панели, фазированные решетки и объективы оптических средств наблюдения. Как правило, такие элементы имеют 3-5 главных мод колебаний (без учета первых шести мод, соответствующих

колебаниям свободного тела), что позволяет по показаниям нескольких датчиков получить картину деформации всего упругого элемента.

*Использование лазерных целеуказателей с датчиком-мишенью.* Современные датчики положения луча могут определять отклонение луча лазерного указателя апертурой до 9мм с точностью до 0,75мкм. При характерном размере оцениваемого объекта в 3-6м это соответствует точности измерений  $\pm 0,5..1,0$ мм. При этом угловые перемещения измеряемого объекта ограничены областью  $\pm 2,5..5$  угловых минут, что соответствует точности измерений с помощью звездных датчиков. Перемещения вне узкого диапазона углов не могут быть измерены прецизионным датчиком. Использование лазерных целеуказателей требует прокладки кабелей питания и управления непосредственно на измеряемом элементе, что вносит погрешности в модель жесткости элемента, в результате возникают погрешности при расчете формы колебаний всего элемента. Кроме того, вес лазерного целеуказателя (порядка 0,1кг) также остается существенным для размещения таких систем на легких рефлекторах (например, аналогичных используемым в КА системы "Луч").

*Использование алгоритмов пост-обработки изображений.* При наличии большого числа изображений какой-либо эталонной мишени возможно определить среднюю величину аберраций оптики, и скорректировать ее программным путем. Этот способ применяется, в основном, в астрономии, так как в качестве эталона удобно использовать изображение звезды или Солнца, имеющее заранее известные форму, размеры и другие характеристики. При наблюдении за наземными объектами использование такого способа практически невозможно, так как один и тот же участок земной поверхности в различные моменты наблюдения может быть виден с разными условиями освещенности, облачности, в разные сезоны и т.п. Кроме того, из-за возмущений орбиты КА невозможно добиться точного совпадения центров и ориентации двух различных снимков. В системах ретрансляции использование данного способа невозможно.

В данной статье предложен способ точного измерения координат опорных точек поверхности инструмента наблюдения КА, а также способ восстановления по этим координатам полной картины колебаний при известной модели упругости, а также вариант конструкции прибора для реализации этого способа. При этом учитывались ограничения, характерные для космической техники - малые жесткость и масса исследуемой конструкции, ограниченные запасы мощности на борту, неопределенность световой обстановки, ограниченность габаритов самого прибора.

### Малопараметрическая модель упругого тела

Любое упругое тело может быть представлено в виде набора конечных элементов - "балок", положение которых описывается шестикомпонентным вектором  $R_i$ , соответствующим 6 степеням свободы в трехмерном пространстве. Р.Крэйг и М.Бамптон разработали метод "свертки" конечно-элементной модели упругого тела [6], позволяющий определить собственные частоты колебаний тела, и связать колебания на каждой из собственных частот с перемещениями конечных элементов (то есть, с колебаниями векторов  $R_i$ ). Для каждой "балки" можно получить матрицу форм колебаний, описывающую связь между обобщенной координатой колебаний  $q$  на определенной собственной частоте и вектором  $R_i$ .

$$R_i[6 \times 1] = F_i[6 \times n] \cdot q[n \times 1] \quad (1)$$

Зная модальный вклад (эквивалентная масса, приходящаяся на каждую из собственных частот колебаний), можно получить матрицу связи усилий и деформаций  $AB[6 \times n]$ . Первые три столбца этой матрицы соответствуют силам упругих колебаний, а вторые три – моментам. Алгоритм вычисления матрицы представлен формулами (2)

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ \vdots \\ Y_i \\ Y_s \end{bmatrix}; \quad Y_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \Delta z & -\Delta y \\ 0 & 1 & 0 & -\Delta z & 0 & \Delta x \\ 0 & 0 & 1 & \Delta y & -\Delta x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T, \quad (2)$$

$$AB[6 \times n] = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = Y^T [6 \times s] M [s \times s] F [s \times n]$$

где  $Y$  - матрица смещений,  $s$  - число конечных элементов, полная матрица форм  $F$  формируется из матриц  $F_i$ , так что её столбцы содержат идущие подряд строки матриц  $F_i$  (кроме строки, соответствующей точке закрепления объекта, которая содержит нули), а строки соответствуют различным модам колебаний;  $M$  - диагональная матрица парциальных масс размерности  $[s \times s]$ . Матрицы  $F_i$  и  $M$  могут быть получены в результате частотного анализа в современных пакетах конечно-элементного моделирования, например COSMOS/M [7].

Уравнение колебаний упругого тела будет иметь вид(3)[8]

$$(\ddot{q} + \mu \cdot v \cdot \dot{q} / \pi + \mu^2 \cdot q) + (H \cdot A + \rho \times H \cdot B) \cdot \dot{\omega} + H \cdot B \cdot \dot{u} + I = 0, \quad (3)$$

где  $q$  – вектор обобщенных координат колебаний,  $\mu_i$  – диагональная матрица собственных частот колебаний,  $v_i$  – диагональная матрица логарифмических декрементов затухания для каждой из частот колебаний,  $H$  – матрица преобразования системы координат упругого элемента к глобальной системе,  $\rho$  - радиус-вектор точки закрепления в глобальной системе координат,  $I$  - инерционный член, соответствующий перемещению упругого элемента с ускорением,  $\omega$  - вектор угловой скорости,  $u$  - вектор линейной скорости.

Кроме того, матрица  $F$  может быть получена прямыми измерениями на объекте. Так как при колебаниях на резонансной частоте возбуждается преимущественно та форма колебаний, которая соответствует этой частоте, амплитуды перемещений и закруток каждого конкретного элемента будут пропорциональны членам матрицы  $F$  в строке, соответствующей заданной резонансной частоте испытаний. При рассмотрении только лишь задачи идентификации геометрической формы амплитуда вектора обобщенных координат может быть выбрана произвольно (например, интервал от -1 до 1 соответствует колебаниям на резонансной частоте). При рассмотрении задачи определения сил и моментов матрицы форм колебаний должны изначально определяться по математической модели, и затем уточняться по результатам виброиспытаний. При этом амплитуда компоненты вектора обобщенных координат определяется равенством амплитуд левой и правой части выражения

$$\|\dot{q}\| = \|H \cdot B \cdot \dot{u}\|, \quad (4)$$

следующего из (2) и (3), где  $R$  - вектор обобщенных нагрузок (сил и моментов). Для упрощения вычислений возмущающие моменты задаются равными нулю, в этом случае матрица  $Y$  состоит только из единичных элементов, и калибровка матриц форм сводится к вычислению коэффициента пропорциональности, уравнивающего выражение (4) для не-единичной матрицы  $M$ . Диагональная матрица парциальных масс может быть определена по измеренным силам реакции, возникающим на резонансных режимах. Однако расчетно-экспериментальный способ определения характеристик исследуемого объекта требует гораздо меньшего числа измерений, и потому является предпочтительным. Определение координат конкретных точек исследуемой поверхности при испытаниях можно получить прямыми измерениями с использованием стенда обезвешивания.

### Алгоритм измерений

Таким образом, зная в каждый момент времени значение вектора обобщенных координат объекта  $q$ , можно получить полную картину колебаний - как геометрическую, так и силовую. Очевидно, для определения вектора  $q$  необходимо провести одномоментно  $n$  замеров различных параметров колеблющегося объекта. Допустим, производятся замеры смещения точек на поверхности объекта вдоль определенных направлений  $V_i$  (каждая точка контролируется вдоль одного направления визирования). Матрица  $T_i$ , задающая такой поворот глобальной системы координат, чтобы ось  $Ox$  глобальной системы координат объекта совместилась с  $V_i$ , может быть получена из кватерниона оптимального поворота. Соответствующие преобразования даны формулами (5)[9]:

$$V_i = [x_i \quad y_i \quad z_i]^T$$

$$\Lambda_i = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2} + x_i}{2\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}} \\ 0 \\ -z_i \sqrt{\frac{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - x_i \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}}{2}} \\ y_i \sqrt{\frac{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - x_i \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}}{2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{i0} \\ \lambda_{i1} \\ \lambda_{i2} \\ \lambda_{i3} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$T_i = \begin{bmatrix} \lambda_{i0}^2 + \lambda_{i1}^2 - \lambda_{i2}^2 - \lambda_{i3}^2 & 2(\lambda_{i1}\lambda_{i2} - \lambda_{i0}\lambda_{i3}) & 2(\lambda_{i1}\lambda_{i3} + \lambda_{i0}\lambda_{i2}) \\ 2(\lambda_{i1}\lambda_{i2} + \lambda_{i0}\lambda_{i3}) & \lambda_{i0}^2 + \lambda_{i2}^2 - \lambda_{i1}^2 - \lambda_{i3}^2 & 2(\lambda_{i2}\lambda_{i3} - \lambda_{i0}\lambda_{i1}) \\ 2(\lambda_{i1}\lambda_{i3} - \lambda_{i0}\lambda_{i2}) & 2(\lambda_{i2}\lambda_{i3} + \lambda_{i0}\lambda_{i1}) & \lambda_{i0}^2 + \lambda_{i3}^2 - \lambda_{i1}^2 - \lambda_{i2}^2 \end{bmatrix},$$

где  $\Lambda_i$  – кватернион оптимального поворота от оси  $Ox$  глобальной системы координат к вектору  $V_i$ ,  $T_i$  – матрица Родригеса для этого кватерниона.

Таким образом, для определения компонент вектора  $q$  достаточно решить систему линейных уравнений (6):

$$\begin{cases} (T_1 F_1 q)_x = |V_1(t)| - |V_1(0)| \\ (T_2 F_2 q)_x = |V_2(t)| - |V_2(0)| \\ (T_n F_n q)_x = |V_n(t)| - |V_n(0)| \end{cases} \quad (6)$$

Перемещения всех конечных элементов модели после этого можно определить по формуле (1), а силы и моменты, возникающие в результате колебаний в точке закрепления упругого тела – по формулам (7).

$$Force(t-h) = H \cdot B \cdot \frac{q(t) + q(t-2h) - 2q(t-h)}{h^2}$$

$$Torque(t-h) = (H \cdot A + \rho \times H \cdot B) \cdot \frac{q(t) + q(t-2h) - 2q(t-h)}{h^2}, \quad (7)$$

где  $h$  – интервал измерений.

### Конструктивная реализация

Система, реализующая описанный выше метод измерений, должна обеспечивать:

- полную синхронность измерений;
- точность прямых измерений, обеспечивающую уверенное определение контролируемых отклонений;
- отсутствие влияния на жесткость исследуемого объекта (желательно - бесконтактное измерение).

Таким условиям отвечают интерферометрические методы измерения больших длин, основанные на применении схемы Майкельсона ([10], [11]). Для обеспечения одновременности измерений необходимо модифицировать схему Майкельсона так, чтобы она содержала одно базовое и  $n$  измерительных плеч. Оптическая схема прибора для измерения расстояний до  $n$  точек на поверхности колеблющегося тела, приведена на рисунке 1. Общий вид конструкции центрального блока прибора приведен на рисунке 2.

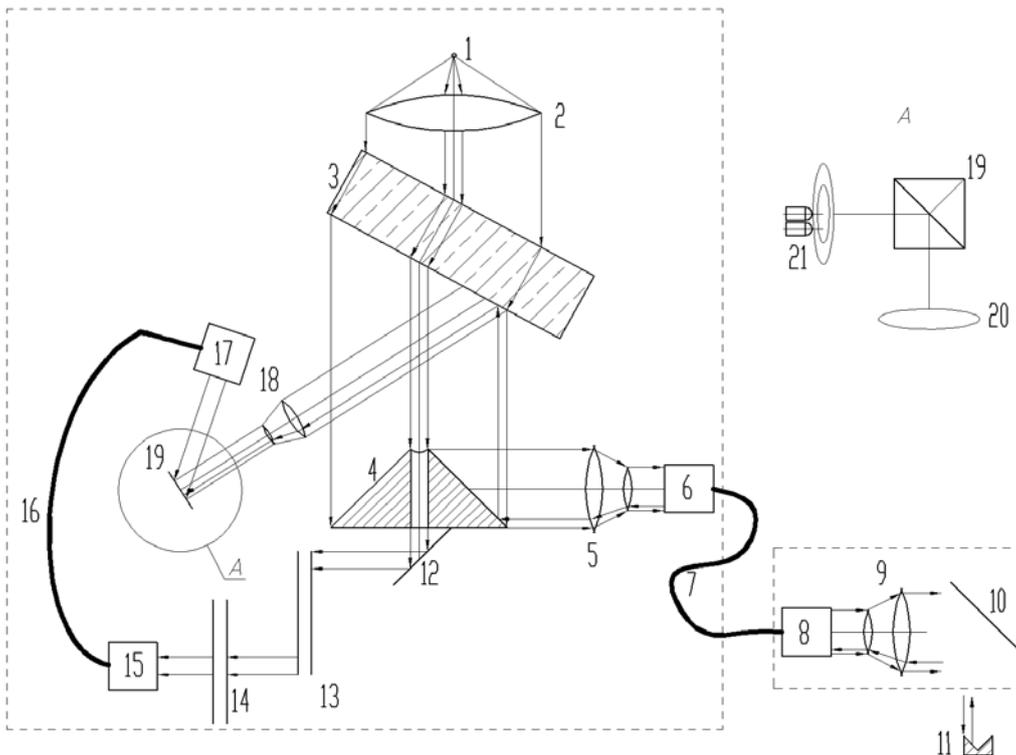


Рисунок 1 – Оптическая схема интерферометра

Стабилизированный лазерный диод 1 через объектив 2 освещает делительное зеркало 3, пройдя которое пучок света попадает на зеркальную пирамиду 4. Пирамида имеет  $n$  граней и центральное отверстие, таким образом осуществляя разделение потока излучения по фронту. Цилиндрические линзы 5 сжимают пучок по вертикали, приводя вытянутое трапецеидальное изображение к подобию квадрата, после чего излучение от каждой из граней пирамиды вводится коллиматором 6 в одномодовый оптоволоконный кабель 7, идущий к оптической головке. Во избежание изменений оптического пути луча в измерительном тракте все оптоволоконные кабели жестко закреплены на неподвижном объекте (им может быть корпус КА или рама с прибором). Пройдя коллиматор 8 и объектив 9, излучение попадает на зеркало 10, оснащенное двухступенным безлюфтовым приводом точного позиционирования. Примером такого привода может служить устройство с гибкими шарнирами для интерферометра ATLAS [12]. На выходе из оптической головки излучение направлено в сторону миниатюрного уголкового отражателя (апертурой 2-4 мм), закрепленного в контрольной точке. Изображение уголкового отражателя 11 возвращается на делительное зеркало 3, после чего попадает в объектив анализатора 18. Центральный луч из пирамиды 4 направляется зеркалом 12 в зеркальный коридор 13 (линию задержки). Зеркало 12 оснащено шаговым приводом, регулирующим угол входа излучения в коридор, и, соответственно, длину линии задержки. Оптоволоконная линия 15-17 обеспечивает уравнивание интенсивностей базового и отраженного от контрольной точки луча для обеспечения контрастной интерферометрической картины. Изменением ширины зеркального коридора 14 достигается регулировка длины базового плеча в пределах двойной толщины зеркального коридора. Делительный кубик 19 направляет излучение на светочувствительную матрицу 20 и на скоростные фотодиоды 21. Сигнал от светочувствительной матрицы используется для управления зеркалами оптических головок 10, с целью удержания изображения контрольной точки в центре картинной плоскости. Скоростные фотодиоды, установленные попарно, позволяют определить скорость и направление хода интерференционных кругов на изображении контрольной точки, и таким образом - относительное смещение контрольной точки.

Алгоритм работы прибора следующий:

1. По положению бликов отражателей 11 в картинной плоскости определяются требуемые воздействия на приводы зеркал 9, и изображения отражателей центрируются.
2. Считывается начальное значение длины линии задержки, и грубой настройкой коридора 13 устанавливается номинальное значение измеряемой длины для первой контрольной точки.

3. При плавном движении микрометрического винта зеркального коридора 14 производится счёт интерференционных полос до достижения "белого света" - исчезновения интерференционной картины. Этот момент соответствует полному равенству длин плечей интерферометра.

4. После запоминания точной настройки по одной точке измерения расстояния до нее продолжают, с учетом информации о перенастройке зеркального коридора. Производится настройка по остальным точкам.

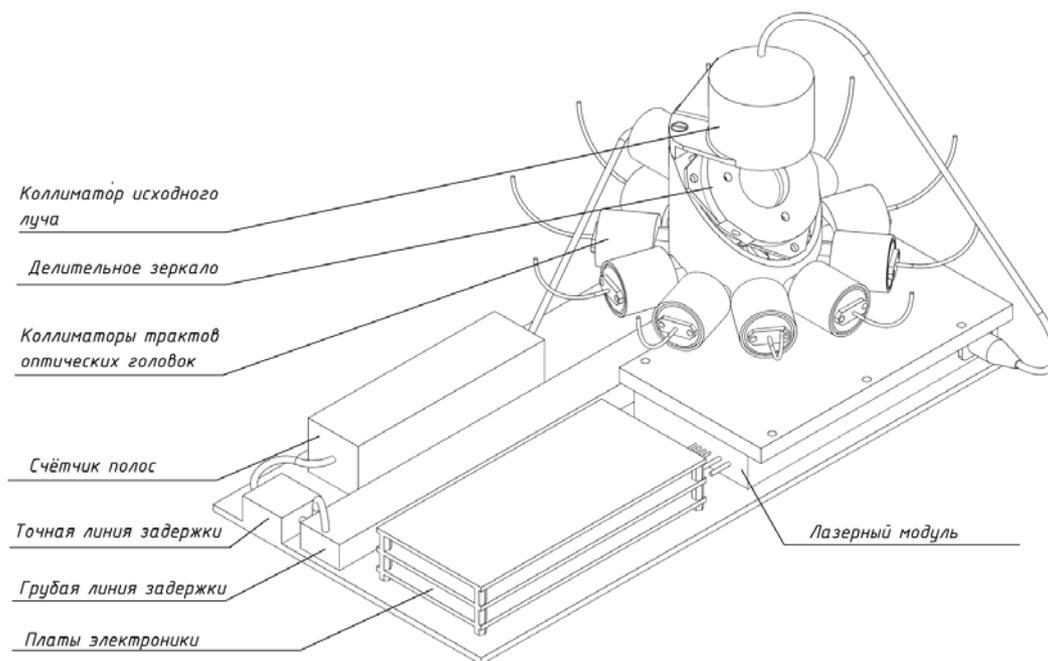


Рисунок 2 – Компоновка центрального блока прибора

### Оценка погрешностей

Источниками погрешности прибора являются:

- неопределенность длины линий задержки (неплоскостность зеркального коридора, погрешность отсчета ширины зеркального коридора);
- отклонение угла установки грани зеркальной пирамиды от 45°;
- погрешность измерения оптических длин оптоволоконных кабелей;
- погрешность, связанная с идентификацией границы интерференционного кольца;
- неточность определения характеристик модели объекта;
- пропуск колец при большой скорости движения цели;
- ограниченная длина когерентности лазера.

Погрешность угла установки грани пирамиды должна составлять не более, радиан

$$\varphi = \frac{\delta}{2A}, \tag{7}$$

где  $\delta$  - линейная погрешность, вносимая неточностью исполнения пирамиды,  $A$  - апертура луча.

Скорость движения объекта, при которой отсутствуют пропуски интерференционных колец на счетчике, составляет

$$V = 0.5 \cdot N \lambda,$$

где  $N$  - предельная частота срабатывания фотодиода,  $\lambda$  - длина волны измерительного луча. При характерной частоте работы скоростных фотодиодов порядка 1 МГц предельная скорость составит около 0,5 м/с, что достаточно для измерений относительного перемещения движущихся частей космических объектов.

Измерение оптических длин производится точными интерферометрами, погрешность которых составляет не более 1 мкм.

Точность изготовления зеркального коридора в линии задержки существенно влияет не только на точность прибора, но и на его габариты. Отклонение угла между зеркалами от нуля всего на 0,5 угловой минуты приводит к увеличению размеров линии задержки более, чем в 400 раз. Ход лучей в зеркальном коридоре рассчитывается итерационно, исходя из следующих соотношений:

$$L_{1x} = H_x \frac{\cos i}{\cos((2x+1)i + a)} \quad (x = 0..n) \quad (8)$$

$$L_{2x} = L_{1x} \frac{\cos(2xi + a)}{\cos(2(x+1)i + a)} \quad (x = 0..n) \quad (9)$$

$$D_x = L_{1x} \frac{\sin(2(2x+1)i + 2a)}{\cos(2(x+1)i + a)} \quad (x = 0..n) \quad (10)$$

$$H_x = H_{x-1} + D_x \tan i \quad (11)$$

где  $i$  - угол при вершине коридора,  $a$  - угол ввода излучения,  $L_{1x}$  - ход луча "до отражения",  $L_{2x}$  - ход луча "после отражения",  $D_x$  - длина участка коридора,  $x$  - номер отражения.

В соответствии с этими формулами, при плоскости пластины, на которую напылены зеркала, порядка  $\lambda/10$  и ширине зеркального коридора 12,5 мм рабочая длина коридора составит 238 мм, а требуемый шаг изменения угла ввода - 0,5 угловой минуты.

Точность измерения длины второй части линии задержки (коридора регулируемой ширины) может составлять порядка 10 мкм - величина, характерная для конструкций микрометров.

Ошибки, связанные с нечеткостью интерференционной картины, устраняются выбором источника света с длиной когерентности более 10 м.

Таким образом, определяющей составляющей погрешности является точность экспериментального определения матриц форм колебаний и диагональной матрицы парциальных масс.

Точность измерений расстояния до контрольных точек может быть достигнута на уровне 20 мкм при изготовлении корпусов оптических деталей по 5 и 6 квалитетам.

При этом мощность излучения лазера определяется исходя из обеспечения контрастности интерференционной картины на фоне засветки солнечными бликами. Яркость засветки может быть снижена с помощью "холодных" зеркал, отражающих только ИК-излучение, а также поляризационных фильтров, пропускающих только излучение, поляризация которого совпадает с поляризацией лазерного луча. Применение бленд в общем случае неэффективно, так как они не защищают от засветки во всем диапазоне углов, а пропуск нескольких минут наблюдения из-за засветки приведет к необходимости заново калибровать прибор. С учетом потерь на поглощение в волноводах и при отражении от зеркал, полезная мощность лазера должна составлять не менее 8,5 Вт на каждую контрольную точку. Таким образом, суммарная мощность системы будет составлять около 200-250 Вт, с учетом приводов, что составляет около 10-15% от мощности современных спутниковых средств наблюдения.

1. Ю.С.Мануйлов, С.В.Зиновьев, Ю.В.Прищепа, Е.Н.Алешин "Исследование динамической и энергетической совместимости системы позиционирования и управления угловым движением космической солнечной энергостанции". Известия высших учебных заведений. Приборостроение. №11, т.57, 2014.
2. Ю.Н. Горелов "Концепция локально автономного управления упругими космическими аппаратами" XII всероссийское совещание по проблемам управления, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. 2014
3. Е. В. Николаев, С. Л. Барботько, Н. П. Андреева, М. Р. Павлов, Д. В. Гращенков "Комплексное исследование воздействия климатических и эксплуатационных факторов на новое поколение эпоксидного связующего и полимерных композиционных материалов на его основе". Электронный научный журнал "Труды ВИАМ", №5, 2016г. ([http://viam-works.ru/ru/articles?art\\_id=963](http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=963))
4. Иванова К.Е., Соколов Д.А. "Исследование методов сохранения формы деталей из углерод-углеродного композиционного материала на режимах термохимической обработки". Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2014г.
5. Аванесов Г.А., Бессонов Р.В., Форш А.А., Куделин М.И. "Анализ современного состояния и перспектив развития приборов звездной ориентации семейства БОКЗ". Известия ВУЗ. Приборостроение., 2015г.
6. Roy R. Craig Jr., Mervyn C. C. Bampton "Coupling of Substructures for Dynamic Analysis". AIAA Journal, Vol. 6, No. 7, July 1968
7. Руководство пользователя COSMOS/M для UNIX, Windows NT и Windows 95. Версия 1.75, 1996 – 448с.
8. М.Г. Игнатъев, В.М. Копылов, А.Ю. Кулаков, М.В. Сотников. "Программный комплекс моделирования стабилизированного движения космического аппарата с трансформируемыми

- упругими элементами конструкции". Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева, №3/2013
9. В.Н. Бранец, И.П. Шмыглевский. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела. – М.: Наука, 1973. – 320с.
  10. Glantschnig F. "Digitale Langenmessgerate hoher Auflosing". Brown Boveri Mitteilungen, 1967, 54, Nr 4, S.172-179
  11. Ю.В. Коломийцов. "Интерферометры. Основы инженерной теории. Применение". Л:"Машиностроение", 1976. – 295с.
  12. Kenneth A. Blumenstock & others, "ATLAS Beam Steering Mechanism Lessons Learned". 43rd Aerospace Mechanisms Symposium, p.1-14, Santa Clara, CA, 2016

*V.P. Andreev, V.L. Kim, P.F. Pletenev*

## **THE PRINCIPLE OF THE FULL FUNCTIONALITY OF MODULES IN HETEROGENEOUS MODULAR MOBILE ROBOTS<sup>VI</sup>**

*MSTU "STANKIN", ML "Sensorica", IINET RSUH, Moscow  
andreevva@yandex.ru, top7733@gmail.com, cpp.create@gmail.com*

### **Abstract**

In the present work it is proposed to use the concept of full functionality of the modules to ensure operational reconfigurability of the heterogeneous modular robot. Usually the overall structure of the modular system consists of individual functional components – modules. We complement this structure with a requirement to consider each module as a standalone full-featured electronic or mechatronic device. The use of a network principle of construction of information-measuring and control system and *Ethernet* standards provides the organization of direct inter-module information interaction and the ability to operatively shape and alter the structure of the robot directly on the scene of the works and during the works themselves.

Keywords: mobile robot, modular robot, heterogeneous modular robot, robotic system, local area network, information-measuring and control system.

### **Introduction**

The separation of the overall structure of the system into individual functional components is one of the most modern approaches of robotic systems design and their versatility increase. Each component (module) performs only a particular specific part of the function of the entire device and only combination of modules decides the functionality of the final system. As the functionality of individual **modules** is limited, their structure is simpler and therefore easier to implement. If necessary, such a module can be replaced by a functionality-similar module or modified module. This is the **versatility of the modular systems**. There is no need to purchase or create a new robot instead just change some modules or add new ones. Therefore, modular systems can provide greater economic efficiency than conventional robots.

It can be considered that the beginning of use of the modular principle in industrial robotics refers to the 80-th years of the last century [1, 2]. The modular design in mobile robotics for the first time was offered at Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics (RTC, St. Petersburg) and first implemented in the Soviet Union in the framework of the first national five-year programs in robotics in the same '80s [3]. The serial production of standard components of the robots – electro-mechanical modules, control modules and modular system of software was created in the Soviet Union [4]. By the time of the Chernobyl accident (26 April 1986) a large number of projects of various modules had prepared at RTC. Thanks to this, a total of 15 mobile robots (MR) designed for various purposes were manufactured and put into operation within a couple of months. These robots operated in the disaster area to survey the local radiation situation and clean the buildings and territory from radioactive waste.

The second stage evolution of the modular mobile robotics can be attributed to the 90-th years of XX century. In the course of works of accident consequences elimination at the nuclear power plant, a new direction in modular robotics has been appeared – **reconfigurable modular robots**, i.e. robots with variable structure. The maximum uncertainty in terms of future work in case of emergency situations, accidents, catastrophes, and active countermeasures makes it no possible to determine in advance the composition and configuration of necessary robotics [3]. The use of reconfigurable modular robots gives the opportunity to form their structure and modify it directly on the place of the works and during the works themselves. Reconfiguration usually leads to a change in information-measuring and control system (IMCS) of the robotic system. Therefore, it is

necessary to find a principle of construction of modular robot IMCS, which would provide an automatic rebuild of all the structures of IMCS for the new structure and the configuration of the robot.

Another problem of providing reconfigurability is to develop means of mechanical, electrical and information interaction between the modules, i.e. the corresponding interfaces. Each interface must be on the one hand simple, and with another – universal. This will ensure the ease of assembly of the robot from the modules developed by different manufacturers in the same way as is done in computer technology. For example, it is easy to connect printers, scanners and other external devices of various manufacturers via the USB bus and appropriate drivers to a computer equipped with an appropriate operating system (OS). We consider that a modular robot needs to gather the same. At this stage of project the mechanical interface we are not yet considering.

### **Modern solutions in the modular mobile robotics**

Currently, modular mobile robots are divided into two types: *homogeneous* and *heterogeneous*. In *homogeneous* robots most of the modules are *identical in structure and functionality*. Essentially this is a technical analog of colonial organisms. The main objective of such systems is to provide autonomous reconfiguration and adaptation to any environmental conditions. Homogeneous robots are modular robots such as M-TRAN [5] (2002 – 2008), ATRON [6] (2006), Transmote [7] (2012).

Homogeneous modular robots have several unique properties that distinguish them among the diversity of mobile robots. Those properties are as follows:

- adaptation to different and sometimes extreme environmental conditions thanks to automatic reconfiguration;

- high failure resistance of individual modules during execution of work;
- scalability of modular systems.

To the disadvantages of homogeneous robots can be attributed:

- each module should have all equipment for movement and navigation;
- complexity of the coordinated control of a modular system;
- high requirements to the design and control system of the each module;

- system scalability is limited by the capabilities of software and hardware implementation of the modules.

In addition, when structure and functionality of all modules are the same, one module is usually different from the rest – this module is needed for a common control and communication with external supervisor.

A distinctive feature of *heterogeneous* robots is *the differentiation of modules according to their functionality*. Each module is responsible for its own limited set of tasks, so the modules in heterogeneous systems unequal. The heterogeneous robots can be exemplified by the modular robots such as Thor [8] (2013), SMART [9] (2012), and modular robot for space exploration [10] (2006).

Despite the lower level of autonomy of heterogeneous systems compared to homogeneous systems, many practical problems are solved more efficiently by systems with modules of different functionality. Heterogeneous modular robots have the following advantages:

- relatively low requirements to the control system of modules and their design;
- scalability of the robot is practically unlimited;
- the ability to perform a wide range of tasks;
- the ability to adapt to environmental conditions.

To the disadvantages of heterogeneous robots can be attributed:

- the complexity of automatic reconfiguration implementation;
- low failure tolerance of individual modules;
- the complexity of the coordinated control of all modules.

It should be noted that in the control system of considered homogeneous and heterogeneous mobile robots it is observed the presence of elements of distributed control.

From the position of creating mobile robots with variable structure, i.e. *reconfigurable modular robots*, focused on the use in case of extreme situations, we believe that to date heterogeneous robots have the advantage compared to *homogeneous* robots. Also we believe that the automatic reconfiguration of robot in general, while solving the aforesaid tasks is not actual, as it can be done manually, but automatic rebuilding of all structures of the robot IMCS to the new composition and configuration needs to be solved necessarily. Low failure resistance of individual modules is usually solved by duplicating the systems and the ability to quickly replace faulty modules by the same or modified. But such replacement requires the capability to quickly adapt the robot IMCS to its new structure. This leads to increase of the complexity of the coordinated control of all modules. Therefore, the desired solution of the robot IMCS should allow *the rapid reconfiguration of the robot*.

### The principle of the full functionality of modules

Each module should be a *fully functional electronic or mechatronic device* with its own information-measuring and control system – *the principle of distributed control*. This means that each module of the robot must be able to independently fulfill the task set by the module-supervisor (some control module). The module-supervisor forms the control goal, but verifies only the result of its achievement by executive module, not the process of task execution by the module. Therefore, each module of the robot needs to fulfill its mission in *any convenient to it way* – it follows that the module design must meet the functional purpose of the module, and the module IMCS must fully provide information and executive functionality. This functional completeness is **the main difference** of our solution from the considered heterogeneous robots where modules-supervisors control the operation of all modules *at the executive level*.

Consider the principle of functional completeness by the example of the transport module (Fig.1). Let the robot consists of the following modules: module-supervisor, transport module (TM) and sensor modules.

Module-supervisor receives from an external supervisor (e.g., human operator) common task. The software of module-supervisor breaks down the task into subtasks and distributes them to the appropriate modules. Module-supervisor sends to TM the control goal – a vector of desired robot position  $[X_G, Y_G, \varphi_G]^T$ , where  $X_G, Y_G$  – the robot characteristic point coordinates with respect to the fixed world coordinate frame,  $\varphi_G$  – the robot orientation angle. The transport module should **independently** achieve this target location, using the methods of control laid down in its control system, and information from its sensory systems.

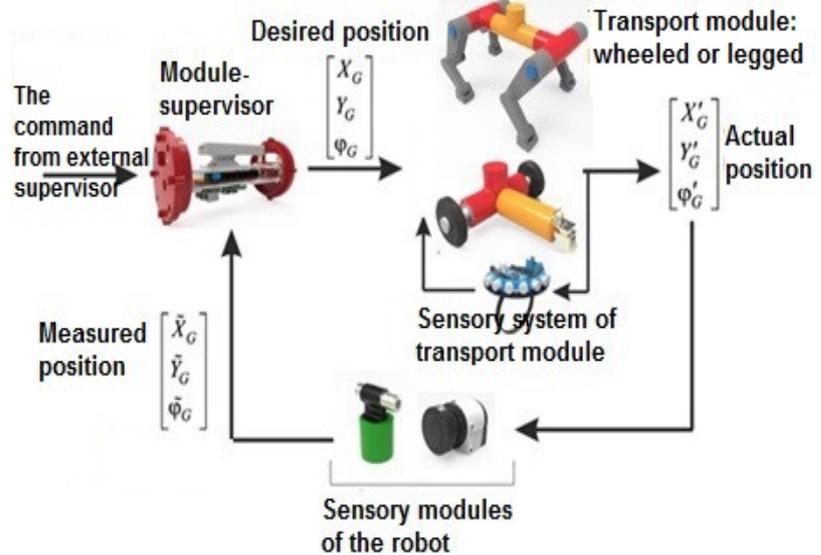


Figure 1 – Example of functional completeness of modules

The TM sensor system can

function as a separate module with a limited range of operation (for example, in the range of 5 ÷ 100 cm) and have information communication only with the CPU of the transport module, i.e. the sensor system is a part of the transport module IMCS. Due to the natural position errors of trajectory following by the transport module, its actual position, and therefore the position of whole robot, specified by the vector  $[X'_G, Y'_G, \varphi'_G]^T$ , will differ from the desired position. Here, the accuracy of achievement of the control goal is tested by the module-supervisor with the help of sensor modules of the robot. A sensor modules of the robot that use more sophisticated sensors (television, ultrasonic, infrared, etc.), provide affixment of the robot to the fixed world coordinate frame, for example, from landmarks in the environment. Comparing the vector of measured position  $[\tilde{X}_G, \tilde{Y}_G, \tilde{\varphi}_G]^T$  with desired, the module-supervisor if necessary, corrects the actual position of the robot, setting a new goal.

In this scheme, the transport module may be implemented as the wheeled, legged robot, or any other mobile platform, but it must accomplish the control goal given by a module-supervisor, regardless of its mechanical construction, the structure of the IMCS and the control algorithm of the module.

The *distributed control* based on the principle of full functionality is implemented. Such distributed control allows parallelizing the computational process of the robot target function executing by dividing the process into the functional subtasks and their distributing among the microprocessors of modules. Then the computer of module-supervisor performs only the following functions: splitting the process into functional sub-tasks, distribution of tasks between the modules, control of their execution, processes synchronization and the solution of behavioral tasks. In addition, the module-supervisor carries out information interaction with the external supervisor, for example, the operator of a mobile robot.

To implement such distributed control it's necessary to develop *a language of inter-module communication* and software that supports dynamic reconfiguration of the robot IMCS.

### The inter-module communication

Modern modular robots (homogeneous and heterogeneous) for inter-module communication, as a rule, use different serial bus: I2C – modules of RTC; CAN – in robots M-TRAN, SMART; IrDA (essentially RS-232) –

ATRON; RS-485 – in robots Thor, Odin. This decision was due to miniaturization of the modules and minimizing the number of contacts on the electrical and mechanical interfaces. Serial bus is used on the robot TRANSMOTE – it uses ZigBee wireless interface. The control system of such robots has only two options of work: to work out a set of simple rules that are placed into the ROM of module microcontroller, or to fulfill the commands of the external computer, which are supplied to the modules through any module, to the bus which this computer is connected (and therefore to the shared bus of modules). Then the role of inter-module interaction in such systems is to provide most rapid and effective transmission of commands of the executive or tactical level from an external computer to the modules and the back transfer of the sensors data. In this case, the information flow in the process of inter-module interaction is small, because on each module there are no sensors or many sensors cannot be installed. As a result, it is necessary basically to transmit only the executive level commands. In our design it is supposed to use a sensor system that contains a large variety of sensors, including multi-camera television, information flow which is very high. Listed interfaces do not have sufficient bandwidth.

It is proposed to organize inter-module communication via the interface, developed on the basis of Ethernet. It is a broadband, reliable and affordable interface. Its modification *for real-time* EtherCAT does not allow the creation of horizontal linkages – all inter-module communication must be through the "master" bus, which eliminates the possibility of *direct inter-module interaction*. Since the use of the principle of functional completeness of modules eliminates the need to transfer commands of the executive level, as noted previously, it is allowed more soft timing requirements of message delivery and the use of interfaces with the "soft real time".

Ethernet is not originally a bus – it uses the connection type "one to one". You can convert it into a "bus", if you set in the nodes a network switches, which add the ability to create connections (topology) of the type "one to many", thus providing two possible topologies: "bus" and "star". Both topologies have disadvantages - for topology "bus" it is required or use a lot of switches, or embedded in each electronic device several Ethernet interfaces, and for topology "star" it is necessary to run a large number of wires. Since in our case all the wired connections are restricted to small dimensions of the robot, we choose the topology of the star, which corresponds to a typical Ethernet network topology.

Currently, for control of dissimilar mechatronic devices the software framework Robotics Operating System (ROS) is widely used. However, a direct application of ROS is "heavy" – you need at least a computer running a full Linux OS, you must additionally set a large set of various software, which requires a high level of input use (for example, dialects of XML are using for the configuration).

In the modules of the robot the microcontrollers or, as a maximum, single board computers are typically used; ROS is not focused to work directly on the microcontroller. Therefore, we must create a software framework that would be compatible with ROS, but it would be easy to implement on embedded systems.

The choice of the Ethernet standard allows realizing the modular robot information-measuring and control system in the form of local area network, the nodes of which are IMCS of individual modules [11]. This approach will take such network properties as scalability and the ability to dynamically reconfigure to the modular structure of the robot. Experience in the development and long-term exploitation of the network training Internet laboratory convinces authors in the correctness of the choice made [12]. The method of geographically distributed control designed for the laboratory forms the basis of the method of inter-module information interaction.

The approach proposed in [12] is based on the library Zmq\_robot [13], which was based on ZMQ library. Library Zmq\_robot allows you to create software as for modules, and the control programs for a supervisor. However, this library has the same disadvantage that ROS – the complicated software that only runs on a full OS and not working on embedded systems must be installed on the device.

To solve this problem the method for specification of inter-module interaction, that takes into account the property of the full functionality of the modules was developed. For the organization of inter-module interaction we also propose to use the ZMQ library as the basis. But in an addition to the ZMQ the UDP protocol broadcast messages, which allows implementing a specification for embedded systems are used. Unlike ROS, in this software each module has a single interface that is common for all modules and provides general information about itself – the module name, its description, functional interfaces, etc.

The proposed approach of inter-module information interaction is based on the following postulates:

- the messaging is implemented over TCP and UDP using the so-called "network interfaces";
- the "metainterface" is used to perform common for all modules commands;
- the notion of metadata is introduced – a formalized description of the functions performed by modules;

- the possibility of using the different information encoding methods (JSON, BSON, etc.) and the network protocols were contemplated;
  - it is necessary to use the "human readable" languages configuration and data transfer (JSON, YAML, etc.);
- to describe the protocol it necessary to use the methods of the IETF, to achieve the same behavior of the software on different platforms.

### Conclusions

Currently, the principle of the full functionality is implemented in the existing laboratory prototype heterogeneous modular mobile robot, consisting of the network control module (module-supervisor), the wheeled transport module with short-range sensor system and the power supply module (the batteries). The focus at this stage was paid to ensuring the requirements of the full functionality of the transport module and the power supply module. The method for transport module motion planning nearby the nodal points with the artificial forces was proposed with assumption that the transport module sensory system consists only of the odometrical and ultrasonic sensors [14]. The robot information-measuring and control system implemented as a local area network *Ethernet* implements the inter-module information communication. Developed and implemented elements of the language of the inter-module communication for this limited minimal structure [15].

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, projects no. 16-07-00811a, 16-07-00935a и 16-07-01264a.

1. Industrial robotics / A. Babich, A.G. Baranov, I.V. Kalabin, etc. Under the editorship of J.A. Shifrin, M.: Mashinostroenie, 1982 – 415 p., ill.
2. Yu. G. Kozyrev, Industrial robots aggregate-modular type / Vorobyov E.I., Kozyrev, Y.G, Tsarenko, V.I. // ISBN: 5-217-00166-6. – M.: Mashinostroenie, 1988. – 240 p.
3. Lopota A.V., Yurevich E.I. Stages and prospects for the development of a modular principle for the construction of robotic systems / St. Petersburg State Polytechnical University Journal. – n.1, 2013 // Informatics. Telecommunications. Control. - SPb.: Publishing house of Polytechnic University, 2013. - C.98 - 103.
4. Yurevich E. I. Robots RTC at the Chernobyl nuclear power plant and the development of extreme robotics. – SPb.: Publishing house of Polytechnic University, 2003.
5. M-TRAN: selfreconfigurable modular robotic system / S.Murata, E.Yoshida, A.Kamimura, H.Kurokawa, K.Tomita, and S.Kokaji // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 7(4), 2002. – P. 432–441.
6. Design of the ATRON lattice-based self-reconfigurable robot / E.H.Østergaard, K.Kassow, R.Beck, and H.H.Lund // Autonomous Robots, 21(2), 2006. – P.165–183.
7. Design of Transmote: a Modular Self-Reconfigurable Robot with Versatile Transformation Capabilities / Guifang Qiao, Guangming Song, Jun Zhang, Hongtao Sun, Weiguo Wang, Aiguo Song // Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics – pp.1331-1336.
8. On sub-modularization and morphological heterogeneity in modular robotics / A.H.Lyder, K.Stoy, R.-F.Mendoza-Garcia, J.C.Larsen, and P.Hermansen // Intelligent Autonomous Systems 12, volume 193 of Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer Berlin Heidelberg, 2013. – P. 649-661.
9. Baca J. A heterogeneous modular robotic design for fast response to a diversity of tasks / J.Baca, M.Ferre, and R.Arakil // Robotics and Autonomous Systems, vol. 60, no.4, 2012. – P. 522–531.
10. Hancher M.D. A modular robotic system with applications to space exploration / Hancher M.D., Hornby G.S. // 2nd IEEE International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology (SMC-IT'06). - Pasadena, CA: Publisher «IEEE», 2006. – P. 132 - 140.
11. Andreev, V.P. The network solutions in architecture of heterogeneous modular mobile robots / Andreev V.P., Kim V.L., Poduraev Y.V. // Robotics and technical Cybernetics. ISSN 2310-5305. – 2016. – №3(12). – P. 23-29.
12. Andreev V.P., Kirsanov K.B. The technology of multi-operator control of mobile robots via the Internet / Proceedings of southern Federal University. Technical Sciences // ISSN 1999 9429. – Southern Federal University, Rostov-on-don: 2015. – №10(171). – P. 6 -17.
13. Kirsanov K. Software architecture of control system for heterogeneous group of mobile robots / 25th DAAAM Int. Symp. on Intelligent Manufacturing and Automation, 2014 // Procedia Engineering (2015) ISSN 1877-7058, 2015. – V.100. – P.216 – 221.

14. Andreev V.P., Kim V.L. The transport module motion organization in the heterogeneous modular mobile robot / Extreme robotics. Proceedings of international scientific-technical conference of ER-2017. – SPb (this volume).
15. Andreev V.P., Pletenev P.F. Intermodular communication method for heterogeneous modular robot / Extreme robotics. Proceedings of international scientific-technical conference of ER-2017. – SPb (this volume).

*В.П. Андреев, В.Л. Ким, П.Ф. Плетенев*

## **ПРИНЦИП ПОЛНОЙ ФУНКЦИОНАЛЬНОСТИ МОДУЛЕЙ В ГЕТЕРОГЕННЫХ МОДУЛЬНЫХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТАХ<sup>6</sup>**

*МГТУ «СТАНКИИ», МЛ «Сенсорика», МИНОТ РГГУ, Москва,  
andreevvipa@yandex.ru, top7733@gmail.com, cpp.create@gmail.com*

### **Аннотация**

В настоящей работе предлагается использовать принцип полной функциональности модулей для обеспечения оперативной реконфигурируемости гетерогенного модульного робота. Обычное разделение общей структуры модульной системы на отдельные функциональные составляющие дополнено требованием рассматривать каждый модуль как самостоятельное полнофункциональное электронное или мехатронное устройство. Сетевой принцип построения информационно-измерительной и управляющей системы, базирующийся на стандарте Ethernet, обеспечивает организацию прямого информационного межмодульного взаимодействия и возможность оперативно формировать и изменять структуру робота непосредственно на месте работ и в ходе самих работ.

Ключевые слова: модульный робот, гетерогенный модульный робот, мобильный робот, локальная вычислительная сеть, информационно-измерительная и управляющая система.

### **Введение**

Один из современных подходов к проектированию робототехнических систем и путей повышения их универсальности заключается в разделении общей структуры системы на отдельные функциональные составляющие. Каждая такая составляющая (узел) может выполнять только некоторую часть функций всего устройства, и лишь их совокупность решает функционал конечной системы. Из-за ограниченности функционала узлов, или **модулей**, их структура оказывается более простой и, следовательно, легче реализуемой. При необходимости такой модуль можно заменить на аналогичный по функционалу или модифицированный. В этом заключается **универсальность модульных систем**. Нет необходимости приобретать или создавать новый робот – достаточно лишь заменить некоторые модули или добавить новые. Следовательно, модульные системы могут обеспечить большую экономическую эффективность.

Началом использования модульного принципа в промышленной робототехнике можно считать 80-е годы прошлого столетия [1, 2]. В мобильной робототехнике модульный принцип построения и проектирования был предложен в ЦНИИ РТК (г. Санкт-Петербург) и впервые реализован в Советском Союзе в рамках первых государственных пятилетних программ по робототехнике в тех же 80-х [3]. Было создано серийное производство унифицированных компонентов роботов – электромеханических модулей, модулей управления и модульная система программного обеспечения (ПО) [4]. К моменту аварии на Чернобыльской АЭС (26 апреля 1986г.) в ЦНИИ РТК было подготовлено большое количество проектов различных модулей. Благодаря этому за короткий срок были разработаны, изготовлены и введены в эксплуатацию мобильные роботы (МР) различного назначения. На территории катастрофы эти роботы выполняли работы по обследованию радиационной обстановки и очистке здания атомной электростанции и территории от радиационного мусора.

Второй этап развития модульной мобильной робототехники можно отнести к 90-м годам XX века. В ходе работ по устранению последствий аварии на АЭС возникло новое направление в модульной робототехнике – **реконфигурируемые модульные роботы**, т.е. роботы с переменной структурой. Максимальная неопределённость условий предстоящих работ в случае экстремальных ситуаций, аварий, катастроф и активных противодействий не даёт возможность заранее определить состав и конфигурацию необходимой робототехники [3]. Использование реконфигурируемых модульных роботов даёт возможность формировать их структуру и изменять её непосредственно на месте работ и в ходе самих работ. Реконфигурация, как правило, приводит к изменению информационно-

измерительной и управляющей системы (ИИУС) робототехнической системы. Следовательно, необходимо найти такой принцип построения ИИУС модульного МР, который обеспечивал бы автоматическую перестройку всех структур ИИУС под новые состав и конфигурацию робота.

Ещё одна проблема обеспечения реконфигурируемости заключается в разработке средств механического, электрического и информационного взаимодействия модулей, т.е. соответствующих интерфейсов. Каждый интерфейс должен быть с одной стороны простым, а с другой – универсальным. Это обеспечит простоту сборки робота из модулей, разработанных разными производителями, аналогично тому, как это делается в компьютерной технологии. Например, к компьютеру, снабжённому соответствующей операционной системой (ОС), могут легко подключаться принтеры, сканеры, иное внешнее оборудование различных производителей посредством шины USB и соответствующего драйвера. Мы считаем, что модульный робот должен собираться аналогично. На данный момент механический интерфейс мы пока не рассматриваем.

### **Современные решения модульной мобильной робототехники**

В настоящее время модульные мобильные роботы разделяют на два типа: *гомогенные* и *гетерогенные*. В *гомогенных* роботах, большинство модулей *одинаковы по структуре и функционалу*. По сути, это технический аналог колониальных организмов. Основная задача таких систем – обеспечить их автономную реконфигурацию и их адаптацию к любым условиям окружающей среды. К гомогенным относятся такие модульные роботы, как M-TRAN [5] (2002 – 2008гг.), ATRON [6] (2006г.), Transmote [7] (2012г.).

Гомогенные модульные роботы обладают рядом уникальных свойств, выделяющих их среди разнообразия мобильных роботов, а именно: – адаптация к различным, иногда экстремальным условиям окружающей среды, благодаря автоматической реконфигурации; – высокая устойчивость к неисправностям отдельных модулей *во время* выполнения работы; – масштабируемость системы.

К недостаткам гомогенных роботов можно отнести:

- каждый модуль должен обладать всеми средствами для движения и навигации;
- сложность скоординированного управления модульной системой;
- высокие требования к конструкции и системе управления отдельно взятого модуля;
- масштабируемость системы ограничивается возможностями программно-аппаратной реализации модулей.

Кроме того, при одинаковости по структуре и функционалу всех модулей, один модуль, как правило, отличается от остальных – это модуль общего управления и связи с внешним супервизором.

Отличительной особенностью *гетерогенных* роботов является *дифференциация модулей по их функциям*. Каждый модуль отвечает за свой ограниченный набор задач, поэтому модули в гетерогенных системах неравноправны. Примерами гетерогенных роботов могут служить модульные роботы Thor [8] (2013г.), SMART [9] (2012г.), а также модульный робот для космических исследований [10] (2006г.).

Несмотря на более низкий уровень автономности, по сравнению с гомогенными, многие практические задачи решаются эффективнее системами с дифференциацией модулей по их функциям. Гетерогенные модульные роботы имеют следующие преимущества:

- относительно невысокие требования к конструкции и системе управления модулей;
- масштабируемость робота практически не ограничена;
- способность к выполнению широкого спектра заданий;
- возможность адаптации к условиям окружающей среды.

К недостаткам гетерогенных роботов можно отнести:

- сложность осуществления автоматической реконфигурации;
- низкая устойчивость к неисправностям отдельных модулей;
- сложность скоординированного управления всеми модулями.

Следует отметить, что в системе управления рассмотренных гомогенных и гетерогенных мобильных роботов наблюдается наличие элементов распределённого управления.

С позиции создания мобильных роботов с переменной структурой, т.е. **реконфигурируемых модульных роботов**, ориентированных на использование в случае экстремальных ситуаций, считаем, что на сегодняшний день преимуществами обладают гетерогенные роботы. Также полагаем, что автоматическая реконфигурация робота в целом при решении означенных задач не является актуальной, так как может быть выполнена в ручном режиме, но автоматическая перестройка всех элементов ИИУС робота под новые состав и конфигурацию должна быть решена обязательно. Низкая устойчивость к неисправностям отдельных модулей обычно решается дублированием систем, а также возможностью быстрой замены неисправных модулей на аналогичные или модифицированные. Но такая замена

требует от ИИУС робота быстрой адаптации к его новой структуре, что приводит к сложности скоординированного управления всеми модулями. Следовательно, искомое решение ИИУС робота должно обеспечить *возможность оперативной реконфигурации робота*.

### Принцип полной функциональности модулей

Каждый модуль робота должен быть *полнофункциональным электронным или мехатронным устройством* со своей собственной ИИУС – *принцип распределённого управления*. То есть, каждый модуль должен быть способен самостоятельно выполнять задачу, поставленную перед ним модулем-супервизором (некоторым модулем управления). В нашем случае супервизор формирует цель управления, но контролирует лишь *результат* её достижения модулем-исполнителем, а не управляет процессом. Поэтому каждый модуль робота должен выполнять своё задание любым *удобным ему способом* – отсюда следует, что конструкция модуля должна соответствовать функциональному назначению модуля, а ИИУС модуля должна полностью обеспечивать его информационную и исполнительную функциональность. Такая функциональная завершенность является **основным отличием** нашего решения от рассмотренных гетерогенных роботов, где модули-супервизоры контролируют работу всех модулей на *исполнительном уровне*.

Рассмотрим принцип функциональной завершенности на примере транспортного модуля (рис.1).

Пусть робот включает в себя следующие модули: модуль-супервизор, транспортный модуль (ТМ) и сенсорные модули. Модуль-супервизор получает от внешнего супервизора (например, человека-оператора) общее задание. В системе управления модуля-супервизора данное задание разбивается на подзадачи, распределяемые между соответствующими модулями.

Модуль-супервизор отправляет в ТМ цель управления – вектор желаемого положения робота  $[X_G, Y_G, \varphi_G]^T$ , где  $X_G, Y_G$  – координаты характеристической точки робота относительно базовой системы координат,  $\varphi_G$  – угол его ориентации. ТМ должен **самостоятельно** достичь это целевое положение, используя методы управления, заложенные в его системе управления, и информацию, получаемую от своей сенсорной системы. Сенсорная система ТМ может функционировать как отдельный модуль с ограниченным радиусом действия (например, в диапазоне 5 – 100 см) и иметь информационное взаимодействие лишь с процессором ТМ, т.е. входит в его ИИУС. Вследствие естественных ошибок обработки траектории транспортным модулем его фактическое положение, а, следовательно, и всего робота, задаваемое вектором  $[X'_G, Y'_G, \varphi'_G]^T$ , отличается от желаемого. Здесь точность обработки цели управления контролирует модуль-супервизор при помощи сенсорных модулей самого робота. Сенсорные модули робота, которые используют более сложные датчики (телевизионные, ультразвуковые, инфракрасные и т.п.), обеспечивают «привязку» робота к базовой системе координат, например, по ориентирам во внешней среде. Сравнивая вектор измеренного положения  $[\tilde{X}_G, \tilde{Y}_G, \tilde{\varphi}_G]^T$  с желаемым, модуль-супервизор корректирует реальное положение робота, задавая новую цель.



Рисунок 1 – Пример функциональной завершенности модулей

Сенсорная система ТМ может функционировать как отдельный модуль с ограниченным радиусом действия (например, в диапазоне 5 – 100 см) и иметь информационное взаимодействие лишь с процессором ТМ, т.е. входит в его ИИУС. Вследствие естественных ошибок обработки траектории транспортным модулем его фактическое положение, а, следовательно, и всего робота, задаваемое вектором  $[X'_G, Y'_G, \varphi'_G]^T$ , отличается от желаемого. Здесь точность обработки цели управления контролирует модуль-супервизор при помощи сенсорных модулей самого робота. Сенсорные модули робота, которые используют более сложные датчики (телевизионные, ультразвуковые, инфракрасные и т.п.), обеспечивают «привязку» робота к базовой системе координат, например, по ориентирам во внешней среде. Сравнивая вектор измеренного положения  $[\tilde{X}_G, \tilde{Y}_G, \tilde{\varphi}_G]^T$  с желаемым, модуль-супервизор корректирует реальное положение робота, задавая новую цель.

В этой схеме транспортный модуль может быть снабжён колёсным, шагающим или каким-либо иным движителем, но он должен обрабатывать заданную модулем-супервизором цель, независимо от его механической конструкции, структуры ИИУС и алгоритма управления модуля.

На основе изложенного принципа полной функциональности реализуется *распределённое управление*, позволяющее распараллелить вычислительный процесс выполнения целевой функции робота путём разбиения процесса на функциональные подзадачи и распределения их между вычислителями модулей. Тогда за вычислителем модуля-супервизора остаются лишь функции: разбиение процесса на функциональные подзадачи, распределение задач между модулями, контроль их исполнения, синхронизация процессов и обработка «поведенческих» задач. За модулем-супервизором также закрепляется задача информационного взаимодействия с внешним супервизором.

Такое распределённое управление требует создания *языка межмодульного информационного взаимодействия* и ПО, поддерживающего автоматическую реконфигурацию ИИУС робота.

### **Межмодульное информационное взаимодействие**

В современных модульных роботах, как гомогенных, так и гетерогенных, в связи с миниатюризацией самих модулей и минимизацией количества контактов на механических и электрических интерфейсах, используются различные последовательные шины: I<sup>2</sup>C на модулях ЦНИИ РТК; CAN – в роботах M-TRAN, SMART; IrDA (по сути, RS-232) – в роботе ATRON; RS-485 – в роботах Thor, Odin. Последовательная шина используется и на роботе TRANSMOTE – там используется беспроводной интерфейс ZigBee. С позиции управления у таких роботов есть, по сути, два варианта работы: отрабатывать набор простых правил, помещённых в ПЗУ микроконтроллеров модулей, либо отрабатывать команды внешнего компьютера, подаваемые модулям через какой-либо один модуль, к шине которого (а значит, и к общей шине модулей) подключён этот компьютер. Тогда роль системы межмодульного взаимодействия в таких системах сводится, фактически, только к наиболее быстрой и эффективной передаче команд исполнительного или тактического уровня от внешнего компьютера к модулям и показаний датчиков обратно. В этом случае информационный поток в процессе межмодульного взаимодействия невелик, поскольку на каждом модуле либо вообще нет датчиков, либо много датчиков установить невозможно. Как результат, необходимо, в основном, передавать лишь команды исполнительного уровня. В нашем же случае предполагается использовать сенсорные системы, содержащие большое количество разнообразных датчиков, в том числе телевизионные многокамерные, информационный поток от которых крайне велик. Перечисленные интерфейсы не обладают для этого достаточной пропускной способностью.

Предлагается для организации межмодульного взаимодействия применить широкополосной, надёжный и недорогой интерфейс на основе стандарта Ethernet. Его расширение для работы в реальном масштабе времени EtherCAT не даёт возможности создания горизонтальных связей – всё межмодульное взаимодействие должно происходить через «ведущего» шины. Это исключает возможность *прямого межмодульного взаимодействия* и, как следствие, реализацию *полноценного распределённого управления*. Поскольку использование принципа функциональной завершенности модулей снимает необходимость в передаче команд исполнительного уровня, допустимы более мягкие требования к времени доставки сообщений и интерфейсы с «мягким реальным временем».

Сеть Ethernet изначально не является шиной – в ней используются соединения типа «один к одному». Возможно преобразовать её в «шину», установив в узлы сети коммутаторы (switch), которые добавляют возможность создания соединений (топологии) типа «один ко многим», обеспечивая два варианта топологии сети: «шина» и «звезда». Обе топологии имеют недостатки – «шина» требует либо применения большого числа коммутаторов, либо встраивания в каждое электронное устройство нескольких интерфейсов Ethernet, а «звезда» заставляет прокладывать значительно большее число проводов. Поскольку все проводные соединения в нашем случае ограничены небольшими размерами робота, выбираем топологию типа «звезда», что соответствует типичной топологии сети Ethernet.

В настоящее время для организации управления разнородными мехатронными устройствами широко используется программный каркас (framework) Robotics Operating System (ROS). Однако непосредственное его применение оказывается «тяжеловесным» – необходим, как минимум, компьютер под управлением полноценной ОС Linux, для работы с ним необходимо устанавливать на вычислительные устройства довольно сложное и объёмное ПО, требуется высокий уровень входа для использования (для конфигурации, например, используются диалекты языка XML).

В модулях робота в качестве вычислительных устройств должны устанавливаться микроконтроллеры или, как максимум, одноплатные компьютеры; ROS не ориентирован для работы непосредственно на микроконтроллерах. Поэтому требуется создать такое ПО, которое было бы совместимо с ROS, но при этом было бы удобным для реализации на встраиваемых системах.

Выбор стандарта Ethernet позволяет реализовать информационно-измерительную и управляющую систему модульного робота в виде *локальной вычислительной сети*, узлами которой являются ИИУС отдельных модулей [11]. Такой подход переносит такие свойства сети, как масштабируемость и возможность автоматической реконфигурируемости на модульную структуру робота. Опыт разработки сетевой учебной Интернет-лаборатории и её многолетняя эксплуатация [12] убеждает авторов в правильности сделанного выбора. Разработанный для лаборатории метод территориально-распределённого управления лёг в основу метода межмодульного информационного взаимодействия.

Предложенный в работе [12] подход основывался на библиотеке Zmq\_robot [13], которая была построена на основе библиотеки ZMQ. Библиотека Zmq\_robot позволяет создавать как ПО для модулей,

так и управляющие программы для супервизора. Однако эта библиотека имеет тот же недостаток, что и ROS – для работы с ней необходимо устанавливать на устройства сложное ПО, которое работает только на полноценных ОС, и не работает на встраиваемых системах.

Для решения данной проблемы была создана спецификация на метод межмодульного взаимодействия, учитывающая свойство полной функциональности модулей. Для организации взаимодействий здесь предлагается в качестве основы также использовать библиотеку ZMQ, но как дополнение к ZMQ использовать протокол UDP с широковещательными сообщениями. Такое решение даёт возможность реализовать спецификацию *для встраиваемых систем*. В отличие от ROS, каждый модуль имеет один общий для всех модулей интерфейс, через который предоставляет общую информацию о себе – имя модуля, его описание, функциональные интерфейсы и пр.

Предлагаемый подход межмодульного общения базируется на следующих постулатах:

- обмен сообщениями по протоколам TCP и UDP через так называемые «сетевые интерфейсы»;
- использование «метаинтерфейса» – интерфейс для выполнения общих для всех модулей

команд;

- вводится понятие метаданных – формализованное описание выполняемых модулями функций;
- предусмотрены: возможность использования разных методов кодирования информации (JSON, BSON и т.п.) и возможность выбора сетевых протоколов;
- использование «человекочитаемых» языков конфигурации и передачи данных (JSON, YAML и т.п.);

использование для описания протокола методов организации IETF, позволяющих добиться одинакового поведения на разных платформах.

### **Заключение**

Предлагаемый принцип полной функциональности в настоящее время реализован на действующем лабораторном макете гетерогенного модульного мобильного робота, состоящего из модуля-супервизора (модуля сетевого управления), транспортного модуля с сенсорной системой ближнего радиуса действия и силового модуля (аккумуляторы). Основное внимание на данном этапе уделялось обеспечению требования полной функциональности транспортного модуля и силового модуля. Предложен метод планирования движения транспортного модуля вблизи узловых точек с использованием искусственных сил при условии, что его сенсорная система состоит лишь из одометрических и ультразвуковых датчиков [14]. Информационно-измерительная и управляющая система робота реализована в виде локальной вычислительной сети стандарта Ethernet, посредством которой осуществляется межмодульное информационное взаимодействие. Разработаны и реализованы элементы языка межмодульного общения, ограниченного данной минимальной структурой [15].

Работа выполняется при частичной поддержке РФФИ: гранты 16-07-00811а, 16-07-00935а и 16-07-01264а.

1. Промышленная робототехника / А.В. Бабич, А.Г. Баранов, И.В. Калабин и др. // Под ред. Я.А. Шифрина – М.: Машиностроение, 1982 – 415 с., ил.
2. Козырев Ю.Г. Промышленные роботы агрегатно-модульного типа / Воробьёв Е.И., Козырев Ю.Г., Царенко В.И. // ISBN: 5-217-00166-6. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.
3. Лопота А.В., Юревич Е.И. Этапы и перспективы развития модульного принципа построения робототехнических систем / Научно-технические ведомости СПбГПУ 1' 2013 // Информатика. Телекоммуникации. Управление. – СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2013. – С.98 - 103.
4. Юревич Е.И. Роботы ЦНИИ РТК на Чернобыльской АЭС и развитие экстремальной робототехники. – СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2003.
5. M-TRAN: selfreconfigurable modular robotic system / S.Murata, E.Yoshida, A.Kamimura, H.Kurokawa, K.Tomita, and S.Kokaji // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 7(4), 2002. – P. 432 - 441.
6. Design of the ATRON lattice-based self-reconfigurable robot / E.H.Østergaard, K.Kassow, R.Beck, and H.H.Lund // Autonomous Robots, 21(2), 2006. – P.165–183.
7. Design of Transmote: a Modular Self-Reconfigurable Robot with Versatile Transformation Capabilities / Guifang Qiao, Guangming Song, Jun Zhang, Hongtao Sun, Weiguo Wang, Aiguo Song // Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2012. – P.1331-1336.
8. On sub-modularization and morphological heterogeneity in modular robotics / A.H.Lyder, K.Stoy, R.-F.Mendoza-Garcia, J.C.Larsen, and P.Hermansen // Intelligent Autonomous Systems 12, volume 193 of Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer Berlin Heidelberg, 2013. – P. 649-661.

9. Baca J. A heterogeneous modular robotic design for fast response to a diversity of tasks / J.Baca, M.Ferre, and R.Aracil // *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 60, no.4, 2012. – P. 522 - 531.
10. Hancher M.D., Hornby G.S. A modular robotic system with applications to space exploration / 2nd IEEE International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology (SMC-IT'06). – Pasadena, CA: Publisher «IEEE», 2006. – P. 132 - 140.
11. Андреев В.П. Сетевые решения в архитектуре гетерогенных модульных мобильных роботов / Андреев В.П., Ким В.Л., Подураев Ю.В. // *Робототехника и техническая кибернетика*. ISSN 2310-5305. – 2016. – №3(12). – С.23-29.
12. Андреев В.П., Кирсанов К.Б. Технология многооператорного управления мобильными роботами через Интернет / *Известия Южного Федерального университета. Технические науки*. ISSN 1999-9429. – Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону: 2015. – №10(171). – С.6 -17.
13. Kirsanov K. Software architecture of control system for heterogeneous group of mobile robots / 25th DAAAM Int. Symp. on Intelligent Manufacturing and Automation, 2014. *Procedia Engineering* (2015) ISSN 1877-7058, 2015. – V.100. – P.216 - 221.
14. Андреев В.П., Ким В.Л. Организация управления движением транспортного модуля в составе гетерогенного модульного мобильного робота / *Экстремальная робототехника. Труды международной научно-технической конференции ЭР-2017*. – СПб (настоящий сборник).
15. Андреев В.П., Плетенев П.Ф. Метод межмодульного взаимодействия в гетерогенном модульном мобильном роботе / *Экстремальная робототехника. Труды международной научно-технической конференции ЭР-2017*. – СПб (настоящий сборник).

*I.A. Vasiliev*

## **ALGORITHMS OF MOTION OF THE WHEELED-WALKING PLATFORM**

*Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, vas@rtc.ru*

### Abstract

There are tasks of accurately moving loads, i.e. such movement, when the acceleration of the vehicle, transferred to the cargo, is strictly limited. At the same time, the movement of the cargo is required to be organized over rough terrain.

This problem is solved in two ways: by either improving the quality of the wheel suspension, i. e. softer suspension, or using a purely walking drive. In this paper, a new approach is applied, in which wheeled and stepping drives are combined. Alteration algorithms are used for the crossed terrain, and for normal surfaces, conventional wheels are used.

The application of such an approach for wheel-walking platforms is very broad from the elimination of the consequences of accidents and disasters (moving the wounded) to aid in the exploration of natural resources.

Keywords: algorithms, robotics, robot, wheel-walking platform.

## АЛГОРИТМЫ ДВИЖЕНИЯ КОЛЕСНО-ШАГАЮЩЕЙ ПЛАТФОРМЫ

*ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург, vas@rtc.ru*

### Аннотация

Существуют задачи аккуратного перемещения грузов, т.е. такого перемещения, когда ускорение транспортного средства, передаваемое на груз, строго ограничено. При этом перемещение груза требуется организовать по пересечённой местности.

Эту задачу решают двояко: либо улучшением качества подвески колёс, т.е. более мягкой подвеской. Либо применением чисто шагающего привода. В данной работе применён новый подход, при котором совмещены колесные и шагающие привода. Для пересечённой местности применяются алгоритмы шагания, а для ровных поверхностей – обычные колёса.

Применение такого подхода для колёсно-шагающих платформ очень широко – от ликвидации последствий аварий и катастроф (перемещение раненых) до помощи в разведке природных ресурсов.

Ключевые слова: алгоритмы, робототехника, робот, колёсно-шагающая платформа.

### Введение

В условиях пересечённой местности для устойчивого движения мобильных платформ различного назначения становится явным недостатком наличие обычных («классических») типов движителей. То есть, таких движителей, как колёсные, гусеничные, колёсно-гусеничные и прочие виды устройств.

Для качественного увеличения проходимости предлагается использовать колёсно-шагающую систему – см. рисунок 1.



Рисунок 1 – Внешний вид колёсно-шагающей платформы

Каждое колесо посажено на двухступенной манипулятор, что позволяет управлять системой привода в широчайшем диапазоне способов.

Существует задача аккуратного перемещения грузов по неровной поверхности. Под термином «аккуратное перемещение» понимают такое перемещение, при котором груз испытывает минимальные ускорения по всем направлениям и осям.

### Концептуальная основа метода

Для реализации аккуратного движения платформы по неровной поверхности непосредственно само перемещение производится посредством вращения шарниров манипуляторов, на которых посажены колёса. А сами колёса требуются для создания опоры на подстилающей поверхности. При этом поступательное движение платформы производится постоянно с одной скоростью.

Рассмотрим рисунок 2 схематично демонстрирующий движение приводов платформы.

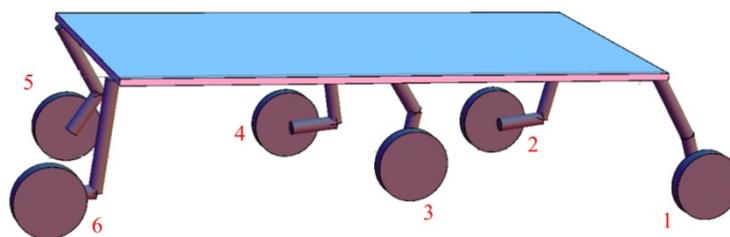


Рисунок 2 – Схема движения приводов платформы

На этом рисунке видно, что колесо 1 уже перемещается в начальное (т.е. максимально выдвинутое вперёд) положение. Такое движение назовём переносным. Другое колесо, которое приближается к концу диапазона, это, вероятно, № 3. Далее, колесо № 5, затем – № 2, потом №6 и последним будет колесо №4. После этого всё повторится снова.

Как только колесо №1 переместится вперёд и сможет обеспечить требуемое опорное усилие на подстилающую поверхность, колесо №3 начнёт выполнять переносное движение. При этом вся платформа перемещается только посредством движения манипуляторов колёс. Разумеется, такой вид движения оправдан лишь для движения по неровной поверхности, так как по ровной требуется качество движения обеспечивается простым качением всех шести колёс.

Рассмотрим рисунок 3, на котором схематично приведена циклограмма движения всех колёс. На этой циклограмме переносное движение обозначено полуэллипсами, а обычное движение манипуляторов – прямыми отрезками.

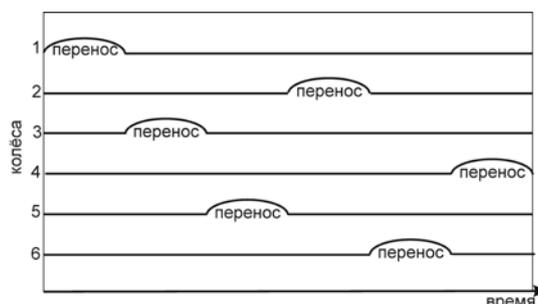


Рисунок 3 – Циклограмма движения всех колёс

### Решение задачи

Напишем количественные соотношения для реализации такого движения.

Пусть длины звеньев манипуляторов колёс следующие: плечевое (первое) звено –  $a$ , локтевое (второе) звено –  $b$ . Пусть также клиренс (просвет) платформы равен  $h$ . Сразу возникает ограничение: «шагание» возможно, если  $a+b > h$ .

Итак, стало ясно условие начала и окончания переносного движения – см. рисунок 4.

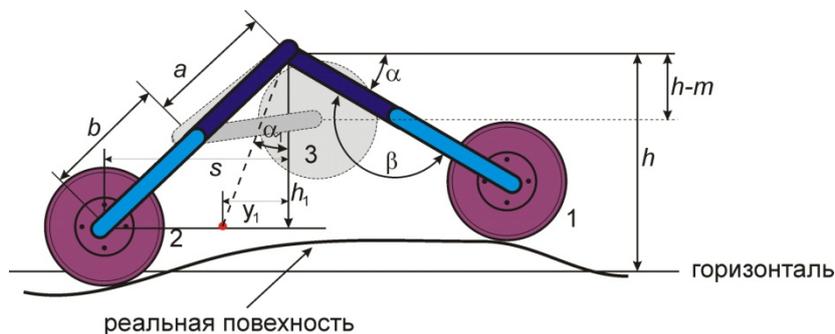


Рисунок 4 – «Треугольник» переносного движения

На этом рисунке под термином «горизонталь» понимается некоторая воображаемая поверхность, относительно которой должен поддерживаться клиренс  $h$ . Само переносное движение может осуществляться каким угодно образом: перекачиванием расторможенного колеса по подстилающей поверхности, «иноходью», когда вначале движется плечо, а затем локоть, обычным шагом, как ходит человек, или даже переносом колеса через верх.

Рассмотрим переносное движение, когда колесо из начального положения плечевым шарниром поднимается до уровня  $h-m$  и, далее, обоими шарнирами переносится по прямой до состояния полной вытянутости и, наконец, опускается до соприкосновения с опорой.

Соответственно, угол, при котором колесо поднято на требуемую высоту:

$$\alpha_1 = \text{Arcsin} \frac{h-m}{a+b}; \quad (1)$$

Изменение углов плеча и локтя для переноса колеса по прямой линии должно производиться по таким законам:

$$\alpha = v_\alpha t, \quad (2)$$

$$\beta = \alpha + \text{Arcsin} \left( \frac{h-m-a \sin(\alpha)}{b} \right), \quad (3)$$

где  $v_\alpha$  - скорость изменения угла плеча;  
 $t$  - время.

Для изменения углов опорных колёс требуется внести линейную (т.е. поступательную) скорость платформы  $v_p$ . Реальная высота оси поворота плечевого шарнира над опорой обозначается величиной  $h_1$ . Тогда имеем:

$$\begin{aligned} h_1 &= (a+b) \sin \alpha \\ s &= (a+b) \cos \alpha \\ y_1(t) &= (s - v_p t) \end{aligned}$$

$$\alpha_1(t) = \text{arctg} \frac{y_1(t)}{h_1}$$

$$\begin{aligned} l(t) &= \sqrt{y_1^2(t) + h_1^2} \\ \beta(t) &= 360^\circ - \text{Arccos} \frac{a^2 + b^2 - l^2(t)}{2 a b} \\ \alpha_2(t) &= \text{Arccos} \frac{a^2 + l^2(t) - b^2}{2 a l(t)} \\ \alpha(t) &= 90^\circ + \alpha_1(t) + \alpha_2(t) \end{aligned} \quad (4)$$

В цепочке формул (4) величины, зависящие от времени, явно обозначены как функции времени. Параметры  $h_1$  и  $s$  являются начальными параметрами, т.е. вычисляются один раз при окончании переносного движения, когда колесо опёрлось о подстилающую поверхность.

#### Заключение

Пользуясь цепочкой формул (4) можно обеспечить требуемое качество перемещения мобильной платформы, так как платформа не «едет» по поверхности, а перемещается посредством колёсных манипуляторов, что гораздо точнее.

Здесь есть одна тонкость. Рассмотрим рисунок 5.

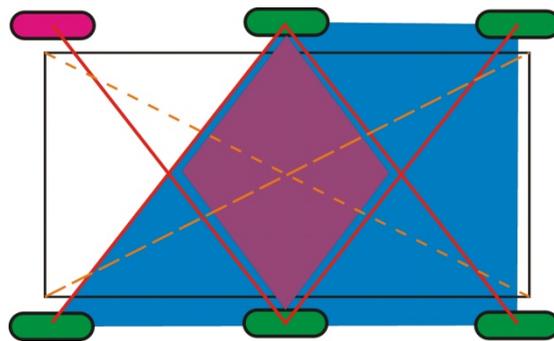


Рисунок 5 – Распределение груза на платформе

На этом рисунке показана мобильная робототехническая платформа (МРП) в виде сверху. Зелёным обозначены опорные колёса, а красным – переносное колесо. Светло-коричневыми штриховыми линиями показан геометрический центр платформы, а синим четырёхугольником – зона устойчивости, т.е. та зона, в которой в данный момент может находиться центр масс платформы, чтобы она не наклонилась. Если определить пересечения всех четырёх возможных зон устойчивости, то получится фиолетовый ромб, показанный по центру. В пределах зоны ромба и должен находиться центр масс (тяжести) комплекса платформа-груз.

В момент отрыва колеса от опоры (в начале переносного движения) и в момент прижимания к опоре (по окончании переносного движения) по причине того, что нагрузка начинает распределяться по-

другому, возможны небольшие колебания. Этот эффект можно минимизировать тем, что согласованно с движущимся колесом начинать перемещение следующего колеса. Тем более, что другие колёса также могут немного подыграть. Привода манипуляторов колёс снабжены датчиками усилия, так что данный способ вполне реализуем.

### **Выводы**

Моделирование данного метода показало полную его практическую реализуемость. Более того, описываемая платформа с грузом имеет возможность автоматически переходить с колёсного режима в шагающий. Для этих целей даже не требуется никаких дополнительных сенсоров, вполне хватает датчиков моментов в приводах.

При движении по ровной поверхности усилия в шарнирах приводов постоянны и зависят лишь от расположения центра масс системы платформа-груз. При начале наезда на неровность одним колесом (в любом случае лишь одно колесо будет первым наехавшим на неровность), меняются эти усилия в шарнирах. Именно у первого наехавшего колеса моменты изменяться больше всех. При этом алгоритм начинающего шагания будет меняться так, чтобы первое колесо стало первым шагающим.

К сожалению, определение перехода от пересечённой местности к ровной по сенсорам моментов в шарнирах является алгоритмически неразрешимой проблемой. Для этого надо применять иные подходы и датчики внешней среды, например техническое зрение.

Главное ограничение данного подхода очевидно. Это сильно неровная местность. Имеется ввиду такая, что манипуляторы колёс подвески имеют недостаточные габариты (а сам корпус платформы клиренс), чтобы обеспечить компенсацию неровностей.

Для практического использования данные алгоритмы можно применять для любых транспортных задач на неровных поверхностях, в.т. числе и для помещений.

1. Брискин Е.С., Чернышев В.В., Малолетов А.В., Шаронов Н.Г. Сравнительный анализ колёсных, гусеничных и шагающих машин. // Научно-технический журнал «Робототехника и техническая кибернетика», №1, 2013 г.
2. С.Ф.Бурдаков, И.В.Мирошник, Р.Э.Стельмаков. Системы управления движением колёсных роботов. СПб, наука, 2001
3. Вульфсон И.И. Колебания машин с механизмами циклового действия. Л.: Машиностроение, 1990
4. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Управление роботами. Основы управления манипуляционными роботами : Учеб. пос. для вузов – М. : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000
5. Справочник по промышленной робототехнике.// Под. Ред. Ш. Ноф. М., «Машиностроение»-1990
6. Springer Handbook of Robotics. // Editors: Siciliano, Bruno, Khatib, Oussama (Eds.), Springer-2008

*V.M. Moskovchenko, V.V. Baranov*

## **MODEL OF IMPACT ON ROBOTIC SYSTEMS**

*URGPU, Novocherkassk*

### **Annotation**

In the article, the approach allowing defining the probability-time characteristics of the targeted computer attack aimed at robotic systems is considered. To do this, the article proposes to use the method of topological transformation of stochastic networks and to build a profile model of targeted computer attack.

Keywords: model, probability-time characteristics, method of topological transformation, topological transformation of stochastic networks.

1. Eliseev A. I. Dolgov, A. A., Khorokhoryn M. A., of Louth, O. S., Nabatov, K. A. Ensuring the survivability of information systems (part 3. Methods of ensuring and enhancing survivability). Vestnik of Voronezh Institute FSIN of Russia. 2013. No. 1. S. 91-94.
2. Kocinac M. A., of Louth, O. S., Nechepurenko, A. P., Schr I. G. Methods of assessment of sustainability of telecommunication networks in terms of information influence. The works of educational institutions of communication. 2016. Vol. 2. No. 4. P. 82-87.
3. Baranov V. V., Kibel A. M., of Louth, O. S., Nechepurenko, A. P. application of the method of topological transformations of stochastic networks to evaluate the effectiveness of the remedies. In the book: Actual problems of information security. the proceedings of the Interuniversity scientific-practical conference. 2017. Pp. 47-52.

4. Kocinac M. A., Ivanov D. A., Louth O. S., Nechepurenko, A. P. methods of assessing the protection of information and telecommunication network in the conditions of information opposition. In the proceedings: Radar, navigation, communication. Proceedings of the XXIII International scientific - technical conference. In 3 volumes. 2017. S. 83-89.
5. Kocinac M. A., Ivanov D. A., Louth O. S., Nechepurenko, A. P. a Model of targeted cyber attacks. In the proceedings: Radar, navigation, communication. Proceedings of the XXIII International scientific - technical conference. In 3 volumes. 2017. P. 90-98.
6. Baranov V. V., Gudkov M. A., Kibel A. M., of Louth, O. S., A. P. science and education channel Protection control of robotic systems. In the book: Actual problems of information security. the proceedings of the Interuniversity scientific-practical conference. 2017. S. 32-37.
7. Kocinac M. A., Kurganov V. V., Louth O. S., Nechepurenko, A. P. Method of justification of countermeasures radar intelligence precision weapons. Defense engineering problems. Series 16: the Technical means of combating terrorism. 2016. No. 9-10 (99-100). P. 54-57.

***В.М. Московченко, В.В. Баранов***

### **МОДЕЛЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА РОБОТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ**

*Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова,  
г. Новочеркасск, baranov.vv.2015@yandex.ru, fvo.urgpu.npi@yandex.ru*

#### Аннотация

В статье рассматривается подход позволяющий определить вероятностно-временные характеристики таргетированной компьютерной атаки, направленной на роботизированные системы. Для этого в статье предлагается использовать метод топологического преобразования стохастических сетей и построить профильную модель таргетированной компьютерной атаки.

Ключевые слова: модель, вероятностно-временные характеристики, таргетированные кибернетические атаки, метод топологического преобразования стохастических сетей.

XXI век – век информационных технологий, в котором все очень быстро меняется. В настоящее время мир стоит на грани новой промышленной революции – четвертой или Индустрия 4.0. «Умные» фабрики, заводы-принтеры и интернет вещей уже заменяют человека в производстве. Основной тенденцией последних лет называют смещение акцента с массовых атак на таргетированные, или целевые, которые заранее спланируют действия противник конкретной государственной или негосударственной структуры. Целевая атака всегда строится под объект воздействия, являясь продуманной операцией, а не простым техническим действием [1,2]. Высокая сложность их обнаружения и колоссальный урон от их действий, которой не гарантированно может быть обнаружен спустя длительный срок.

Отличием от других атак является:

- Адресность;
- Скрытность;
- Продолжительность;
- Использование разнородных инструментов и методов;
- Изменчивость вектора атаки, ее инструментария по мере развития;
- Наличие центра управления атакой – преступные группы, в составе которых есть и профессиональные IT-эксперты;
- Результативность.

Основные компоненты Индустрии 4.0: умные сенсоры, которые позволяют собирать данные в процессе производства; передача больших объёмов данных людям, другим машинам и заводам; облачные сервисы, которые предоставляют данные из любого места; «умные станки», которые сами определяют свою производственную траектории, т.е охватывают все сферы жизни человека.

Технологически это означает не только создание «единой сети станков и машин», но и самостоятельную и непрерывную оптимизацию их текущей работы, большую гибкость производств, персонализацию заказов и более тесную связь с потребителем.

В рамках проекта немецкого правительства Industry 4.0 по компьютеризации промышленности в 2006 году Хелен Джилл ввел понятие киберфизические системы, которые включают в себя:

- системы управления производством;

- интернет вещи;
- беспилотные летательные аппараты;
- беспилотные автомобили;
- системы военного назначения;
- роботизированные системы.

Особое внимание зарубежное руководство уделяет внимание роботизированным системам. В качестве основных каналов воздействия на них рассматривают следующие:

- воздействия на подсистемы управления;
- воздействие на человеко-машинный интерфейс;
- воздействия на протоколы взаимодействия;
- воздействия на устройства, входящие в роботизированные системы.

С целью воздействия на роботизированные системы злоумышленник перешел от массовых атак к таргетированным, или целевым.

Целевая атака обладает вероятностно-временными характеристиками (ВВХ), определение их позволит оценить степень их опасности, выбрать и реализовать меры защиты. С этой целью предлагается использовать профильные модели ТКА и метод топологического преобразования стохастических сетей (ТПСС) [3].

Под стохастической сетью будем понимать совокупность взаимоувязанных узлов (вершин) и ветвей, соединение которых соответствует алгоритму функционирования исследуемой системы.

Суть метода преобразования стохастической сети заключается в том, что исследуется не система, а процесс, который она реализует. При этом сеть реализуется, если будет построено некоторое подмножество ветвей, время реализации которых выбирается в соответствии с вероятностным распределением.

Стохастическая сеть не является моделью системы. Она является моделью процесса, который реализует эта система. Сложный процесс декомпозируется на элементарные процессы, каждый из которых характеризуется функцией распределения, средним временем и его дисперсией.

Логика и последовательность выполнения процессов определяется двухполюсной сетью, состоящей из входного, промежуточных и выходного узлов (вершин), при этом ребрам соответствует набор элементарных процессов, а вершинам (узлам) – условия их выполнения. Каждый узел (вершина) выполняет две функции – входную, определяющую условие (логическую операцию), при котором функция может быть выполнена, и выходную, определяющую какие из операций, следующих за узлом, будут выполняться. Входной узел сети выполняет только предшествующую выходную функцию, а выходной только входную.

Для каждого ребра определяется функция передачи. Эта функция играет роль условной характеристической функции. Она представляет собой преобразование Лапласа для функции плотности вероятностей времени свершения элементарного процесса.

Далее осуществляется топологическое преобразование сети случайных процессов.

Напомним, что топология – раздел математики, изучающий свойства геометрических фигур, не изменяющиеся при любых деформациях, производимых без разрывов и склеиваний. Главной задачей топологии является изучение таких топологических свойств как связность, компактность, размерность и др. В данном случае таким топологическим инвариантом является свойство связности графа.

Поскольку входная и выходная вершины двухполюсной сети (графа) являются связными, то с помощью стандартных процедур ее можно свести к одному ребру, связывающему эти вершины. Для этого в сети сначала выделяются последовательные, параллельные и петлеобразные пути, на которых определяются эквивалентные функции передачи, каждый из которых сводится к одному ребру. Затем с помощью правила Мейсона эти фрагменты объединяются в одно ребро с общей эквивалентной функцией передачи. При этом структура сети не исчезает бесследно – ее «следы» остаются в структуре эквивалентной функции. После получения эквивалентной функции производят обратное преобразование Лапласа, результатом которого является функция плотности вероятностей времени выполнения целевого процесса, либо определяют первые моменты случайного времени его выполнения[4].

С целью определения ВВХ с использованием ТПСС на первом этапе необходимо произвести четкое разложение процесса функционирования на несколько физических процессов, т. е. построить профильную модель.

Профильная модель ТКА. Модель разрабатывается для условий, когда нарушитель реализует атаку в первый раз. Роботизированная система содержит  $n$  элементов. Для выявления потенциально слабых

мест осуществляется сбор информации за среднее время  $\overline{t_{сбор}}$  при функции распределения времени  $O(t)$  с помощью следующих приемов: социальная инженерия – прием, при котором за среднее время  $\overline{t_{с.и.}}$  с функцией распределения времени  $Q(t)$ ; инсайд – прием, при котором за среднее время  $\overline{t_{инс}}$  с функцией распределения времени  $W(t)$  от людей получают достаточно большой объем информации для подготовки и выбора вектора атаки; несанкционированный доступ к открытым источникам информации за среднее время  $\overline{t_{ист}}$  с функцией распределения времени  $R(t)$ .

Затем нарушитель разрабатывает набор инструментов воздействия за среднее время  $\overline{t_{инст}}$  с функцией распределения времени  $A(t)$ , который определяется следующим образом.

1. Набор новых инструментов за среднее время  $\overline{t_{нов}}$  с функцией распределения времени  $X(t)$ .

2. Выбор из готовых инструментов (видов воздействия) за среднее время  $\overline{t_{пов}}$  с функцией распределения времени  $Y(t)$  трех компонентов: командный центр, обеспечивающий передачу команд подконтрольным, вредоносным модулям за среднее время  $\overline{t_{ком}}$  с функцией распределения времени  $Y1(t)$ ; выбор вариантов проникновения за среднее время  $\overline{t_{пов}}$  с функцией распределения времени  $Y2(t)$ ; вредоносная модель тело вируса Payload в целевой атаке за среднее время  $\overline{t_{загр}}$  с функцией распределения времени  $Y3(t)$  загружается на инфицированное устройство, состоящий из нескольких функциональных допмодулей.

Опираясь на собранную информацию, нарушитель приступает к созданию стенда воздействия ТКА за среднее время  $\overline{t_{стенд}}$  с функцией распределения времени  $U(t)$ , применяя идентичные версии эксплуатируемого программного обеспечения. Отрабатываются следующие этапы: выбор способов воздействия скрытого внедрения за среднее время  $\overline{t_{внед}}$  с функцией распределения времени  $U1(t)$ ; обход стандартных средств защиты информации за среднее время  $\overline{t_{обход}}$  с функцией распределения времени  $U2(t)$ . Далее разрабатывает стратегия воздействия за среднее время  $\overline{t_{страт}}$  с функцией распределения времени  $A1(t)$ .

После выбора способа воздействия решается задача позволяющая осуществить обход стандартных средств защиты за среднее время  $\overline{t_{станд}}$  с функцией распределения времени  $I(t)$ . Применяет следующие приемы: обфускация кода за среднее время  $\overline{t_{обфус}}$  с функцией распределения времени  $D(t)$ , шифрование части кода от детектирующих механизмов за среднее время  $\overline{t_{шиф}}$  с функцией распределения времени  $G(t)$ ; инъектирование процесса динамическое внедрение собственного кода в чужой процесс за среднее время  $\overline{t_{инж}}$  с функцией распределения времени  $R(t)$ ; Mimikatz извлечение аутентификационных данных в систему пользователя в открытом виде за среднее время  $\overline{t_{мит}}$  с функцией распределения времени  $Z(t)$ .

Далее нарушитель приводит изменение штатной логики работы ПО, используя эксплуатационные уязвимости за среднее время  $\overline{t_{уязв}}$  с функцией распределения времени  $X1(t)$  по средствам внедрения кода в уже запущенную ОС или программу, с помощью: известных уязвимостей за среднее время  $\overline{t_{изв}}$  с функцией распределения времени  $C(t)$ ; неизвестных или уязвимостей нулевого за среднее время  $\overline{t_{неизв}}$  с функцией распределения времени  $D1(t)$ . Для гарантированных воздействий применяется комбинирование техники атаки за среднее время  $\overline{t_{комб}}$  с функцией распределения времени  $B(t)$ , такие как: утилиты за среднее время  $\overline{t_{утилит}}$  с функцией распределения времени  $N(t)$ ; механизмы эксплуатации уязвимостей нулевого дня за среднее время  $\overline{t_{экс}}$  с функцией распределения времени  $M(t)$ ; вредоносное программное обеспечение специально созданную под конкретную цель за среднее время  $\overline{t_{вред}}$  с функцией распределения времени  $O1(t)$ .

После изменения штатной логики работы ПО нарушитель принимает решение по инвентаризации сети за среднее время  $\overline{t_{инв}}$  с функцией распределения времени  $Q1(t)$ , а также осуществляет закрепление внутри инфраструктуры за среднее время  $\overline{t_{закр}}$  с функцией распределения времени  $W1(t)$  и распространение вредоносного модуля за среднее время  $\overline{t_{расп}}$  с функцией распределения времени  $A2(t)$ . Закрепление осуществляется по следующим этапам: Diqu 2.0 за среднее время  $\overline{t_{diqu}}$  с функцией распределения времени  $R2(t)$  и Carbanak за среднее время  $\overline{t_{carb}}$  с функцией распределения времени  $W2(t)$ .

В заключении нарушитель производит поиск ключевой информации за среднее время  $\overline{t_{поиск}}$  с функцией распределения времени  $C1(t)$  и выполняет вредоносное действие за среднее время  $\overline{t_{вред}}$  с функцией распределения времени  $\Pi(t)$ , такие атаки как: хищение ключевой информации за среднее время  $\overline{t_{хищ}}$  с функцией распределения времени  $D2(t)$ ; получение информации, содержащей конфиденциальные данные за среднее время  $\overline{t_{получ}}$  с функцией распределения времени  $G1(t)$ ; изменение данных за среднее время  $\overline{t_{измен}}$  с функцией распределения времени  $J1(t)$ .

После первой успешной реализации для уменьшения времени ТКА нарушитель оставляет файл возврата за среднее время  $\bar{t}_{\text{возвр}}$  с функцией распределения времени  $B2(t)$  для дальнейшей реализации атак с этапа выполнения вредоносного действия [5, 6].

*Математическая модель*

Описанный выше процесс ТКА представим в виде стохастической сети (рис.1)

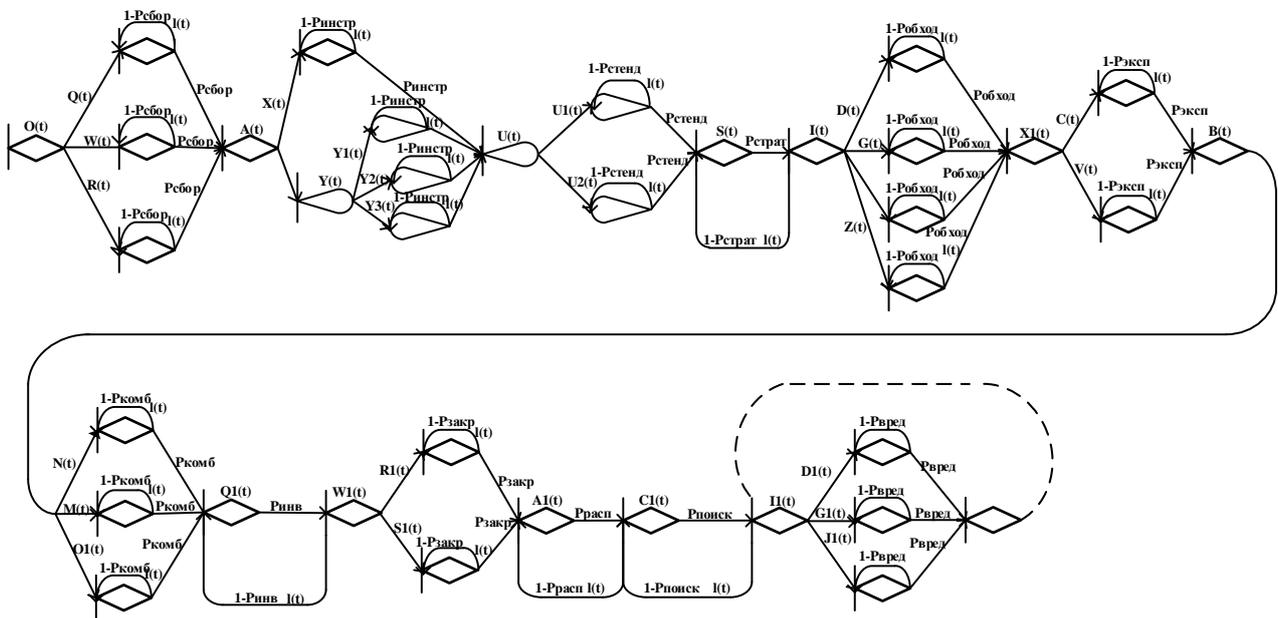


Рисунок 1 – Стохастическая сеть ТКА

В результате представления анализируемого процесса в виде стохастической сети (рис. 1) получилось сложная стохастическая сеть. Для определения ВВХ необходимо разбить её на простые сети. Каждая простая стохастическая сеть будет соответствовать каждому этапу ТКА.

В качестве примера рассмотрим порядок определения первого этапа ТКА сбор информации (рис. 2).

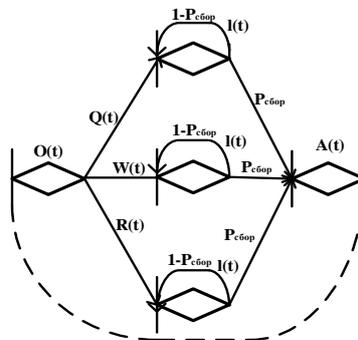
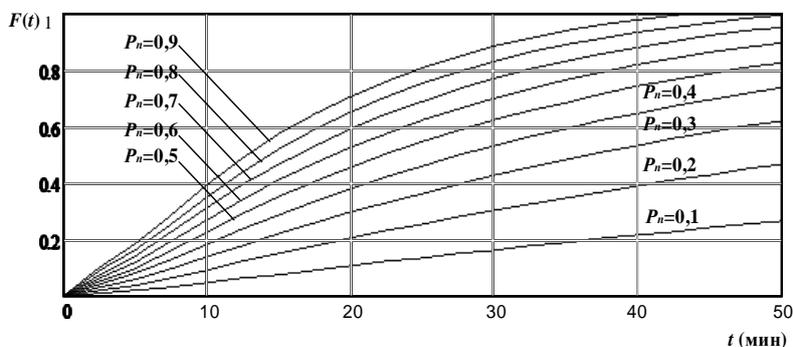


Рисунок 2 – Стохастическая сеть первого этапа ТКА

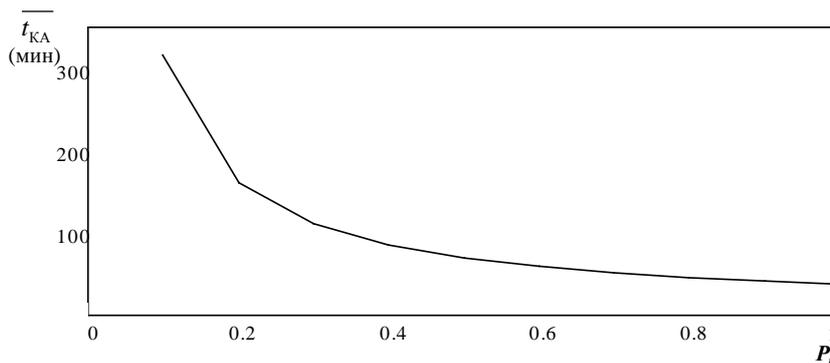
Порядок определения ВВХ подробно описан в [2], поэтому приведем только расчетные выражения и результаты расчета

$$F(t) = \left[ \sum_{k=0}^2 \left[ \frac{q \cdot P \cdot f \cdot (1 + s1_k)}{3(s1_k)^2 + 2A1 \cdot (s1) + B1} \cdot \frac{(1 - e^{s1_k t})}{(-s1_k)} \right] + \sum_{k=0}^2 \left[ \frac{wP \cdot f \cdot (1 + s2_k)}{3(s2_k)^2 + 2A2 \cdot (s2_k) + B2} \cdot \frac{(1 - e^{s2_k t})}{(-s2_k)} \right] \right. \\ \left. + \sum_{k=0}^2 \left[ \frac{r \cdot P \cdot f \cdot (1 + s3_k)}{3(s3)^2 + 2A3 \cdot (s3_k) + B3} \cdot \frac{(1 - e^{s3_k t})}{(-s3_k)} \right] \right] - \\ - \sum_{k=0}^2 \left[ \frac{q \cdot P \cdot f \cdot (1 + s1_k)}{3(s1_k)^2 + 2A1 \cdot (s1) + B1} \cdot \frac{(1 - e^{s1_k t})}{(-s1_k)} \right] \cdot \\ \cdot \sum_{k=0}^2 \left[ \frac{wP \cdot f \cdot (1 + s2_k)}{3(s2_k)^2 + 2A2 \cdot (s2_k) + B2} \cdot \frac{(1 - e^{s2_k t})}{(-s2_k)} \right] \cdot \\ \cdot \sum_{k=0}^2 \left[ \frac{r \cdot P \cdot f \cdot (1 + s3_k)}{3(s3)^2 + 2A3 \cdot (s3_k) + B3} \cdot \frac{(1 - e^{s3_k t})}{(-s3_k)} \right]$$

$$t(\text{ТКА}) = \left[ \sum_{k=0}^2 \left[ \frac{q \cdot P \cdot f \cdot (1 + s1_k)}{\varphi(s1_k)} \cdot \frac{1}{(-s1_k)} \right] + \sum_{k=0}^2 \left[ \frac{wP \cdot f \cdot (1 + s2_k)}{\varphi(s2_k)} \cdot \frac{1}{(-s2_k)} \right] + \sum_{k=0}^2 \left[ \frac{r \cdot P \cdot f \cdot (1 + s3_k)}{\varphi(s3_k)} \cdot \frac{1}{(-s3_k)} \right] \right] - \\ - \sum_{k=0}^2 \left[ \frac{q \cdot P \cdot f \cdot (1 + s1_k)}{\varphi(s1_k)} \cdot \frac{1}{(-s1_k)} \right] \cdot \sum_{k=0}^2 \left[ \frac{wP \cdot f \cdot (1 + s2_k)}{\varphi(s2_k)} \cdot \frac{1}{(-s2_k)} \right] \cdot \sum_{k=0}^2 \left[ \frac{r \cdot P \cdot f \cdot (1 + s3_k)}{\varphi(s3_k)} \cdot \frac{1}{(-s3_k)} \right]$$



а) зависимость интегральной функции распределения вероятности от времени реализации сбора информации ТКА



б) зависимость среднего времени реализации сбора информации ТКА от вероятности перехвата информации

Рисунок 3 – Вероятностно-временные характеристики ТКА

По аналогии определяется ВВХ остальных этапов реализации ТКА.

После определения ВВХ каждого этапа, необходимо определить ВВХ всей ТКА. Для этого первоочередным необходимо разработать профильную модель.

*Профильная модель ТКА:*

с вероятностью  $P_1$  осуществляется *подготовительный* этап за среднее время  $t_{\text{подг}}$  с функцией распределения  $O(t)$

с вероятностью  $P_{II}$  осуществляется этап *проникновения* за среднее время  $t_{\text{проник}}$  с функцией распределения  $A(t)$ .

с вероятностью  $P_{III}$  осуществляется этап *распространения* за среднее время  $t_{\text{расп}}$  с функцией распределения  $U(t)$ .

с вероятностью  $P_{IV}$  осуществляется этап *достижения цели* за среднее время  $t_{\text{д.ц.}}$  с функцией распределения  $AI(t)$ .

С обратной вероятностью сбора информации ТКА прекращает воздействие на каждом этапе если вероятность преодоления на этом этапе больше 0,8 или изменены значения параметров антивирусной системы за среднее время  $\bar{t}_{\text{повт}}$  с функцией распределения  $l(t)$ .

Требуется определить интегральную функцию распределения вероятности  $F(t)$  и среднее время  $\bar{T}$  преодоления антивирусной системы.

4) *Математическая модель.* Описанный выше процесс представим в виде стохастической сети (рис. 4)

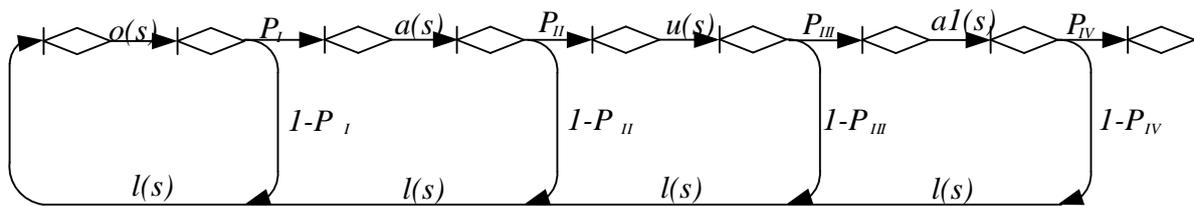


Рисунок 4 – Стохастическая сеть воздействия ТКА

Используя правила преобразования профильных моделей по правилам ТПСС, получены расчетные выражения для интегральной функции распределения вероятности и среднего времени реализации ТКА

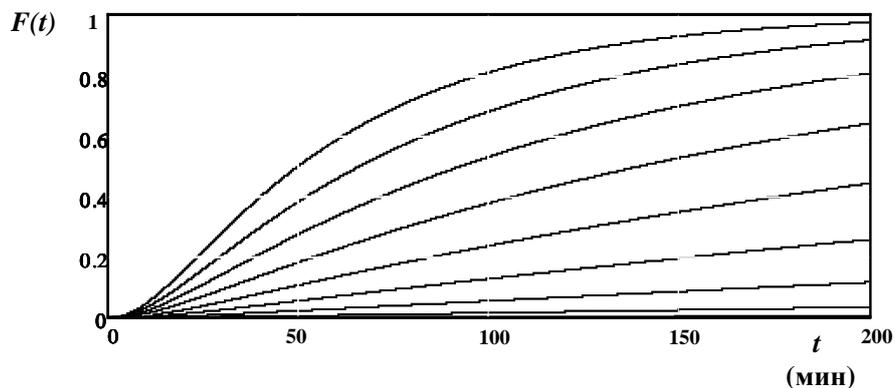
$$F = \sum_{k=1}^5 \frac{o \cdot P_I \cdot a \cdot P_{II} \cdot u \cdot P_{III} \cdot aI \cdot P_{IX} (1 + s_k)^4 \cdot \frac{1 - \exp[-s_k t]}{-s_k}}{\varphi'(s_k)}$$

$$\bar{T} = \sum_{k=1}^7 \frac{P_I \cdot a \cdot P_{II} \cdot u \cdot P_{III} \cdot aI \cdot P_{IX} (1 + s_k)^4 \cdot \frac{1}{(-s_k)^2}}{\varphi'(s_k)}$$

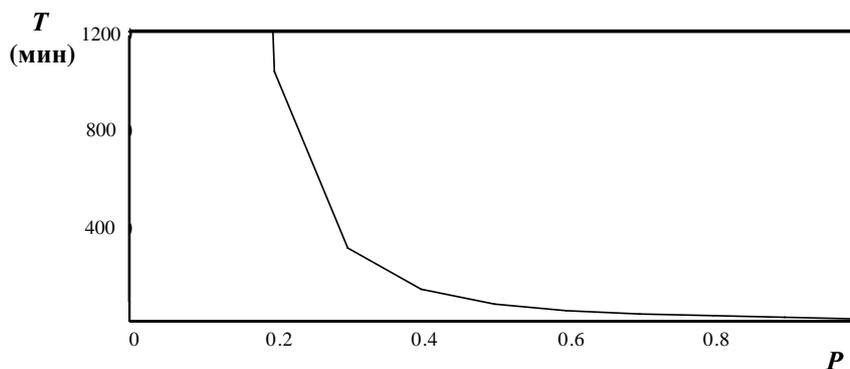
Результаты расчетов ВВХ представлены на рис. 5. В качестве исходных данных используются следующие значения:

$$\bar{t}_{\text{под}} = 30 \text{ мин}; \bar{t}_{\text{проник}} = 48 \text{ мин}; \bar{t}_{\text{расп}} = 8 \text{ мин}; \bar{t}_{\text{д.ц.}} = 25 \text{ мин}; \bar{t}_{\text{пов}} = 1 \text{ мин};$$

$$P_I = 0,1 \dots 0,9; P_{II} = 0,1 \dots 0,9; P_{III} = 0,1 \dots 0,9; P_{IX} = 0,1 \dots 0,9$$



а) зависимость интегральной функции распределения вероятности от времени реализации ТКА



б) зависимость среднего времени реализации ТКА

Рисунок 5 – Вероятностно-временные характеристики реализации ТКА

На основании анализа требований к системе защиты, её структуре, основным функциям, принципам действий разработана методика оценки устойчивости ИТКС в условиях информационного противоборства, позволяющая обосновать оптимальную структуру ИТКС при комплексном воздействии таргетированных кибернетических атак и формировать исходные данные для принятия мер защиты.

Представление ТКА в виде профильной модели и использование метода ТПСС позволяет определить ВВХ ТКА, что, в свою очередь, позволило обосновать исходные данные для разработанной методики. Предполагаемая методика оценки устойчивости ИТКС позволяет оценивать устойчивость ИТКС в условиях информационного противоборства (в мирное время и в период непосредственной угрозы начала агрессии) при воздействии ТКА на ИТКС. Результаты оценки позволяют обосновать требования к топологии ИТКС [7].

1. Елисеев А.И., Долгов А.А., Хорохорин М.А., Лаута О.С., Набатов К.А. Обеспечение живучести информационных систем (часть 3. Методы обеспечения и повышения живучести). Вестник Воронежского института ФСИН России. 2013. №1. С.91-94.
2. Коцыняк М.А., Лаута О.С., Нечепуренко А.П., Штеренберг И.Г. Методика оценки устойчивости информационно-телекоммуникационной сети в условиях информационного воздействия. Труды учебных заведений связи. 2016. Т. 2. № 4. С. 82-87.
3. Баранов В.В., Крибель А.М., Лаута О.С., Нечепуренко А.П. Применение метода топологического преобразования стохастических сетей для оценки эффективности средств защиты. В сборнике: Актуальные проблемы обеспечения информационной безопасности. труды Межвузовской научно-практической конференции. 2017. С. 47-52.
4. Коцыняк М.А., Иванов Д.А., Лаута О.С., Нечепуренко А.П. Методика оценки защищенности информационно-телекоммуникационной сети в условиях информационного противодействия. В сборнике: Радиолокация, навигация, связь. Сборник трудов XXIII Международной научно-технической конференции. В 3-х томах. 2017. С. 83-89.
5. Коцыняк М.А., Иванов Д.А., Лаута О.С., Нечепуренко А.П. Модель таргетированной кибернетической атаки. В сборнике: Радиолокация, навигация, связь. Сборник трудов XXIII Международной научно-технической конференции. В 3-х томах. 2017. С. 90-98.
6. Баранов В.В., Гудков М.А., Крибель А.М., Лаута О.С., Нечепуренко А.П. Защита канала управления роботизированных систем. В сборнике: Актуальные проблемы обеспечения информационной безопасности. труды Межвузовской научно-практической конференции. 2017. С. 32-37.
7. Коцыняк М.А., Карганов В.В., Лаута О.С., Нечепуренко А.П. Методика обоснования мер противодействия радиолокационной разведке высокоточного оружия. Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2016. № 9-10 (99-100). С. 54-57.

*V.Ya. Vilisov*

## **EDUCATING ROBOTIC SYSTEM HOW TO BEHAVE IN AN OPTIMAL MODE IN THE CONDITIONS OF RESISTANCE**

*Energy IT LLP, Korolyov city, Moscow Oblast, vvib@yandex.ru*

## Abstract

The work suggests an approach and one of the algorithms that educates a Robotic System (RS) acting in the conditions of resistance, how to behave in a feasible (optimal) mode. The approach is based on the game model approximation of preferences of the Decision Taker that controls the RS. Iteration adjustment of the model's parameters is performed on the basis of the decisions taken by the Decision Taker, which were obtained during the process of normal functioning of the RS, managed by the Decision Taker or received according to the testing results. Using a simulation model example, the work demonstrates a successful adaptation of the game model thus confirming a working capacity of the algorithm and the effectiveness of the approach.

Keywords: Robotic System, Game Model, Reverse Problem, Estimation.

1. I.B. Sheremet, N.A. Rudianov, A.V. Ryabov, V.S. Khruschov. On Necessity of Developing a Concept of Building and Applying Autonomous Robotic Military Complexes / Book of reports of the Russian National Scientific and Technological Conference "Extreme Robotics", Saint Petersburg: AP4Print LLC, 2016, pp. 35-39.
2. S.G. Sinita, S.I. Sechenev, I.V. Ryadchikov, Yu.V. Mamelin. Development of a Military Robotic System Model To Participate in Robotic Competitions // Book of reports of the Russian National Scientific and Technological Conference "Extreme Robotics", Saint Petersburg: Politekhniko-Service, 2015, pp. 275-279.
3. N.A. Rudianov, A.V. Ryabov, V.S. Khruschov. Land Robotic Systems Being the Defense Element of Objects and Territory of the Russian Federation // Book of reports of the Russian National Scientific and Technological Conference "Extreme Robotics", Saint Petersburg: Politekhniko-Service, 2015, pp. 16-17.
4. S.G. Tsarichenko, A.V. Ivanov, Yu.N. Osipov, A.Yu. Kartenichev, V.I. Yershov. Peculiarities of UAS Application by the Ministry of Emergencies // Book of reports of the Russian National Scientific and Technological Conference "Extreme Robotics", Saint Petersburg: Politekhniko-Service, 2015, pp. 24-29.
5. G. Raifa. Solution Analysis. - Moscow: Nauka, 1977, p. 408
6. Hamdy A. Taha. Operations Research: An Introduction. Translation from English - Moscow: Williams Publishing House, 2005, p. 912
7. Guillermo Owen. Game Theory - Moscow: Mir, 1971, p. 230
8. V. Ya. Vilisov. Adaptive Choice of Managerial Decisions. Operation Examination Models as the Means of Storing the Decision Taker's Knowledge - Saarbruecken (Germany): LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011, p. 376.
9. I.A. Kalyayev, S.G. Kapustyan. Problems of a Robotic Group Control // Mechatronics, Automation, Control, No. 6, 2009, pp. 33-40.
10. I.A. Kalyayev, A.R. Gaiduk, S.G. Kapustyan. Models and Algorithms of Collective Control in Robotic Groups. - Moscow: Fizmatlit. - 2009, p. 280
11. Sage A. P. and Melse J. L.. Estimation Theory with Application to Communication and Control - Moscow: Sviaz. - 1976, p. 496
12. Lee R.C.K. Optimal Estimation, Identification and Control. - Moscow: Nauka, 1966, p. 176

***В.Я. Вилисов***

## **ОБУЧЕНИЕ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОПТИМАЛЬНОМУ ПОВЕДЕНИЮ В УСЛОВИЯХ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ**

*ООО «Энергия ИТ», Московская обл., г. Королев, vvib@yandex.ru*

### Аннотация

Предложен подход и один из алгоритмов обучения робототехнической системы (РТС), действующей в условиях противодействия, целесообразному (оптимальному) поведению. Подход основан на аппроксимации игровой моделью предпочтений лица, принимающего решения (ЛПР), в интересах которого действует РТС. Итерационная настройка параметров модели выполняется на основе данных о решениях, принимаемых ЛПР, полученных в процессе нормального функционирования РТС под управлением оператора (ЛПР), либо по результатам тестирования. На имитационном модельном примере продемонстрирована успешная адаптация игровой модели, подтвердившая работоспособность алгоритма и эффективность подхода.

Ключевые слова: робототехническая система, игровая модель, обратная задача, оценивание.

### Введение

Большую группу прикладных отраслей, где существует острая потребность в использовании максимально автономных РТС, составляют сферы с экстремальными условиями [1-4]. Их можно разделить на две группы:

1. среды с большим риском для персонала – пожаро-, химически- и радиационноопасные. Здесь среда пассивно агрессивна, она не противодействует преднамеренно. Ее особенность заключается в наличии высокого уровня опасности для персонала и потенциального ущерба;

2. среды с активным противодействием противоборствующих сторон – военные, игровые и т.п. Эта группа сред преднамеренно действует во вред оперирующей стороне. Уровень потенциального ущерба здесь, как правило, также высок.

Управление системами в средах первого типа осуществляется, как правило, на основе методов *принятия решений в условиях риска и неопределенности* [5, 6]. В средах второго типа используют *игровые модели* [6, 7]. В данной работе рассмотрена вторая группа ситуаций, которые могут быть описаны антагонистическими матричными играми (АМИ) с нулевой суммой. В средах первого типа решения также могут приниматься на основе игровых моделей в тех случаях, когда следует обеспечить гарантированный результат, выбирая решение по максиминному (или минимаксному) критерию Вальда.

Применение тех или иных моделей в практике проектирования систем или управления ими основано на выборе типа (структуры) и параметров моделей, в максимальной степени адекватных объекту. Для обеспечения адекватности моделей в подавляющем большинстве случаев используется нормативный подход [5-7], при котором структура и параметры моделей выбираются и обосновываются априори, на стадии их разработки и начальной настройки. При этом обоснование правильности (адекватности) структуры и параметров модели обычно выполняется на основе логических построений.

Предлагаемый в данной работе подход к обеспечению адекватности модели (и эффективности управления на ее основе) базируется на принципах адаптации структуры и параметров модели к целевым предпочтениям ЛПР, в интересах которого функционирует РТС. Здесь под ЛПР можно понимать не только отдельного оператора РТС, но и группу экспертов, вырабатывающих коллективное решение в тех или иных ситуациях. Предполагается, что модель может настраиваться в процессе функционирования системы (РТС) в соответствии с изменяющимися предпочтениями ЛПР, которые, в свою очередь, могут быть следствием изменяющихся условий среды и/или концепции применения системы. Адаптивный подход позволяет обеспечить высокий уровень эффективности, живучести и автономности РТС для широкого круга прикладных задач [8].

Важным элементом рассматриваемого адаптивного подхода, позволяющего обеспечить высокие показатели эффективности функционирования РТС, является то, что традиционная одноконтурная (оператор РТС - среда) схема управления [1-4, 9, 10] заменяется на двухконтурную [8]. В первом контуре (оператор РТС - модель) на основе решения обратной задачи вычисляются (настраиваются) параметры АМИ, соответствующие предпочтениям ЛПР. Знания о предпочтениях, в различных приложениях, могут извлекаться не только из отдельного ЛПР-оператора, но и из коллективного ЛПР (группы экспертов, тестируемых в ситуационном зале). При достаточном уровне адекватности модели (АМИ) предпочтениям ЛПР, модель становится частью системы управления РТС и решения могут приниматься без непосредственного участия ЛПР во втором контуре (модель - среда). Важной особенностью двухконтурной схемы является возможность разнотемпового управления. Первый контур может работать в медленном темпе, обеспечивая необходимое качество настройки модели. Второй контур может работать в быстром темпе, оперативно реагируя на ситуации, возникающие в среде и требующие принятия решений. При этом пропускная способность второго контура будет полностью определяться вычислительными мощностями РТС и не будет зависеть от ограничений скорости реакции оператора. В случае существенной значимости нестационарности среды и/или предпочтений ЛПР может быть выстроен и третий контур управления, обеспечивающий компенсацию нестационарности путем перенастройки модели и передачи ее актуальной версии в систему управления РТС. Интервалы перенастройки модели и определяют время автономного функционирования РТС.

### **Игровые ситуации и модели в управлении РТС**

Как отмечается в ряде работ [1, 3, 9, 10], управление РТС значительно усложняется в условиях организованного (активного) противодействия. Примерами таких задач могут быть: игра роботов в футбол; ведение группами роботов боевых действий и т.п. [1, 10]. Далее будем иметь в виду второй тип задач.

В качестве примера, иллюстрирующего предлагаемый подход, рассмотрим модель взаимодействия обороняемых наземных целей с атакующими их летательными аппаратами. Исходные данные приведены ниже в разделе *Модельный пример*.

Существует достаточно много сценариев применения групп роботов в боевых условиях [1, 9, 10]. Группы могут быть, например, гетерогенными, состоящими из различных типов боевых и обеспечивающих роботов. Тогда чистыми стратегиями их применения могут быть, например, различные конфигурации функциональных подгрупп, последовательности их действий, вариантов целераспределения и т.п. Группы могут быть и гомогенными, тогда чистые стратегии могут формироваться как варианты реакции роя роботов на те или иные состояния среды.

В качестве чистых стратегий могут рассматриваться не только элементарные варианты (например, количество выделяемых средств того или иного типа), но и сценарии поведения, что может существенно снизить размерности векторов стратегий игроков.

В ряде работ [1, 3, 9, 10] отмечается, что в настоящее время большое количество ответственных операций все еще выполняется оператором, управляющим РТС в удаленном режиме. Следует отметить, что наличие ЛПР в контуре оперативного управления РТС создает дополнительные проблемы (защищенные каналы связи, скрытность, и т.п.) и приводит к снижению эффективности операций, проводимых с участием РТС. Поэтому в настоящее время очень актуальной является проблема повышения эффективной автономности РТС.

Для прикладного использования любых моделей требуется знание структуры и параметров целевого функционала. В игровых моделях в этой роли выступает платежная матрица (ПМ). В реальных приложениях игровая задача многокритериальна, поэтому платежная матрица должна отражать разнообразные показатели. Однако в классической АМИ платежи предполагаются скалярными. Поэтому, для обеспечения максимальной адекватности АМИ, ПМ должна быть интегральной сверткой множества целевых показателей. Для реальной игровой ситуации задать многокритериальную ПМ нормативным способом представляется маловероятным. Этим и обусловлена *априорная неопределенность* [8] при использовании АМИ на практике.

Кроме априорной имеет место еще *текущая неопределенность*, обусловленная нестационарностью целевых предпочтений ЛПР, возможно, вызванной изменениями в среде. Возникающая текущая неопределенность, для поддержания адекватности АМИ, должна инициировать подстройку параметров платежной матрицы игры.

Оба эти вида неопределенности в неадаптивных системах управления приводят к снижению эффективности РТС. Снять неопределенности позволяет адаптивный подход, применяемый в данной работе для управления РТС в игровых ситуациях и средах.

Параметрами АМИ размерности  $m \times n$  являются элементы ПМ  $A = \|a_{ij}\|_{mn}$ , где  $a_{ij}$  отражают выигрыш оперирующей стороны (ЛПР, т.е. первого игрока – И1) и одновременно проигрыш второго игрока (И2). Задачу поиска решения АМИ при известной ПМ будем называть прямой АМИ (ПАМИ), а восстановление платежной матрицы по наблюдениям – обратной АМИ (ОАМИ).

Решение ПАМИ представляется в виде пары оптимальных смешанных стратегий соответственно для И1 и И2:  $\bar{p} = [p_1 \ p_2 \ \dots \ p_m]^T$ ,  $\bar{q} = [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_n]^T$ , и цены игры  $V = \bar{p}^T A \bar{q}$ , где  $T$  - символ транспонирования. Для компонентов векторов  $\bar{p}$  и  $\bar{q}$  должно выполняться условие нормировки:  $\sum_{i=1}^m p_i = 1$ ;  $\sum_{j=1}^n q_j = 1$ . Решение ПАМИ может быть полученное одним из известных способов, например, сведением игры к задаче линейного программирования или итерационным методом Брауна-Робинсон [7].

### **Решение обратной игровой задачи**

Рассмотрим, какие данные входят в состав наблюдений и что необходимо найти в результате решения обратной АМИ.

Обратная задача в практике управления не подменяет прямую, а дополняет ее [8], т.к. назначение обратной АМИ - аккумулировать положительный опыт принятия решений в виде оценок элементов платежной матрицы  $A$ , отражающих текущие предпочтения ЛПР. Затем в новых партиях игры, используя оценки элементов платежной матрицы, следует отыскивать решение - тройку  $(\bar{p}, \bar{q}, V)$ , одним из методов решения прямой АМИ.

Для решения обратной АМИ предполагается, что: текущие смешанные стратегии игроков и платежи измеримы; лицом, принимающим решение, или оперирующей стороной, является И1 и обратная задача решается в его интересах. Принято также, что величина текущего платежа становится известной ЛПР не после каждой партии игры, а с некоторым запаздыванием, т.е. выигрыш можно

рассматривать как некоторую усредненную (или интегрированную) по совокупности ходов реакцию объекта или игровой среды. Это часто и имеет место в реальной практике управления, когда игровая ситуация повторяется многократно, а эффект проявляется с некоторым временным лагом. Таким образом, многократно повторяемых партий игры больше, чем наблюдений, пригодных для обработки, за счет аperiodического запаздывания реакции среды на принятые и реализованные решения. Наблюдения  $(\bar{p}_k, \bar{q}_k, V_k)$  производятся в дискретные  $k$ -е моменты времени. Следует отметить, что в различных приложениях не все эти три элемента могут быть наблюдаемы (доступны для измерения игроком И1). В этих случаях постановка и алгоритм решения обратной задачи, а значит и эффективности адаптивной процедуры, будет отличаться от рассматриваемой далее.

Обратная АМИ по структуре относится к задачам параметрической идентификации [11, 12], в которой оцениваемыми параметрами являются элементы платежной матрицы  $A$ .

Для АМИ уравнение измерений имеет вид:

$$V_k = \bar{p}_k^T A \bar{q}_k + \varepsilon_k,$$

где  $\varepsilon_k$  – невязка в  $k$ -ом наблюдении, обусловленная как неточностью измерений, так и текущим качеством настройки параметров модели игры (элементов матрицы  $A$ ):

$$\varepsilon_k = V_k - \bar{p}_k^T A \bar{q}_k.$$

Тогда задача оптимального оценивания элементов платежной матрицы методом наименьших квадратов (МНК) примет вид:

$$\sum_{k=1}^N (V_k - \bar{p}_k^T A \bar{q}_k)^2 \rightarrow \min_A$$

Построим рекуррентный алгоритм последовательного оценивания (уточнения) параметров платежной матрицы по мере поступления наблюдений. Для этого приведем исходное скалярное уравнение измерений к матричной форме, полагая, что имеется некоторая исходная совокупность  $N$  наблюдений  $k = \overline{1, N}$ .

Для удобства построения рекуррентного алгоритма оценивания представим матрицу  $A$  в виде вектора, составленного из ее столбцов:  $\bar{a} = [\bar{a}_1^T \ \bar{a}_2^T \ \dots \ \bar{a}_n^T]^T$ , где  $\bar{a}_j$  – это  $j$ -й столбец матрицы  $A$ . Тогда:

$$\bar{p}_k^T A \bar{q}_k = \bar{q}_k^T A \bar{p}_k = \bar{q}_k^T \begin{bmatrix} \bar{p}_k^T & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \bar{p}_k^T & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \bar{p}_k^T \end{bmatrix} \bar{a} = \bar{r}_k^T \bar{a},$$

где  $\bar{r}_k = [q_k^{(1)} \bar{p}_k^T \ q_k^{(2)} \bar{p}_k^T \ \dots \ q_k^{(n)} \bar{p}_k^T]^T$ ,  $q_k^{(j)}$  – это  $j$ -й компонент вектора  $\bar{q}_k$ .

С учетом данных представлений модифицированное скалярное уравнение измерений примет вид:

$$V_k = \bar{r}_k^T \bar{a} + \varepsilon_k,$$

а задача оптимального оценивания:

$$\sum_{k=1}^N (V_k - \bar{r}_k^T \bar{a})^2 \rightarrow \min_{\bar{a}}.$$

Для  $N$  наблюдений (шагов измерений) совокупность уравнений измерений можно представить в векторной форме следующим образом:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \dots \\ V_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{r}_1^T \\ \bar{r}_2^T \\ \dots \\ \bar{r}_N^T \end{bmatrix} \bar{a} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \dots \\ \varepsilon_N \end{bmatrix},$$

или, иначе:

$$\bar{V} = R \bar{a} + \bar{e}.$$

Отсюда сумму квадратов отклонений:

$$s = \bar{e}^T \bar{e} = (\bar{V} - R \bar{a})^T (\bar{V} - R \bar{a})$$

Далее, в соответствии с алгоритмом построения МНК-оценок, по совокупности  $N$  измерений [8, 11, 12] оценка вектор платежей примет вид:

$$\hat{a}_{N+1} = (R_N^T R_N)^{-1} R_N^T \bar{V},$$

где нижний индекс отражает количество измерений, по которым выполняется оценивание, а «крышка» над  $a_N$  означает, что вычислена оценка вектора платежей, как приближение их истинных значений.

Обозначим дисперсионную матрицу оценок:

$$Q_N \triangleq (R_N^T R_N)^{-1}.$$

Тогда, выполнив ряд общепринятых преобразований [11, 12], получим следующую пару рекуррентных уравнений оценивания элементов платежной матрицы:

$$\hat{a}_{N+1} = \hat{a}_N + Q_N \bar{r}_{N+1} [\bar{r}_{N+1}^T Q_N \bar{r}_{N+1} + 1]^{-1} [V_{N+1} - \bar{r}_{N+1}^T \hat{a}_N],$$

$$Q_{N+1} = Q_N - Q_N \bar{r}_{N+1} [\bar{r}_{N+1}^T Q_N \bar{r}_{N+1} + 1]^{-1} \bar{r}_{N+1}^T Q_N,$$

Начальные значения вектора оценок  $\hat{a}_0$  обычно задают [8, 11, 12] нулевыми, а дисперсионной матрице  $Q_0$  придают диагональный вид с достаточно большими значениями ( $10^3 - 10^5$ ) диагональных элементов.

### Модельный пример

В качестве имитационного эксперимента, иллюстрирующего элементы адаптивной процедуры управления РТС рассмотрен упрощенный вариант игровой ситуации, в которой РТС функционирует в условиях активного противодействия.

Пусть игрок И1, имеющий два самолета, оснащенных поражающими средствами, стремится вывести из строя объект, охраняемый игроком И2. У игрока И2 имеются четыре зенитных ракетных комплекса (ЗРК), при помощи которых осуществляется оборона объекта. Для разрушения объекта достаточно хотя бы одного прорвавшего оборону самолета, а с уничтожением одного самолета с большой вероятностью справится один ЗРК. Для подлета к объекту И1 может использовать четыре воздушных коридора.

У И1 есть две чистые стратегии: 1 - самолеты подлетают по любым разным коридорам; 2 - оба самолета подлетают по какому-то одному из коридоров.

Чистые стратегии И2 следующие: 1 - поставить по одному ЗРК на каждый коридор; 2 - поставить по два ЗРК на два любые коридора (остальные два коридора остаются неприкрытыми); 3 - поставить два ЗРК на один из коридоров и по одному ЗРК еще на два коридора; 4 - поставить три ЗРК на один из коридоров и один ЗРК еще на один коридор; 5 - поставить все четыре ЗРК на один из коридоров.

С учетом вероятностей выбора сторонами коридоров и объема средств для нападения и защиты можно определить вероятности выполнения первым игроком (И1) своей задачи при тех или иных сочетаниях чистых стратегий игроками. Смысловым содержанием цены игры также является вероятность выполнения задачи первым игроком.

Стратегии 4 и 5 игрока И2 заведомо невыгодны хотя бы потому, что три, а тем более четыре, ЗРК в пределах одного коридора не нужны, т.к. у И1 лишь два самолета, каждый из которых с вероятностью, близкой к единице поражается одним ЗРК. Поэтому И2 может ограничиться стратегиями 1, 2, 3.

Заполним платежную матрицу. Если И1 выбирает стратегию 1, а И2 - стратегию 1, то ни один самолет не прорвется к объекту, а значит в этом случае выигрыш И1, как вероятность прорыва к объекту, равен нулю ( $a_{11} = 0$ ). Если И1 выбирает стратегию 1, а И2 - 2, то какие бы два коридора ни выбрал И2 для размещения ЗРК, у И1 из шести вариантов будут только один проигрышный ( $a_{12} = \frac{5}{6} = 0.833$ ). Аналогично  $a_{21} = 1$ ,  $a_{22} = 0.5$  (см. табл. 1). Нижняя цена игры равна 0.5, верхняя 0.833. Седловой точки нет, оптимальное решение лежит в области смешанных стратегий. Решение игры следующее: цена игры  $v = 0.625$ , оптимальная смешанная стратегия И1 -  $p_1 = 0.375$ ,  $p_2 = 0.625$ , И2 -  $q_1 = 0.25$ ,  $q_2 = 0.75$ .

Таким образом, 4-я и 5-я чистые стратегии второго игрока оказываются доминируемыми, а если решить игру с приведенными выше значениями платежной матрицы, то в оптимальной смешанной стратегии И2 3-я чистая стратегия будет неактивной, т.е. вероятность ее использования будет нулевой. Этот предварительный анализ показывает, что в составе данных, используемых при решении обратной задачи, будут участвовать лишь первые две стратегии И2, а значит в модельном примере, для упрощения представления данных, можно рассматривать лишь по две стратегии каждого из игроков (см. табл. 1).

Заметим, что в реальной задаче такой априорный анализ невозможен (т.к. элементы платежной матрицы априори неизвестны), поэтому в реализациях возможно появление любых чистых стратегий игроков, в том числе 3-й, 4-й и 5-й стратегий И2. Больше того, платежи могут быть интегральными, включающими не один (как в данном примере - вероятность выполнения задачи первым игроком), а несколько целевых показателей, которые можно полагать входящими в некоторую свертку, представленную в платежной матрице АМИ.

Таблица 1. Платежная матрица игры (для И1) и ее решение

	Чистые стратегии И2	Оптимальная смешанная стратегия И1
--	---------------------	------------------------------------

		1	2	
Чистые стратегии И1	1	<b>0</b>	<b>0.833</b>	0.375
	2	<b>1</b>	<b>0.500</b>	0.625
Оптимальная смешанная стратегия И2		0.250	0.750	Цена игры $V = 0.625$

Откуда в реальной действительности может быть получена статистика многократно повторяющихся партий игры? В подобных задачах обычно эффект проявляется с некоторым лагом – через несколько партий игры (в нашем модельном примере принято – через 3 партии). Таким образом, в состав одного наблюдения входят реализации (оценки) оптимальных стратегий И1, И2 и цены игры (как средний платеж за ряд партий, через которые он проявляется).

Если реальной статистики нет (т.е. нет данных, полученных в режиме нормального функционирования РТС), то сбор ее возможен в режиме деловой игры с использованием соответствующих ситуационных стендов, полигонов, оборудования виртуальной реальности, имитирующие максимально адекватное взаимодействие сторон и принятие необходимых решений. Вариант ситуационной имитации реальной игры часто даже предпочтительнее т.к. позволяет более глубоко и всесторонне «в неспешном темпе» первого контура управления прорабатывать возникающие ситуации принятия решений, а сами решения могут приниматься не одним оператором РТС, а группой операторов с последующим «разбором полетов». Эффект, отражающий комплекс нескольких целевых показателей может оцениваться, например, по балльной системе. В некоторых случаях это дает возможность построить более адекватную модель или группу моделей, соответствующих структурно различным группам ситуаций (мизансценам), что позволит при использовании моделей в автоматическом режиме переключаться между ними в нестационарных условиях взаимодействия сторон.

Как и в случае структурно других, не игровых, моделей принятия решений [5-8], для решения обратной задачи следует использовать лишь данные, соответствующие решениям, которые можно считать оптимальными (удачными, хорошими, эффективными и т.п.). Ретроспективный анализ оптимальности принятых ранее решений, как правило, проводится лицом (единолично или группой экспертов), оценивающим решения (ЛОР), т.е. лицом, компетентным давать оценки решениям, принятым операторами РТС. Таким образом, в результате решения обратной АМИ будет построена модель, аппроксимирующая положительный опыт ЛПП. А далее такая модель может быть использована в составе бортового программно-математического обеспечения РТС, что позволит получить высокую оперативность, повышенную автономность, а качество управления, близкое к «ручному».

Для решения обратной АМИ было смитировано 100 комплектов реализаций (партий игры). Наблюдениями послужили скользящие оценки по очередным трем партиям игры. На рис. 1 приведены пошаговые изменения оценок элементов платежной матрицы в результате решения обратной АМИ по данным наблюдений. На рис. 2 представлено изменение длины вектора невязки, т.е. нормированного расстояния между точкой фактических (модельных) значений элементов платежной матрицы (см. табл. 1) и точкой оценок этих значений ( $\hat{a}$ ), на каждом шаге наблюдений.

В качестве меры достаточности настройки модели можно использовать, например, функцию аппроксимации невязки (для данного модельного примера:  $y = 4.77x^{-0.908}$ ). Другим вариантом правила остановки рекуррентной процедуры оценивания (настройки) параметров модели может быть минимальная величина уменьшения невязки вектора оценок.

Поскольку построение платежной матрицы игры по наблюдениям не является конечной целью использования АМИ в управлении РТС, то качество итерационного процесса настройки модели можно контролировать и по «конечному продукту» - качеству решений, принимаемых по матрице оценок на каждом шаге настройки. Для этого следует решать прямую АМИ на каждом шаге итерационного процесса, что даст пару оптимальных смешанных стратегий игроков и цену игры.

Как результат итерационного оценивания, на рис. 3 приведена нормированная невязка оптимальных смешанных стратегий игроков относительно оптимальных стратегий модели, приведенных в табл. 1. На рис. 4 показано приближение оценки цены игры, полученной по матрице оценок платежей, к величине цены игры, полученной по модельной матрице, приведенной в табл. 1.

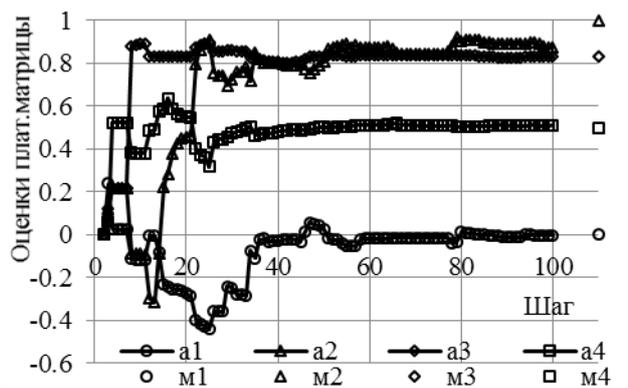


Рисунок 1 – Сходимость оценок платежной матрицы

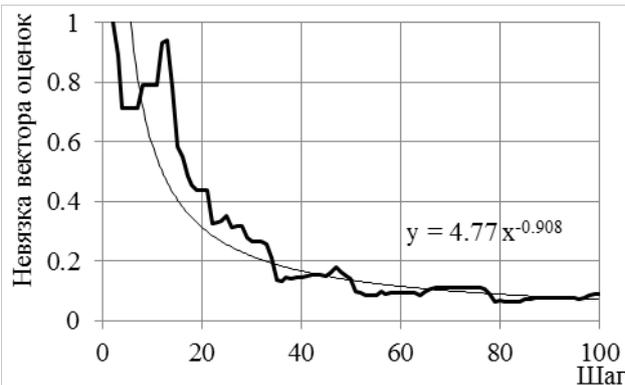


Рисунок 2 – Сходимость невязки оценок платежей

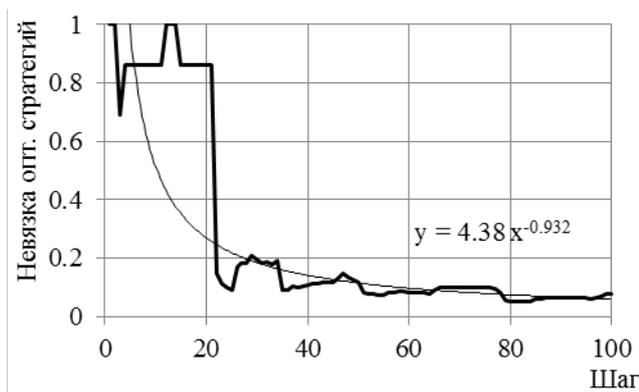


Рисунок 3 – Сходимость невязки оптимальных стратегий

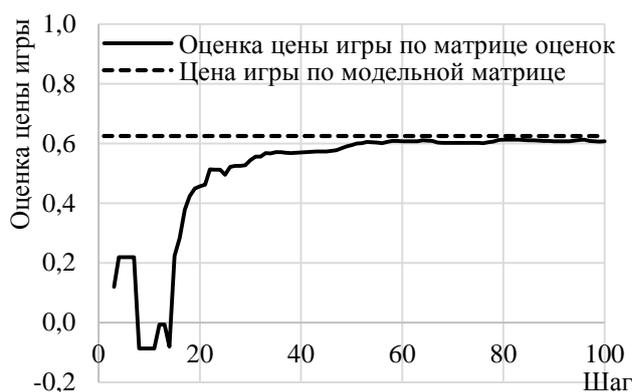


Рисунок 4 – Сходимость цены игры

Как видно на рисунках, темпы сходимости решений, полученных по матрице оценок платежей, примерно те же, что и оценок элементов матрицы платежей. А это означает, что правило остановки процесса настройки игровой модели можно строить как по оценкам элементов платежной матрицы, так и на основании решений, полученных по этой матрице. По оценкам элементов платежной матрицы такое правило применять проще т.к. для принятия решения об остановке нет необходимости в вычислении оптимального решения АМИ.

### Выводы

Исследования адаптивного алгоритма управления РТС, основанного на решении обратной и прямой АМИ, показали устойчивый характер сходимости по оценкам и решениям для различных размерностей модели и вариантов скользящих интервалов наблюдений.

Использование методов оптимального планирования эксперимента в процессе решения обратной задачи позволит сократить время адаптации модели к предпочтениям ЛПР.

Настроенная и заложенная в РТС модель является в высокой степени адекватной предпочтениям ЛПР, а принимаемые РТС решения по качеству не будут уступать решениям «учителя» игровой модели. Однако, в отличие от управления РТС оператором, управление его «двойником» - моделью игры, позволяет:

- существенно сократить продолжительность цикла управления;
- снизить значимость каналов связи, подверженным воздействию средств радиоборьбы;
- повысить автономность РТС.

При появлении признаков нестационарности среды или при изменении предпочтений ЛПР, модель вновь может быть настроена и перезагружена в РТС. Процесс настройки (обучения) модели может проходить и в специальных ситуационных центрах с привлечением групп экспертов, а настроенная для новых условий игровая модель может быть загружена, как «горячее» обновление, не прерывая текущего нормального функционирования РТС.

1. Шеремет И.Б., Рудианов Н.А., Рябов А.В., Хрущев В.С. О необходимости разработки концепции построения и применения автономных робототехнических комплексов военного назначения //

- Труды международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника», СПб: ООО «АП4Принт», 2016 г., С. 35-39.
2. Сеница С.Г., Сеченов С.И., Рядчиков И.В., Мамелин Ю.В. Разработка модели боевой робототехнической системы для участия в робототехнических соревнованиях // Труды международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника», СПб: Политехника-Сервис, 2015 г., С. 275-279.
  3. Рудианов Н.А., Рябов А.В., Хрущев В.С. Наземные робототехнические комплексы как элемент системы обороны объектов и территорий РФ // Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции «Экстремальная робототехника», СПб: Политехника-Сервис, 2015 г., С. 16-17.
  4. Цариченко С.Г., Иванов А.В., Осипов Ю.Н., Картеничев А.Ю., Ершов В.И. Особенности применения БПЛА в интересах МЧС // Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции «Экстремальная робототехника», СПб: Политехника-Сервис, 2015 г., С. 24-29.
  5. Райфа Г. Анализ решений. - М.: Наука, 1977, 408 с.
  6. Таха Х.А. Введение в исследование операций: Пер. с англ. - М.: Изд. дом Вильямс, 2005, 912 с.
  7. Оуэн Г. Теория игр. - М.: Мир, 1971. - 230 с.
  8. Вилисов В.Я. Адаптивный выбор управленческих решений. Модели исследования операций как средство хранения знаний ЛПР. – Саарбрюкен (Германия): LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011, 376 с.
  9. Каляев И.А., Капустян С.Г. Проблемы группового управления роботами // Мехатроника, автоматизация, управление, № 6, 2009, С. 33-40.
  10. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. – М.: Физматлит. – 2009. – 280 с.
  11. Сейдж Э., Мелс Дж. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении. - М.: Связь. - 1976. - 496 с.
  12. Ли Р. Оптимальные оценки, определение характеристик и управление. - М.: Наука, 1966. – 176 с.

*M.V. Arkhipov, V.F. Golovin, E.A. Vzhesnevsky*

## **HUMAN-MACHINE INTERFACE OF THE MANIPULATION ROBOT<sup>VII</sup>**

*Moscow polytechnic university, Moscow, e-mail: medicalrobot@mail.ru*

### **Annotation**

To show the reality of using a manipulation robot for the tasks of restorative medicine, a manipulative robot RM-01 of domestic production with an integrated domestic three-component force sensor was proposed. In addition to the three-component force sensor, the robotic complex for controlling force interaction included a software and hardware complex based on the LabView design environment with an analog signal conversion system in the control on the manipulator.

The coordination of the three-component force sensor with the robot performed a human-machine interface implemented on the basis of a personal computer, specialized controllers and analog-digital converters. To improve the service while setting up and programming the manipulator's operation with a force sensor, a method of software-hardware conversion of force signals was proposed that allows you to assign the position-force control modes. In the article the elements of the interface, with the tactile component for teaching and the graphical component for setting up input-output data on the necessary efforts and movements of the robot tool are considered.

**Keywords:** manipulation robot, human-machine interface, position-force control, biomechatronic module, force point, force sensor, control program, admittance control, control program.

1. Golovin, V., Zhuravlev, V., Arkhipov M., Robotics in Restorative Medicine. LAPLAMBERT Academic Publishing, GmbH & Co. KG, 2012. 280 с.
2. Vukobratovic M. How to control interacting with dynamic environment. Journal of Intelligent and Robotic System, 1997. № 19. – pp. 119-152.
3. Arkhipov M., Golovin V., Kocherevskaya L., Vzhesnevsky E., Uglev A., Legotin S. Expansion of ergonomic functions in medical robotics // HSOA Journal of Alternative, Complementary & Integrative Medicine, 2017. № 3: 031. - С. 5. DOI: 10.24966 / ACIM-7562/100031.

4. Golovin V., Zhuravlev V., Arkhipov M. Position-force control of a medical robot interacting with dynamic biological soft tissues // *Advances on Theory and Practice of Robots and Manipulators, Proceedings of Romans 2014 XX CISM-IFTToMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators*. Springer, 2014. - P. 303-310.
5. Arkhipov M., Leskov A., Golovin V., Gercik Yu., Kocherevskaya L. Prospects of robotics development for restorative medicine // *Proceedings of the 25th Conference on Robotics in the Alpe Adria-Danube Region (RAAD 2016)*. Springer, 2017. - P. 499-506.
6. Golovin V., Zhuravlev V., Arkhipov, M. Training and control of the medical robot for massage // *New Trends in Medical and Service Robots, Proceedings of the Third International Workshop on Medical and Service Robots. Series Mechanisms and Engineering Science. V. 20*. Springer, 2014. - P. 99-107.
7. Golovin V.F., Leskov A.G., Arkhipov M.V., Rachkov M.Y..., Legotin S.D. Robot training by movement sowing and considering environment deforming // *Izvestia SFU. Engineering Sciences*, 2015. No. 10 (171). - P. 213 – 227.
8. Gorinevsky D.N., Formalsky A.M., Schneider A.Y., *Force Control of Robotic Systems*. Moscow: Fizmatlit, 1994. - 368 p.
9. Kulakov F.M., Chernakova S.E. Information technology of training robots by movements sowing // *Mechatronics, automation, management*, 2008. № 7. - P. 23-28.
10. Leskov A., Golovin V., Arkhipov M., Kocherevskaya L. Training of the robot to assigned geometric and force trajectories // *New Trends in Medical and Service Robots, Proceedings of Fourth International Workshop on Medical and Service Robots. Series Mechanisms and Engineering Science. V. 39*. Springer, 2015. - P. 75-84.
11. Razumov A.N., Biryukov A.A., Golovin V.F., Arkhipov M.V. Improvement of fighting efficiency for military people with the help of robotics for restorative medicine // "Physiotherapy exercises: achievements and development prospects: Materials of the IV All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation (May 27-28, 2015) / Edited by N.L. Ivanova, O.V. Kozyreyov. - Moscow: "RGUFG", 2015. pp. 153-158.
12. Base admittance control. Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=JRbAesam-EE> (accessed: 08.07.2017).
13. Manufacturing technology Alborg University 2011 KUKA LWR Making a drawing. Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=kUxJEYeCRQg> (accessed: 08.07.2017).
14. Impedance control. Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=WS1gSRcJbJQ> (accessed: 08.07.2017).

*М.В. Архипов, В.Ф. Головин, Е.А. Вжесневский*

## ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫЙ ИНТЕРФЕЙС МАНИПУЛЯЦИОННОГО РОБОТА

*Московский политехнический университет, Москва, e-mail: medicalrobot@mail.ru*

### Аннотация

Чтобы показать реальность применения манипуляционного робота для задач восстановительной медицины был предложен манипуляционный робот отечественного производства РМ-01 с интегрированным отечественным трехкомпонентным устройством силового оцувствления. Кроме трехкомпонентного датчика усилия в состав робототехнического комплекса для контроля силового взаимодействия входил программно-аппаратный комплекс на базе среды проектирования LabView с системой преобразования аналоговых сигналов в управляющее воздействие на манипулятор. Согласование работы трехкомпонентного силового датчика с роботом выполнял человеко-машинный интерфейс реализованный на базе персонального компьютера, специализированных контроллеров и аналогово цифровых преобразователей.

Для повышения сервиса при настройке и программировании работы манипулятора в составе с силовым датчиком был предложен метод программно-аппаратного преобразования силовых сигналов, который позволяет задавать режимы позиционно-силового управления. В статье рассматриваются элементы интерфейса, с тактильной составляющей для обучения и графической составляющей для настройки ввода-вывода данных о необходимых усилиях и движениях инструмента робота.

Ключевые слова: манипуляционный робот, человеко-машинный интерфейс, позиционно-силовое управление, биомехатронный модуль, силовая точка, датчик усилия, управляющая программа, податливое управление, управляющая программа.

## Введение

Известны исследования в области робототехники взаимодействующей с податливыми объектами [1, 2, 3, 5]. В работе [7] были описаны методы податливого и упругого управления роботом с помощью демонстрации, учитывающей деформирование мягких тканей. В данной статье рассматривается реализация методов управления манипуляционным роботом с биомехатронным модулем с помощью разработанного интерфейса, через который задаются режимы тактильного взаимодействия с податливыми объектами. В исследованиях робот должен выполнять движения, состоящие из некоторой контролируемой последовательности действий. Существует много возможных траекторий на которых происходит тактильное взаимодействие с объектом, при этом силовое взаимодействие должно выполняться с определенной точностью. Каждое перемещение по траектории формируется на основании сигналов усилия, преобразованных управляющей программой являющейся составной частью человеко-машинного интерфейса. Тактильные свойства определяются параметрами механического взаимодействия с податливой средой посредством силового контакта. Графическая часть интерфейса оператора определяет режимы перемещения манипулятора и обеспечивает непрерывный силовой контроль.

Под взаимодействием с податливыми объектами, выполняемым с участием манипуляционного робота, понимается не инвазивное, контролируемое, в основном повторяющееся, контактное деформирование мягкой ткани, без изменения ее формы. Известны технологические задачи, где уместно применение метода силового обучения манипуляционных систем [8, 9]. В последнее время манипуляционная техника слала все глубже внедряться в непроизводственные задачи, такие как физиотерапия [1], хирургия, социальная сфера [3], военная медицина [11]. В данных сферах предъявляются повышенные требования к адаптивным возможностям манипуляционных систем. Одним из главных параметров, требующих непрерывного контроля, является контакт робота с человеком, который проявляется в усилиях их взаимодействия. Таким образом, актуальной задачей является снабжение робота человеко-машинным интерфейсом обеспечивающим сервис для оператора и повышающий эффективность работы и настройки системы [5].

## Контактное взаимодействие манипуляционного робота с податливой средой

Задачи контактного взаимодействия с податливыми объектами все чаще становятся предметом поисковых исследований с различными видами манипуляционных роботов. В сети интернет доступны видеосюжеты, где роботы управляются в податливом [12, 13] и упругом [14] режимах. Данные режимы основаны на обработке силовой информации с датчиков - суставных или фланцевом.

Контактное взаимодействие инструмента и податливой поверхности происходит под действием усилия, прикладываемого к инструменту со стороны робота  $F_a$ , вызывая следующие усилия: реакцию среды  $F_e$ , инерционную силу  $F_i$ , силы вязкого и сухого трения  $F_\mu$  и  $F_f$ , силу упругого сопротивления  $F_s$ . В общем случае [4]:

$$F_e = F_i + F_\mu + F_f + F_s.$$

Рассмотрим поверхность податливой среды, например биологической мягкой ткани (МТ), в виде модели с инерционно вязкоупругими свойствами [6]. Если пассивно сопротивляющуюся МТ считать инерционной вязкоупругой средой, то в аналитической механике динамическая модель такой среды, взаимодействующей с инструментом робота с усилием  $F$  в системе координат, связанной с инструментом, закреплённом на конечном звене робота, может быть представлена нелинейным дифференциальным уравнением [10]:

$$M_1(x)\ddot{x} + L_1(x, \dot{x}) = -F,$$

где  $x, \dot{x}, \ddot{x} \in R^n$  – векторы положения, скорости, ускорения соответственно в системе координат, связанной с инструментом, закреплённом на конечном звене робота;

где  $M_1(x) \in R^{m \times m}$  – положительно определённая матрица, характеризующая инерционные свойства среды;  $L_1(x, \dot{x}) \in R^m$  – вектор, характеризующий вязкоупругие свойства среды и ее вес;  $F \in R^m$  – вектор сил, действующих на конечное звено (инструмент) манипулятора со стороны среды.

## Обучение силовых точек на траекториях

Обеспечить взаимодействие чувствительного элемента манипуляционного робота с податливыми объектами, требует решения двух задач – позиционной и силовой. Для решения задачи отслеживания заданного усилия прижатия чувствительного элемента манипуляционного робота к перемещающемуся упругому объекту необходимо было предложить новый метод очувствления. В работе [7] данный метод был назван как «упругое управление». Этот метод должен учитывать информацию об усиллии в каждой деформируемой точке податливого объекта.

Серия задач возникающих при таком взаимодействии связана с реализацией методов силового обучения и позиционно-силовым управлением. Подготовительный этап включал следующие экспериментальные задачи на тестовых образцах (имитирующих мягкую биологическую ткань):

- измерение усилий в обученной позиционной точке путем деформирования упругого образца;
- определение координат в обученной силовой точке путем деформирования упругого образца.

Для ввода в робот данных о задаваемых и измеряемых перемещениях и усилиях по траекториям был предложен метод обучения силовых точек находящихся на этих траекториях [10]. Этот метод требовал задания и измерения только одной составляющей усилия, направленной вдоль инструментальной оси робота. Был усовершенствован робот РМ-01 с возможностью программирования усилий и использован биомехатронный модуль на базе трехкомпонентного силового датчика отечественного производства ВС6W (табл. 1). С роботом, содержащем этот биомехатронный модуль, были проведены основные исследования методов обучения показом (рис. 1), протестировано взаимодействие с МТ.

Таблица 1. Технические характеристики силового датчика ВС6W

Наибольшие пределы измерения (НПИ)	Рабочий коэффициент передачи (РКП), мВ/В	Степень защиты по ГОСТ 14254-96	Класс точности по ГОСТ Р 8.726-2010 (OIML R60)
$F_{x,y} = 60.0 \text{ Н}$ $F_z = 120.0 \text{ Н}$	0.6 мВ/В	IP65	0.20



Рисунок 1 – Биомехатронный модуль на базе силового датчика ВС6W

Функциональная схема системы обучения демонстрацией непрерывной траектории с учётом деформирования мягких тканей с многокомпонентным силовым датчиком, расположенным на фланце конечного звена робота, приведена на рис. 2 [10].

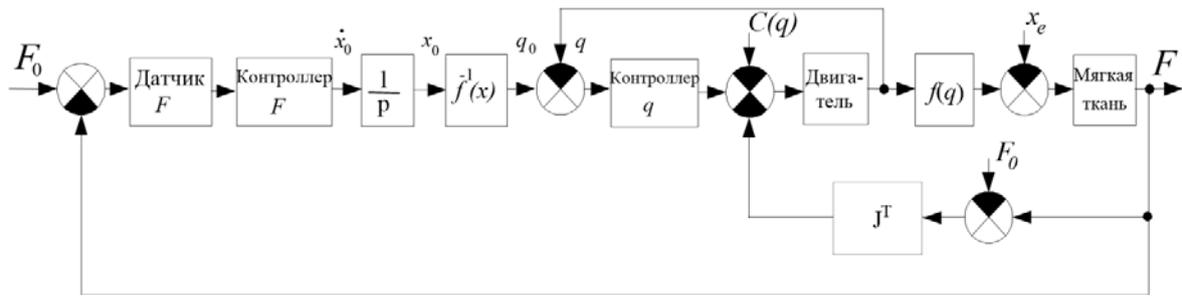


Рисунок 2 – Функциональная схема робота для обучения силовых точек на траекториях

Оператор, перемещая рукоятку, размещённую на конечном звене робота деформирует мягкие ткани пациента. Робот в режиме податливого управления не препятствует движениям оператора.

На рис. 2 блоки  $f(q)$  и  $f^{-1}(x)$  – преобразователи координат в прямой и обратной кинематических задачах,  $x_e$  – вектор рельефа мягкой ткани,  $F_0$  – вектор усилий (моментов), создаваемых рукой оператора,  $F$  – вектор усилий (моментов), создаваемых давлением мягкой ткани на инструмент робота,  $C(q)$  – вектор сил веса (моментов от сил веса).

Для большего сервиса и быстродействия была разработана графическая часть интерфейса (рис. 3) для настройки и проведения обучения мануальной демонстрацией пространственного необходимого перемещения при деформировании податливой среды.

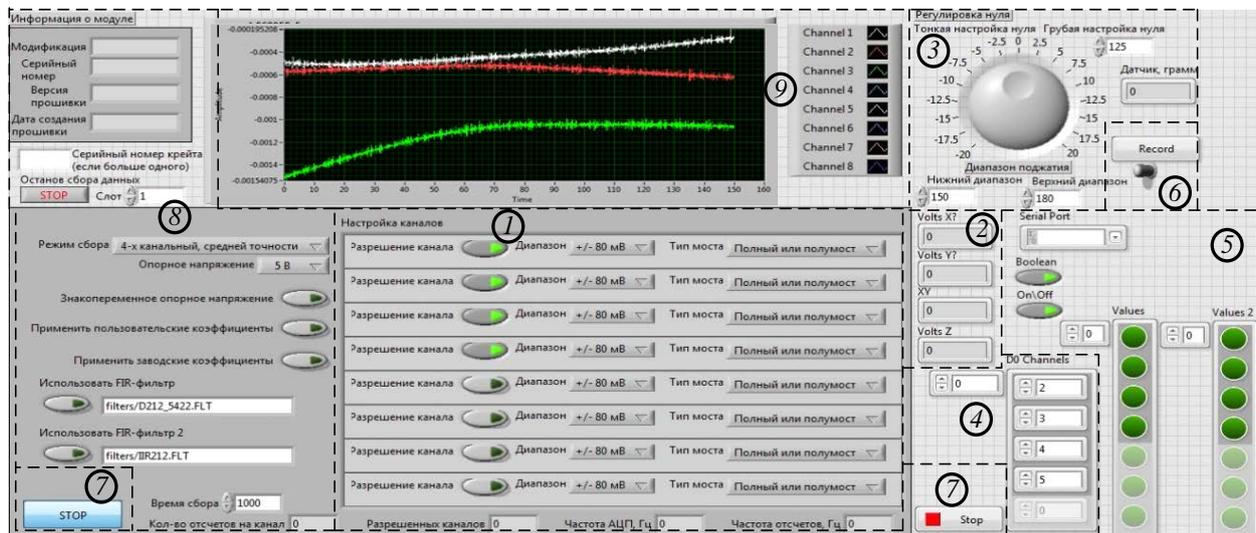


Рисунок 3 – Лицевая панель виртуального графического интерфейса управления роботом

Лицевая панель виртуального графического интерфейса (рис. 3) включает разделы настройки режимов работы биомехатронного модуля:

1. включение и настройка параметров считывания напряжений с входных каналов АЦП;
2. индикация текущих значений напряжений эквивалентных усилиям по осям X, Y, Z;
3. корректировка нулевого значения усилия датчика (обнуление веса датчика);
4. настройка каналов передачи с контроллера Arduino в систему управления робота («Сфера-36»);
5. индикация текущих передаваемых управляющих битов в систему управления робота;
6. запись показания силового датчика во внешний табличный файл с устанавливаемой частотой;
7. кнопки остановки программы (остановка работы программы LabView);
8. настройка режимов сбора данных с АЦП LTR212;
9. окно визуализации формы сигналов напряжений эквивалентных усилиям по осям X, Y, Z.

В качестве примера, рассматривается задание и измерение только одной составляющей усилия  $F_z$ , направленной вдоль инструментальной оси робота. Условия подхода к точке с программно заданным усилием  $F_{z0}$  даны неравенствами:

$$\text{if } F_z \leq F_{z0} - \Delta F \text{ then } \Delta z_{i+1} = \Delta,$$

$$\begin{aligned} \text{if } F_{z0} - \Delta F < F_z < F_{z0} + \Delta F \text{ then } \Delta z_{i+1} &= 0, \\ \text{if } F_z \geq F_{z0} + \Delta F \text{ then } \Delta z_{i+1} &= -\Delta, \end{aligned}$$

где  $\Delta F$  – допустимое отклонение от заданной силы,

$\Delta$  – шаг перемещения в направлении инструментальной оси  $z$ .

Условия подхода к точке с заданным усилием можно задать нелинейной характеристикой (рис. 4) реализуемой управляющей программой на базе LabView, так как шаги  $\Delta z$  будут суммироваться и система управления по усилию будет астатической.

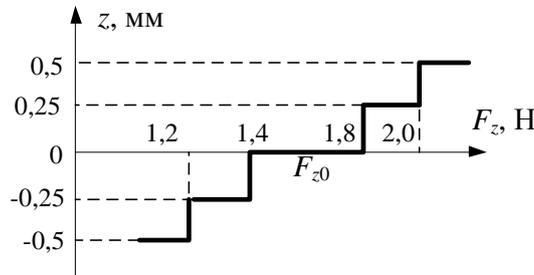


Рисунок 4 – Нелинейная характеристика назначения шагов  $z$  от усилий  $F_z$

Робот с вводом перемещений и усилий путем программного обучения силовых точек был признан работоспособным, были проведены основные исследования на макете и тестовых материалах, но при обучении множества точек требовалось значительное время и напряжённая работа оператора [6].

#### Структура человеко-машинного интерфейса обучения робота

Чтобы вводить в робот усилия для необходимого деформирования податливой среды и параметры необходимого движения инструмента робота, возможны различные методы обучения расчётом или демонстрацией реальных траекторий. Расчётом могут быть программно введены данные при заранее известных характеристиках среды – податливой среды, что невозможно, например, для биологической среды и при ее изменяющихся характеристиках. Одним из способов обучения является метод повторения реальных движений опытного оператора [10]. Демонстрация необходимого движения с помощью задающей рукоятки с податливым управлением является наиболее естественной формой обучения и ввода данных. Это бионический подход к организации управления, позволяющий приближать управление роботом к естественным действиям опытного массажиста – человека. Системы с организацией обучения необходимого движения демонстрацией относятся к классу систем полуавтоматического биотехнического управления, к классу человеко-машинных систем или систем эргатического управления. Особенностью класса систем эргатического управления для медицинской техники является объект управления – пациент с психофизиологическими свойствами, которые отсутствуют у технических объектов управления [1].

Режим медленных, плавных и глубоких движений при взаимодействии с податливой средой может быть приближен к квазистатическому. Тогда с учётом компенсации сил веса звеньев:

$$H(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = 0.$$

Окончательно имеем:

$$-J^T(\mathbf{q})(F_0 - F) = F_r.$$

Это равенство позволяет сформулировать цель управления – оператор должен задавать и чувствовать своей рукой необходимое усилие деформирования МТ.

$$F \rightarrow F_0.$$

В системе управления робота предусмотрено, что в процессе обучения перемещения в суставах с энкодеров записываются или в виде отдельных узловых силовых точек [10].

Структура блок-схемной части графического интерфейса, реализованная на базе среды визуального проектирования LabView, представленная на рис. 5, содержит в цепи (9) преобразования силового сигнала - сравнивающее устройство (3), сигналы которого являются кодовой последовательностью (4) управления перемещением инструментального звена манипуляционного

робота, позволяющей изменять шаги и их направление пропорционально приложенным усилиям к датчику.

Структура блок-диаграммы виртуального графического интерфейса (рис. 5) включает субмодели:

1. считывание показаний напряжений по осям силового датчика и формирование числовых последовательностей для индикации;
2. преобразование числовых последовательностей напряжений по осям X, Y, Z и вывод их на экран, преобразование напряжения по оси Z в граммы;
3. ручная подстройка показаний датчика в граммах, с целью обнуления веса датчика в зависимости от положения инструментального звена робота; сравнение получаемого усилия с заданным диапазоном и формирование результата сравнения в виде кодовой последовательности;
4. преобразование результата сравнения в управляющую комбинацию битов для передачи их на цифровые входные линии системы управления робота;
5. формирование массивов значений управляющих битов и передача их на цифровые выходы контроллера Arduino;
6. управление записью усилия по оси Z во внешний табличный файл с заданной частотой опроса;
7. опрос ошибок в процессе чтения сигналов с силового датчика; передача управляющих битов в контроллер Arduino; остановка программы при нажатии кнопки «стоп».
8. модули VINX для управления вводом-выводом при связи с контроллером Arduino;
9. модули LabView для управления вводом-выводом сигналов на плате АЦП LTR212.

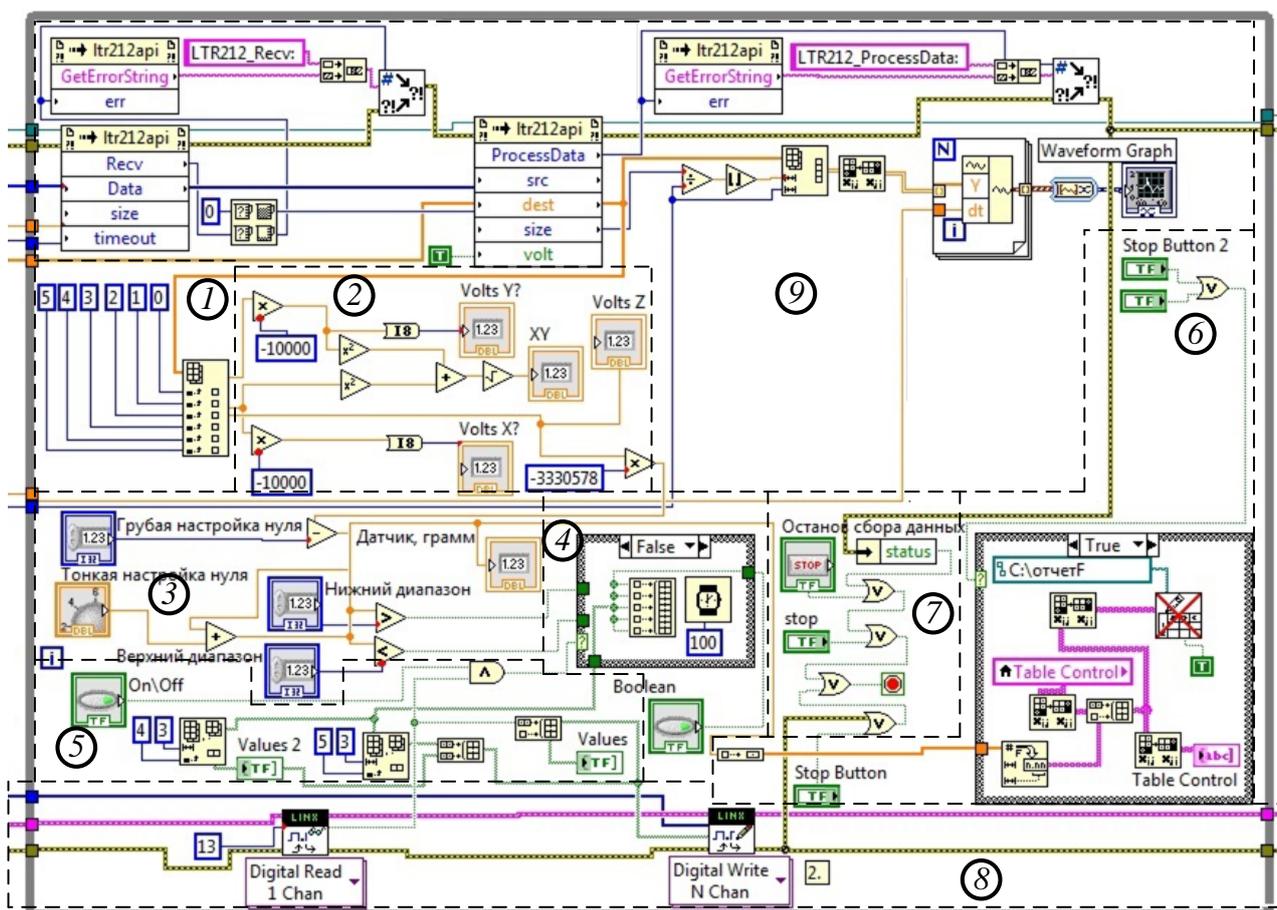


Рисунок 5 – Блок-диаграмма графического интерфейса управления манипуляционного робота

Метод обучения силовых точек является частным случаем метода обучения демонстрацией необходимой траектории движения с учётом взаимодействия инструмента со средой. Множество силовых точек  $\{A_i, F_z\}$  является подмножеством точек, обученных демонстрацией с пространственным деформированием среды  $\{A_i, F\}$ :  $\{A_i, F_z\} \in \{A_i, F\}$ .

Совокупность точек, сформированная в памяти системы управления робота, накладывает ограничения на универсальность тактильного взаимодействия и его быстроту его воспроизведения. Сформировать сигналы управляемого движения предварительным обучением можно путем записи изменения приращений шагов во времени в среде LabView. Формируемые субмоделью 3 (рис. 5) управляющие биты представляют собой последовательность смещений инструментального звена в виде ряда:

$$\Delta z_o(t) = \Delta z_k(t) \left[ \frac{\tau}{T} + \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} \sin \frac{k\omega\tau}{2} \cos k\omega\tau \right],$$

где  $\Delta z_k(t)$  – приращение шага на итерации  $k, k=1,2,3,4,5, \dots, T$  – период изменения приращения,  $\tau$  – время

выдержки шага,  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  – частота смены итераций.

Последовательность этих итераций генерируемых при обучении может быть записана в табличный файл (субмодель 6, рис. 5).

### Воспроизведение обученных траекторий

Записанная последовательность изменения приращений координаты  $z$  во времени может быть воспроизведена в виде траектории.

Простейшая аппаратная реализации системы воспроизведения записанной траектории представляется жёстким позиционным роботом, копирующим записанную последовательность приращения шагов инструментальной координаты.

При дыхании пациента и взаимодействии с жёсткими тканями, усилия в записанной обученной траектории могут не соответствовать деформациям мягких тканей пациента. В этих случаях необходимо позиционно-силовое управление, при котором компромиссно выполняются условия стабилизации усилия вдоль инструментальной оси  $F_z$  и стабилизации записанных обученных приращений шагов по инструментальной координате  $\Delta z_0$  с приоритетом усилия.

$$F_z \rightarrow F_z^0 \text{ и } \Delta z \rightarrow \Delta z_0.$$

Программное исполнение системы воспроизведения предполагает позиционно силовое управление при выполнении условий стабилизации усилий и перемещений (рис. 6).

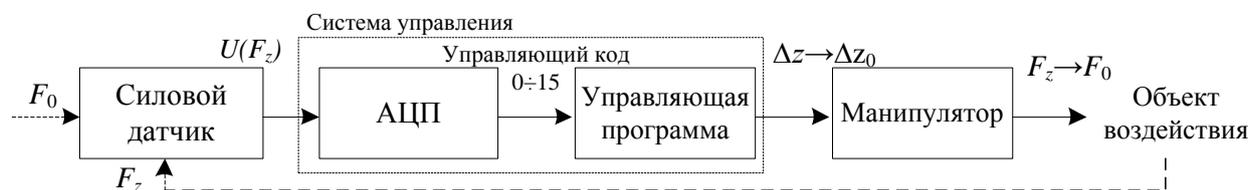


Рисунок 6 – Блок-схема робота, взаимодействующего с объектом и реализующего при воспроизведении позиционно-силовое управление

Перемещение инструмента робота, обеспечивающее необходимое деформирование МТ, формируется на основании сравнения на каждом шаге итерации считанного усилия с заданным и по результатам сравнения, формированием последовательности приращений шагов координаты  $z$ .

### Экспериментальное исследование обучения и воспроизведения силовых траекторий

Серия экспериментальных работ была выполнена с силовым модулем, размещенным на роботе РМ-01. Эксперименты показали возможность контроля обучения демонстрацией в свободном пространстве и при контакте с податливой средой (рис. 7).

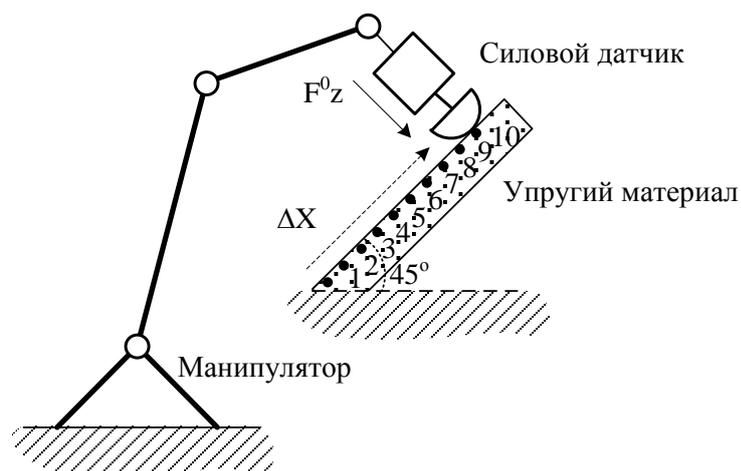


Рисунок 7 – Схема экспериментальной установки обучения и воспроизведения силовых траекторий

В качестве примера, (рис. 7) рассматривается горизонтальное перемещение инструмента манипулятора в направлении оси  $+X$  до контакта с деформируемой средой имеющей наклон к горизонтальной поверхности  $+45$  градусов. Деформирование наклоненной податливой среды нажатием встречает сопротивление повышенного уплотнения, что вызывает необходимость смещения по нормали к поверхности среды на один или несколько шагов ( $\Delta Z$ ) смещения инструмента манипулятора до сохранения постоянства заданного усилия  $F_0$  полученного на этапе обучения (рис. 8).

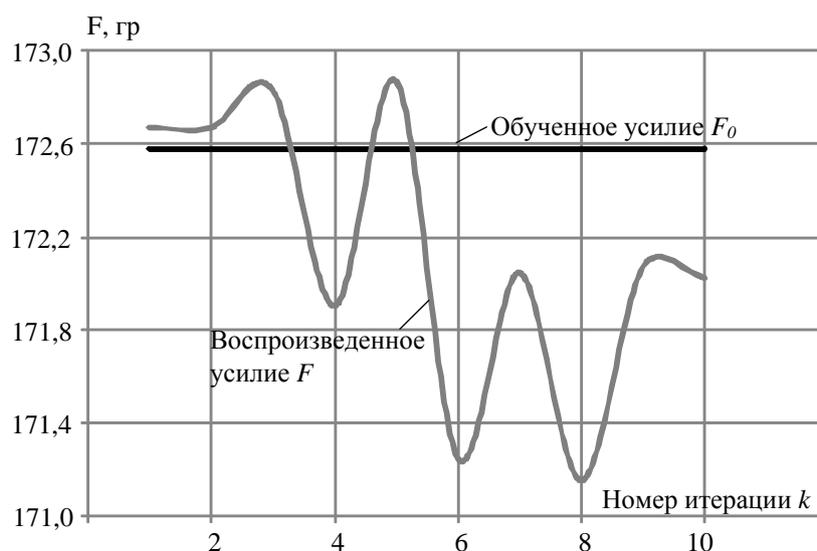


Рисунок 8 – Графики усилий полученные в режимах обучения и воспроизведения

Полученные характеристики в режимах обучения и воспроизведения, позволяют определить и скорректировать отклонение реальной силы, создаваемой инструментом на поверхности среды  $F$  от силы, создаваемой оператором  $F_0$ . Максимальное отклонение реальной силы от заданной не превышает 10%, что допустимо для задачи массажного физиотерапевтического воздействия.

### Заключение

В исследованиях, изложенных в данной статье, позиционный робот «PM-01» дополнялся трехкомпонентным силовым модулем для решения задач обучения демонстрацией при деформировании мягких тканей с помощью спроектированного человеко-машинного интерфейса. Было предложено расширение метода обучения силовых точек в метод обучения пространственных траекторий за счет записи приращения шагов инструментальной координаты в режиме обучения и повторения записанных приращений в режиме воспроизведения. Предложенный метод для экспериментального подтверждения был опробован на работе с силовым датчиком, размещённым на фланце конечного звена робота с позиционно-силовым управлением по инструментальной оси.

Необходимые подтверждения предложенного метода представляют продолжение данной тематики. Развитие работ предполагает реализацию обучения манипуляционных роботов пространственным обучением с последующим воспроизведением обученных позиционно-силовых траекторий. Разработку в человеко-машинном интерфейсе возможности контроля по другим пространственным координатам и их сочетанию. Проектирование новых конструкций силовых модулей роботов для социальных и промышленных задач.

**Благодарности.** Научная работа, описанная в этой статье, была поддержана грантом Президента РФ № МК-5826.2016.8.

1. Головин В.Ф., Архипов М.В., Журавлёв В.В. Робототехника в восстановительной медицине. Роботы для механотерапии. LAPLAMBERT Academic Publishing, GmbH&Co. KG, 2012. 280 p.
2. Вукобратович М. Как управлять взаимодействием с динамической средой // *Journal of Intelligent and Robotic System*, 1997. № 19. – P. 119-152.
3. Архипов М., Головин В., Кочеревская Л., Вжесневский Е., Углев А., Леготин С. Расширение эргономических функций в медицинской робототехнике // *HSOA Journal of Alternative, Complementary & Integrative Medicine*, 2017. № 3: 031. – С. 5. DOI: 10.24966/ACIM-7562/100031.
4. Головин В., Журавлев В., Архипов М. Позиционно-силовой контроль медицинского робота, взаимодействующего с динамическими биологическими мягкими тканями // *Advances on Theory and Practice of Robots and Manipulators, Proceedings of Romansy 2014 XX CISM-IFTtoMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators*. Springer, 2014. – P. 303-310.
5. Архипов М., Лесков А., Головин В., Герцик Ю., Кочеревская Л. Перспективы развития робототехники для восстановительной медицины // *Proceedings of 25th Conference on Robotics in the Alpe Adria-Danube Region (RAAD 2016)*. Springer, 2017. – P. 499-506.
6. Головин В., Журавлев В., Архипов, М. Обучение и контроль медицинского робота для массажа // *New Trends in Medical and Service Robots, Proceedings of Third International Workshop on Medical and Service Robots. Series Mechanisms and Engineering Science. V. 20*. Springer, 2014. – P. 99-107.
7. Головин В.Ф., Лесков А.Г., Архипов М.В., Рачков М.Ю., Леготин С.Д. Обучение робота показом движения с учетом деформирования среды // *Известия ЮФУ. Технические науки*, 2015. № 10 (171). – С. 213 - 227.
8. Гориневский Д.Н., Формальский А.М., Шнейдер А.Ю., Управление манипуляционными системами на основе информации об усилиях. М.: Физматлит, 1994. – 368 с.
9. Кулаков Ф.М., Чернакова С.Э. Информационная технология обучения роботов показом движений // *Мехатроника, автоматизация, управление*, 2008. № 7. – С. 23-28.
10. Лесков А., Головин В., Архипов М., Кочеревская Л. Обучение робота заданным геометрическим и силовым траекториям // *New Trends in Medical and Service Robots, Proceedings of Fourth International Workshop on Medical and Service Robots. Series Mechanisms and Engineering Science. V. 39*. Springer, 2015. – P. 75-84.
11. Разумов А.Н., Бирюков А.А., Головин В.Ф., Архипов М.В. Повышение боеспособности военнослужащих применением робототехники для восстановительной медицины // *“Лечебная физкультура: достижения и перспективы развития: Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (27-28 мая 2015 г.) / Под общей редакцией Н.Л. Ивановой, О.В. Козыревой.* – М.: ФГБОУ ВПО «РГУФКСМиТ», 2015. С. 153-158.
12. Базовое податливое управление. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=JRbAesam-EE> (дата обращения: 08.07.2017).
13. Технология производства Университет Олборг 2011 KUKA LWR Создание рисунка. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=kUxJEYeCRQg> (дата обращения: 08.07.2017).
14. Упругое управление. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=WS1gSRcJbJQ> (дата обращения: 08.07.2017).

## **ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕЖДУ ЧЕЛОВЕКОМ И РОБОТОМ НА БАЗЕ НЕИНВАЗИВНОГО ИНТЕРФЕЙСА «МОЗГ-КОМПЬЮТЕР»**

*СПбПУ, Санкт-Петербург  
Stankevich\_lev@inbox.ru, f.gundelakh@yandex.ru*

### **Введение**

Будущее человечества неразрывно связано с развитием человеко-машинного взаимодействия. На первых этапах развития люди взаимодействовали с компьютерами или машинами, которыми управляют компьютеры, с помощью простых интерфейсов: клавиатура, монитор, принтер, устройства графического ввода и вывода и т.д. По мере развития методов искусственного интеллекта, появились средства голосового и визуального взаимодействия, на основе которых были созданы и продолжают совершенствоваться интеллектуальные интерфейсы. В конце XX и в начале XXI века бурное развитие нейрофизиологии, психологии и искусственного интеллекта, а также методов и устройств регистрации биоэлектрических сигналов привело к возможности создания новых средств человеко-машинного взаимодействия на основе прямого восприятия сигналов нервной системы.

В последнее время возрастает интерес к взаимодействию между человеком с ограниченными двигательными возможностями и обслуживающими его роботами. Роботы должны быть способны действовать в реальной среде и взаимодействовать с человеком, который не обладает навыками и возможностями прямого управления роботами. При этом дружественный интерфейс человека и робота имеет решающее значение для эффективного применения таких роботов, например, для реабилитации, протезирования и обслуживания людей с ограниченными возможностями.

Перспективным способом реализации дружественного взаимодействия между человеком и роботом является использование, так называемых, интерфейсов мозг-компьютер (ИМК). ИМК - современная технология и средства, способные обеспечивать взаимодействие человека с внешними электронными и электромеханическими устройствами на основе регистрации и декодирования сигналов электрической активности головного мозга [1]. ИМК должны работать в реальном времени, то есть формировать сигналы управления с минимальной задержкой, определяемой скоростью работы внешних устройств. В литературе показано, что для реабилитации постинсультных пациентов наиболее подходящим является ИМК, основанный на распознавании воображаемых движений [2].

В качестве средства получения информации о биоэлектрической активности мозга, соответствующей моторным командам, часто используется электроэнцефалография (ЭЭГ). Современные исследования показывают, что ЭЭГ как неинвазивная и относительно недорогая технология имеет значительный потенциал для создания ИМК. Однако фактором, ограничивающим практическое применение ИМК на основе ЭЭГ, является сложность надежной и воспроизводимой интерпретации (декодирования) сигналов мозга. Другим фактором является сложность классификации ЭЭГ паттернов воображаемых движений в реальном времени.

В настоящее время неинвазивные ИМК на основе ЭЭГ реализуются для декодирования воображаемых и реальных движений крупных частей тела, например, рук и ног. Однако такие ИМК не эффективны для декодирования мелкой моторики, например, движений пальцев одной руки. Эта проблема трудно решается из-за анатомической близости структур мозга, участвующих в реализации воображаемых движений, и незначительных различиях в сигналах ЭЭГ при воображении движений мелкими частями тела. При этом требуются большие вычислительные ресурсы. Необходимо отметить, что для работы в режиме реального времени особое внимание уделяется временным задержкам.

В настоящее время некоторые российские научные группы и организации проводят исследования, связанные с созданием ИМК, причем многие из них известны на международном уровне [3,4]. Существуют также попытки создать интерфейс человек-робот с использованием ИМК на основе сигналов ЭЭГ. В общем случае такие средства позволяют обнаруживать некоторые ментальные команды человека, использующие сигналы Р300 [4]. Однако такие интерфейсы ограничены количеством степеней свободы и могут использоваться лишь для простого управления роботом.

Целью этой работы является разработка принципов взаимодействия человека и робота с использованием ИМК и системы супервизорного управления роботом на основе ИМК, позволяющего классифицировать ЭЭГ паттерны воображаемых движений в реальном времени.

### **Принципы взаимодействия человека и робота с использованием ИМК**

При управлении роботом оператор должен иметь возможность формировать команды,

изменяющие поведение робота. В этой работе предлагается сделать это через неинвазивный ИМК, декодирующий сигналы активности мозга и формировать супервизорные команды для изменения поведения робота. Для практической реализации такой системы необходимо использовать биологическую обратную связь через зрение, которая позволяет адаптировать мозг и усилить сигналы ЭЭГ, соответствующие воображаемым командам [3]. Задержки вычисления ответа при этом должны быть достаточно малы, чтобы в сознании пользователя эти события были однозначно связаны.

Можно сформировать следующие принципы построения систем взаимодействия человека и робота через ИМК: (1) достижение высокой точности и скорости классификации паттернов ЭЭГ до уровней, приемлемых для использования ИМК для управления роботом; (2) обеспечение достаточных степеней свободы ИМК, т.е. количества распознанных воображаемых команд более 5-ти (в большинстве реализованных ИМК выделяются только 2-3 ментальных состояния [5-8]); (3) оптимизация вычислительных ресурсов для сокращения времени работы ИМК при сохранении точности распознавания [9], включая классификацию воображаемых команд по одной пробе [10].

### Структура и компоненты ИМК

Неинвазивные ИМК на основе ЭЭГ включают в себя устройство регистрации и предварительной обработки сигналов ЭЭГ для нахождения ЭЭГ-паттернов, соответствующих текущим событиям, средства извлечения признаков в спектральных или временных областях, классификации ЭЭГ-паттернов воображаемых команд и формирования решения по классу распознанной команды (рис. 1).

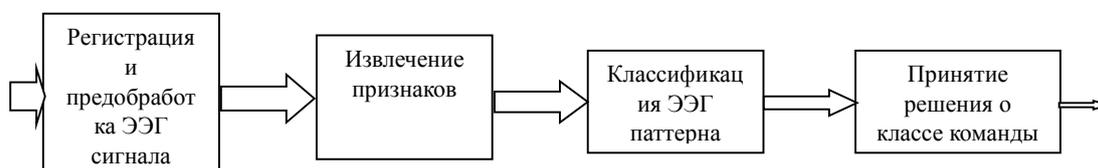


Рисунок 1 – Структура неинвазивного ИМК

Для исследований возможности реализации системы взаимодействия человека и робота на основе неинвазивного ИМК был использован классификатор воображаемых движений пальцев одной руки, разработанный авторами ранее [11, 12]. Адаптация этого варианта ИМК к распознаванию воображаемых команд для робота была выполнена с использованием специально разработанной программы и методики. Согласно методике, предлагалось испытуемым последовательно представлять 4 типа воображаемых движений пальцами одной руки (большим, указательным, средним пальцами и мизинцем) в соответствии с присвоенными им командами управления поведением робота. При тренировке испытуемые сначала должны нажимать кнопку компьютерной мыши пальцем, назначенным для управления необходимым поведением робота, в ритме, заданном звуками, и после того, как звук выключен, продолжать представлять себе движение тем же пальцем. Тренировка ориентирована на воображение движений по кинестетическим ощущениям испытуемого [13]. При этом серия реальных и воображаемых движений повторялась несколько раз. В результате испытуемый должен был выполнить не менее ста реальных и ста воображаемых движений в заданном ритме в одном блоке. Количество блоков должно соответствовать количеству типов выполняемых движений (реальные/воображаемые движения пальцами). Таким образом, имитируется управление поведением робота с помощью кнопочного переключателя команд.

Регистрация ЭЭГ выполнялась с помощью 32-канального цифрового ЭЭГ-устройства компании «Мицар». Использовались 19 электродов, которые были расположены по системе 10-20. Сигналы ЭЭГ длительностью 600 мс регистрировались в полосе частот 0,53 Гц - 30 Гц. Частота дискретизации составляла 500 Гц. При анализе записей ЭЭГ были исключены артефакты, такие как движения глаз, медленные и быстрые волны, фрагменты сигналов ЭЭГ с амплитудой более 100 мкВ. Для анализа и последующей классификации использовались безартефактные записи сигналов ЭЭГ, зарегистрированных с сенсомоторной области коры головного мозга: участки C3, Cz, F3.

Анализ сигналов ЭЭГ проводился во временной области. Для обеспечения необходимой скорости вычисления функции системы был проведен анализ каждого отдельного испытания без накопления. Использовался алгоритм совместного учета двух пространств признаков: площадь под кривой и длина кривой отрезка сигнала. Данные функции вычислялись в скользящем окне, что позволило выбрать наиболее информативные окна.

Важным для повышения точности классификации является выбор размера окна анализа. Ранее

было показано, что подбор оптимальных значений ширины окна анализа может существенно повысить точность классификации воображаемых движений [11, 12]. На базе проведенных исследований [11] была выбрана ширина окна анализа 100 мс со сдвигом в 50%.

Разработанный комитет классификаторов ЭЭГ паттернов основан на искусственных нейронных сетях (ANN) и методе опорных векторов (SVM). В литературе показано, что они являются эффективными средствами классификации, в том числе, и воображаемых движений [14].

В этой работе реализованы нейронные сети типа многослойного перцептрона с тремя слоями: двумя скрытыми и выходным. В качестве функций активации в скрытых слоях использовалась сигмоидальная функция, а в выходном слое - линейная функция.

Метод опорных векторов [15,16] основан на линейной классификации. Суть метода заключается в разделении выборки на классы при помощи оптимальной разделяющей плоскости, уравнение которой

имеет вид  $f(x) = (\omega, \varphi(x)) + b$ , где  $\omega = \sum_{i=1}^N \lambda_i y_i (x_i)$ , коэффициенты  $\lambda_i$  зависят от  $y_i$  (векторы классовой принадлежности меток) и значений скалярных произведений  $((x_i), (x_j))$ . Таким образом, для нахождения нужной функции необходимо знать значения скалярных произведений. Преобразование данных определяется функцией ядра преобразования:  $K(x, y) = (\varphi(x), \varphi(y))$ .

На основании результатов исследований по выбору наиболее подходящих типов SVM [15-17], в данной работе для классификации ЭЭГ сигналов был выбран SVM с радиально-базисной функцией и ядром: , для (на основе LIBSVM [14]).

Для исследований использовался двухуровневый комитет классификаторов. Первый уровень состоит из двух искусственных нейронных сетей (ANN (S) и ANN (L)) и двух классификаторов на основе метода опорных векторов (SVM (S) и SVM (L)), а второй уровень - искусственная нейронная сеть (ANN (C)) для объединения результатов классификаторов первого уровня. Классификаторы первого уровня анализируют отдельные векторы признаков (длина L или площадь под кривой S), полученные для 20 сегментов сигнала ЭЭГ (20 признаков на L и 20 признаков на S) и выдают ответы принадлежности сигнала пробы тому или иному классу (4 ответа). На основе этих сигналов формируется вектор признаков (16 компонентов) для ANN (C) второго уровня, который принимает окончательное решение о принадлежности данного сигнала ЭЭГ к определенному классу воображаемых команд управления (рис. 2).

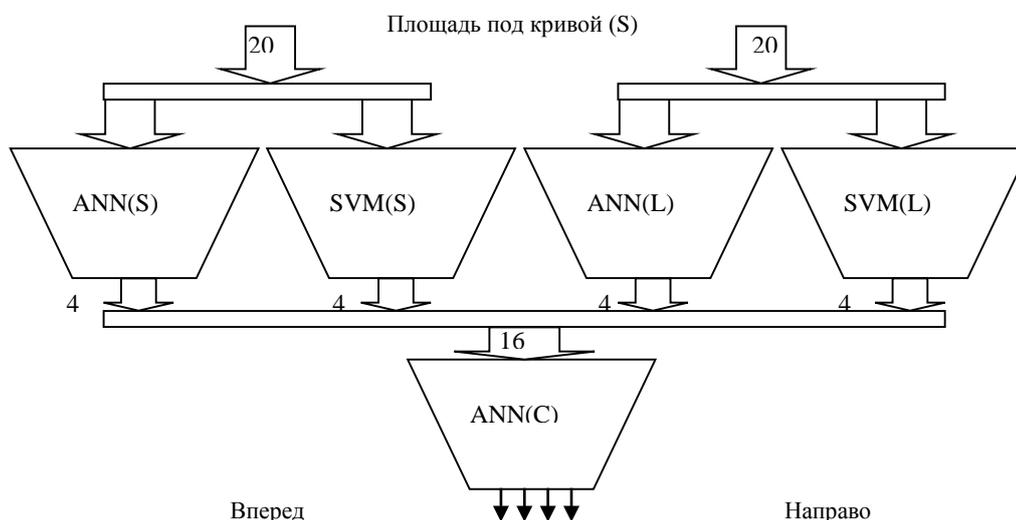


Рисунок 2 – Структура двухуровневого комитета классификаторов

При работе ИМК в режиме реального времени предполагается непрерывное чтение данных ЭЭГ. Для обеспечения непрерывности приема входных данных и их параллельной обработки использовался метод многопоточного программирования. Схема обработки такая: как только заканчивается проба N и начинается проба N+1, поток данных 2 считывает данные, относящиеся к пробе N, делает предварительную обработку, извлечение признаков и классификацию, а также выводит на монитор результат классификации. Так осуществляется одновременная запись и анализ данных (рис. 3).

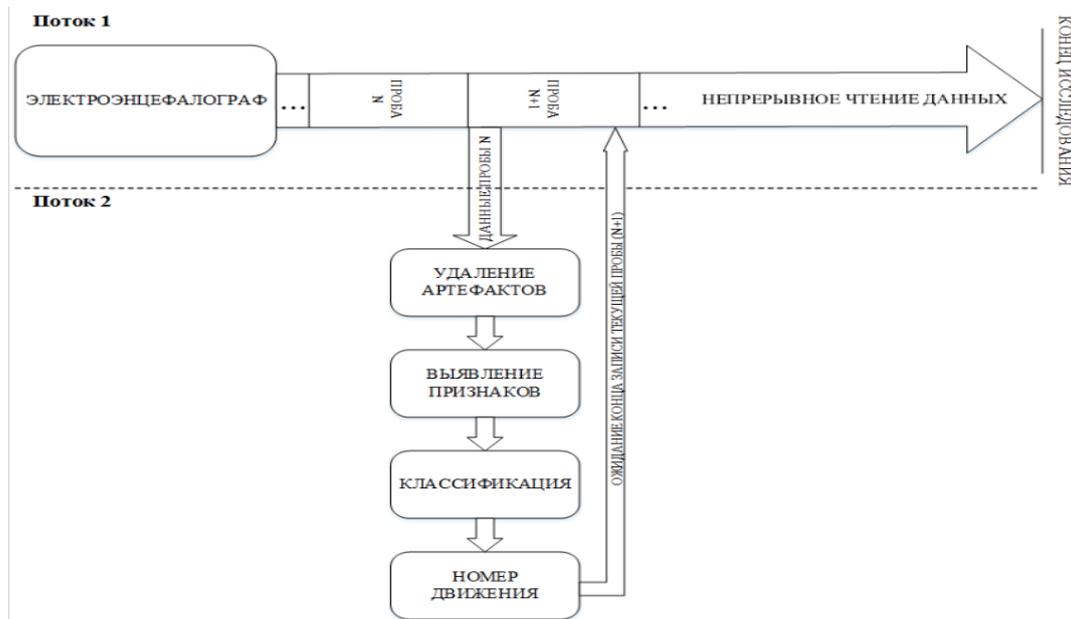


Рисунок 3 – Схема системы классификации, работающая в реальном времени

### Результаты управления роботом с помощью ИМК

Используя систему управления роботом, оператор должен иметь возможность отдавать команды, изменяющие поведение робота. В этой работе предлагается сделать это через ИМК, формируя двигательные команды для робота. Проведен эксперимент по управлению антропоморфным роботом NAO с 23 степенями свободы с помощью неинвазивного ИМК с системой классификации ЭЭГ-паттернов. С помощью ИМК формировались управляющие сигналы высокого уровня (супервизорные). Использовались команды четырех классов: «Вперед», «Стоп», «Направо», «Налево». Эксперимент продемонстрировал возможность обучения классификатора ИМК этим командам и управления с помощью них роботом. Поскольку робот имеет систему технического зрения для распознавания и обхода препятствий, такого супервизорного управления оказалось достаточно для осуществления любого перемещения робота в зоне эксперимента. Робот NAO имеет небольшие размеры (56 см в высоту и вес 6 кг), поэтому он может использоваться для развлечения или как информатор, связанный с обслуживающим персоналом и даже с Интернетом.

Проведенные исследования прототипа ИМК показали, что его характеристики соответствуют требованиям реального времени. Временные задержки, необходимые для получения ответа от классификатора, находятся в пределах 150 мс, что является приемлемым для использования ИМК с биологически обратной связью. Согласно субъективному самоотчету испытуемого, он действительно связывает воображаемый акт с полученным ответом системы.

При исследованиях ИМК были получены следующие результаты. В автономных сеансах при классификации паттернов ЭЭГ воображаемых команд без накопления проб вероятность успешной классификации 4-х типов воображаемых команд превышала случайный порог в 25% и в среднем составляла  $36 \pm 5\%$  для каналов C3, Cz и  $50 \pm 5\%$  для каналов F3, Cz. В режиме on-line на этапе обучения вероятность успешной классификации по 4-м типам команд была в среднем равна 40%. В процессе тестирования системы с использованием обратной связи для некоторых воображаемых команд получена точность классификации, равная 58% и 56% соответственно. Однако, как показано в [18], часть испытуемых (около 30%) не способна научиться работать с ИМК на основе сигналов ЭЭГ.

### Заключение

Исследования разработанного ИМК показали, что он соответствует требованиям практического применения в реальном времени. Так, максимальный период задержки при формировании сигналов управления не превышает 150 мс, что позволяет использовать биологическую обратную связь. Реализованная в системе многопоточность позволяет записывать и обрабатывать одновременно сигнал ЭЭГ без потери данных и выполнять надежную on-line классификацию.

Как пример построения эффективных ИМК на основе обработки сигналов ЭЭГ приведен вариант ИМК с комбинированным классификатором ЭЭГ-паттернов. Рассмотренная система классификации способна обучаться восприятию воображаемых моторных команд для организации движений не только крупными (руками или ногами), но и мелкими частями тела (пальцами одной руки). Показано, что такая

система классификации ЭЭГ-паттернов может обеспечить приемлемую точность и скорость классификации в ИМК. Это позволяет использовать ее для управления различными робототехническими устройствами, такими как искусственная рука с пятипалой кистью, тележка с манипулятором или мобильный робот.

Проведенные исследования показали, что для разработки эффективных систем взаимодействия человека и робота на основе неинвазивного ИМК требуется решить задачи повышения точности и скорости классификации ЭЭГ-паттернов воображаемых движений, увеличения степени свободы ИМК и оптимизации вычислительных ресурсов для реализации алгоритмов функционирования ИМК. Решение этих задач позволит создать эффективные ИМК, которые обеспечат людям с ограниченными двигательными функциями возможности управления роботизированными устройствами, используя сигналы мозга, что может значительно улучшить их функционирование в мире здоровых людей.

1. Wolpaw J.R., Wolpaw E.W. Brain-computer interfaces: principles and practice. NY: Oxford University Press. 2012. P. 400.
2. Daly I., Billinger M., Laparra-Hernández J., Aloise F., García M.L., Faller J., Scherer R., Müller-Putz G. On the control of brain-computer interfaces by users with cerebral palsy. *Clinical Neurophysiology*. 2013. 124. P. 1787–1797.
3. Frolov, A.A., Roshin, V.U. Brain computer interface. Reality and perspectives // Scientific conference on neuroinformatic MIFI 2008. Lectures on neuroinformatic. 2008. <http://neurolectures.narod.ru/2008/Frolov-2008.pdf> (in Russian).
4. Kaplan, A.Ya., Kochetkov, A.G., Shishkin, S.L. et al. Experimental-theoretic bases and practical realizations of technology "Brain computer interface" // *Sibir medicine bulletin*. 2013. Vol. 12. No2. p. 21 (in Russian).
5. Bai O., Lin P., Vorbach S., Floeter M.K., Hattori N., Hallett M. A high performance sensorimotor beta rhythm-based brain-computer interface associated with human natural motor behavior // *J Neural Eng*. 2008 V. 5. N. 1. P. 24.
6. Hsu W., Embedded Grey Relation Theory in Hopfield Neural Network Application to Motor Imagery EEG Recognition, *Clin EEG Neurosci* October 2013 V. 44 N. 4 257-264 2013;
7. Huang D., Lin P., Fei D.Y., Chen X., Bai O. EEG-based online two-dimensional cursor control, *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*. 2009. 2009:4547-50. doi: 10.1109/IEMBS.2009.5332722
8. Leeb R., Scherer R., Keirnath C., Guger C., Pfurtscheller G. Exploring Virtual Environments with an EEG-based BCI through Motor Imagery. *Biomed. Technik* 2005. V. 52. P. 86-91.
9. Asensio-Cubero J., Gan J.Q., Palaniappan R. Multiresolution analysis over graphs for a motor imagery based online BCI game // *Comput. Biol. Med*. 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compbiomed.2015.10.016>
10. Billinger M., Brunner C., Müller-Putz G.R. SCoT: a Python toolbox for EEG source connectivity, *Front Neuroinform*. 2014; 8: 22.
11. Sonkin, K.M., Stankevich, L.A., Khomenko, Ju.G., Nagornova, Zh.V., Shemyakina, N.V. Development of electroencephalographic pattern classifiers for real and imaginary thumb and index finger movements of one hand. *Artificial Intelligence in Medicine*, Vol. 63(2) (2015) 107-117.
12. Stankevich, L.A., Sonkin, K.M., Shemyakina, N.V., Nagornova, Zh.V., Khomenko, Ju.G., Perts, D.S., Koval, A.V. Pattern Decoding of Rhythmic Individual Finger Imaginary Movements of one Hand. *Human Physiology*, Vol. 42(1) (2016) 32-42.
13. Neuper C, Scherer R, Reiner M, Pfurtscheller G. Imagery of motor actions: differential effects of kinesthetic and visual-motor mode of imagery in single-trial EEG // *Cognitive Brain Research*. 2005. 25. P. 668-677
14. Lotte F., Congedo M., Lecuyer A. et al. Review of classification algorithms for EEG-based brain-computer interfaces // *Journal of Neural Engineering*. 2007. V.4. № 2. P. 1.
15. Cortes C., Vapnik V.N. Support-Vector Networks // *Machine Learning*. 1995. V. 20 № 3. P. 273.
16. Shawe-Taylor J, Cristianini N. Kernel methods for pattern analysis. Cambridge University Press. 2004. Available at: <http://www.kernel-methods.net>.
17. Chang C.-C., Lin C.-J. LIBSVM: a library for support vector machines. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*. 2011. Vol. 2 (27). P. 1-27. <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm>.
18. Müller-Putz D.R., Scherer R., Brunner C. et al. Better than random? A closer look on BCI results // *International Journal of Bioelectromagnetism*. 2008. V. 10. № 1. P. 52.

*A.L. Korotkov, M.A. Nogin, A.V. Rogov, O.A. Shmakov*

## **TEST SITE FOR EVALUATION OF TECHNICAL CHARACTERISTICS OF MOBILE ROBOTIC COMPLEXES OF ULTRA-LIGHT AND LIGHT CLASSES**

*RTC, Saint-Petersburg,  
a.korotkov@rtc.ru, m.nogin@rtc.ru, rogov@rtc.ru, shmakov@rtc.ru*

### **Abstract**

The article describes a test site designed for a detailed evaluation of the characteristics of mobile robotic complexes of ultra-light and light classes. The description of the components of the test site is presented. A detailed classification of mobile robotic complexes of an ultra-light class is introduced.

Keywords: mobile robotic engineering complex, test site, classification of robotic engineering complexes, typical methods of tests.

*А.Л. Коротков, М.А. Ногин, А.В. Рогов, О.А. Шмаков*

## **ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ПОЛИГОН ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МРК СВЕРХЛЕГКОГО И ЛЕГКОГО КЛАССОВ**

*ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург,  
a.korotkov@rtc.ru, m.nogin@rtc.ru, rogov@rtc.ru, shmakov@rtc.ru*

### **Аннотация**

В статье описан испытательный полигон, предназначенный для подробной оценки характеристик мобильных робототехнических комплексов сверхлёгкого и лёгкого классов. Представлено описание составных частей испытательного полигона. Введена подробная классификация мобильных робототехнических комплексов сверхлёгкого класса.

Ключевые слова: мобильный робототехнический комплекс, испытательный полигон, классификация робототехнических комплексов, типовая методика испытаний.

Согласно государственному стандарту, существует классификация для мобильных робототехнических комплексов (МРК), предназначенных для проведения аварийно-спасательных работ и пожаротушения. В таблице 1 приведена классификация МРК, согласно ГОСТ Р 54344-2011.

Таблица 1. Классы МРК

Класс	Общая масса, кг
Сверхлёгкий	до 100
Лёгкий первый (Л1)	от 100 до 300
Лёгкий второй (Л2)	от 300 до 1000
Средний первый (С1)	от 1000 до 5000
Средний второй (С2)	от 5000 до 15000
Тяжёлый	от 15000 до 50000
Сверхтяжёлый	от 50000

Эта классификация не применима ко всем современным МРК в силу того, что многие из них, различающиеся по применению, будут относиться к сверхлёгкому классу. Для более подробной классификации РТК НБ можно ввести подклассы для сверхлёгкого класса (таблица 2).

Таблица 2. Подклассы сверхлёгкого класса МРК

Подкласс	Общая масса, кг
Сверхлёгкий первый (СЛ1)	до 1 кг
Сверхлёгкий второй (СЛ2)	от 1 до 5 кг
Сверхлёгкий третий (СЛ3)	от 5 до 15 кг
Сверхлёгкий четвёртый (СЛ4)	от 15 до 50 кг
Сверхлёгкий пятый (СЛ5)	от 50 до 100 кг

Классификация МРК только по массе не отражает полностью механические характеристики, включая проходимость и грузоподъёмность, что не способствует достаточной оценке МРК, основываясь на его классе. Для составления представления о возможностях МРК различных классов необходимо проведение ряда исследований для множества представителей каждого класса. Чтобы обеспечить достаточную точность и однообразность исследований, необходимо минимизировать влияние человеческого фактора на ход исследования. Для выполнения этой задачи предлагается использовать испытательный полигон, оборудованный достаточным набором препятствий для проведения полноценной оценки характеристик МРК с возможностью использования автоматизированной системы регистрации хода исследований.

Для проведения пробеговых испытаний, определения энергетических и топливно-экономических характеристик, управляемости, тягово-цепных свойств при преодолении препятствий в условиях воздействия природных климатических условий мобильными робототехническими комплексами сверхлёгкого и лёгкого классов и оценки их конструктивных решений разработаны следующие комплексы препятствий.

1. Комплекс искусственных сооружений с наклонными поверхностями с различным грунтом (рисунок 1).

Комплекс состоит из трёх реконфигурируемых испытательных сооружений, расположенных на площадке с асфальтовым покрытием:

- сооружение с песчаным покрытием. Габаритные размеры: 10х10х1,5 м. Включает: наклоны 20°, 25° и 30°; эскарп с крутизной 60°, прямолинейный участок 3х3 м;
- сооружение, покрытое щебнем. Габаритные размеры: 8х8х1,5 м. Включает: наклоны 20°, 30° и 40°; прямолинейный участок 3х3 м;
- сооружение с глиняным покрытием. Габаритные размеры: 10х9,5х1,5 м. Включает: наклоны 20°, 30° и 40°; эскарп с крутизной 45°; прямолинейный участок 3х3 м.

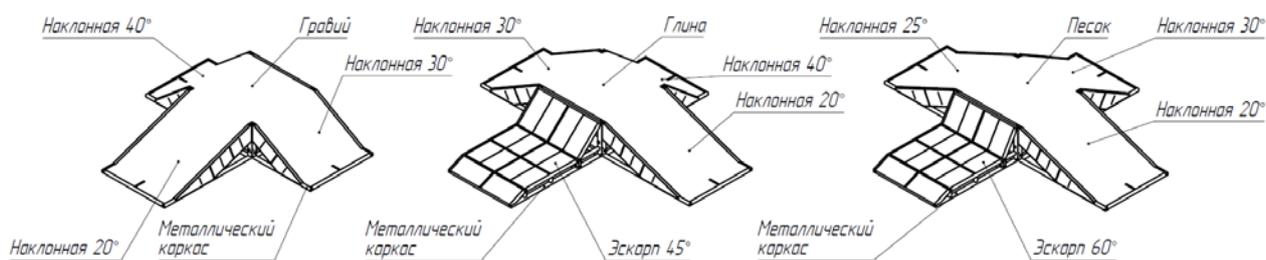


Рисунок 1 – Комплекс сооружений с наклонными поверхностями с различными типами грунта

2. Искусственное сооружение с наклонными поверхностями и лестничным маршем с бетонным покрытием (рисунок 2).

Сооружение состоит из двух наклонных с углами наклона 20° и 30°, лестничного марша по ГОСТ 9818-2015, прямолинейного участка 3х3 м.

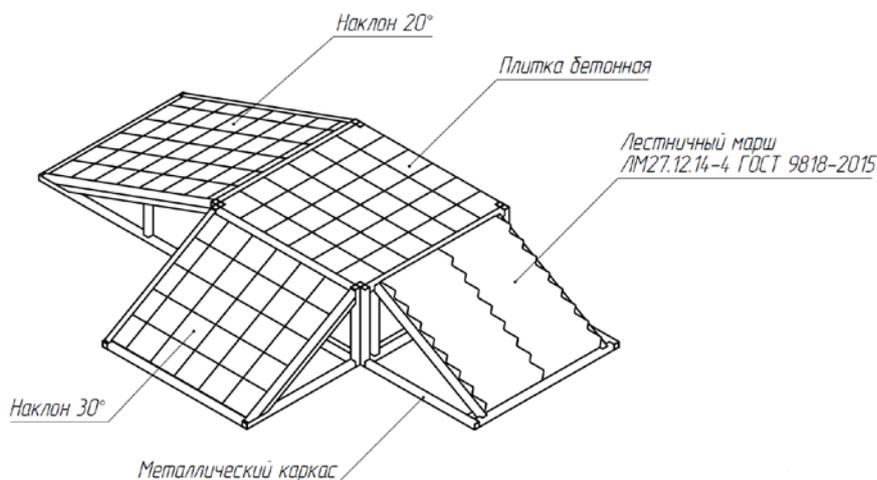


Рисунок 2 – Сооружение с наклонными и лестничным маршем с бетонным покрытием.

3. Комплекс сооружений с элементами железной дороги (рисунок 3).

В состав комплекса входят участки железнодорожного полотна с укладкой на горизонтальную поверхность и гравийную насыпь.

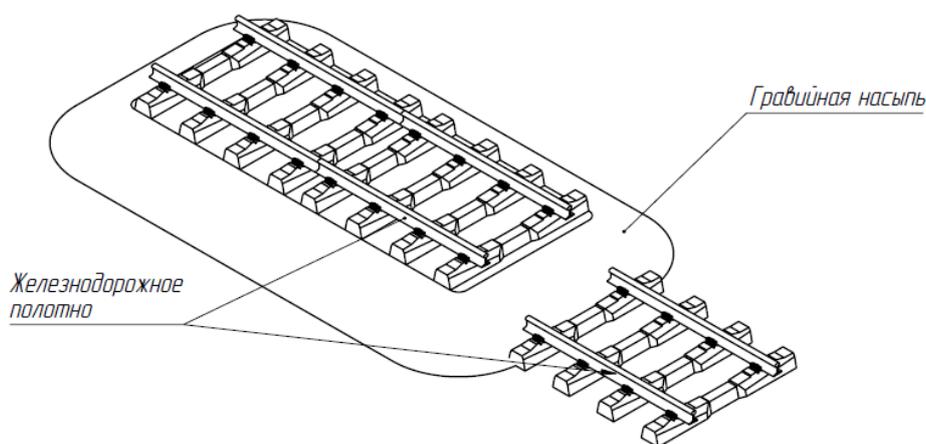


Рисунок 3 – Сооружение с элементами железной дороги

4. Комплекс искусственных сооружений с сильнопересеченной местностью (рисунок 4).

Комплекс представляет собой участок 6x3 м с реконфигурируемой сильнопересеченной местностью. Препятствия выполнены из стеновых бетонных блоков с возможностью изменения взаимного расположения блоков для воссоздания условий пересечённой местности, в том числе завалов.

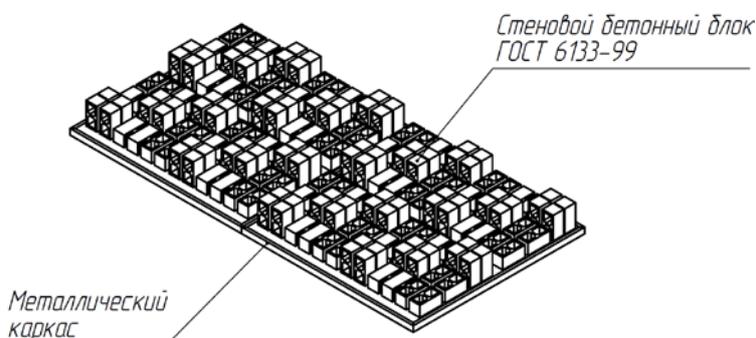


Рисунок 4 – Комплекс сооружений с бетонными блоками

5. Сооружение с препятствиями, обеспечивающими возможность частичного или полного погружения в жидкую или сильно сыпучую среду (рисунок 5).

Сооружение представляет собой бассейн размерами 6x15 м и глубиной до 0,6 м.

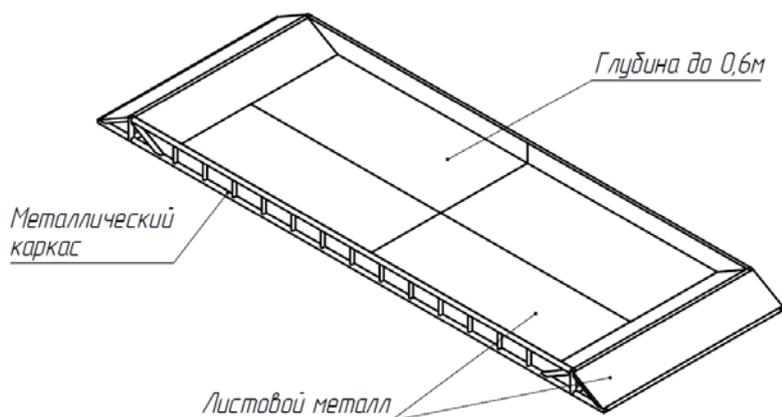


Рисунок 5 – Бассейн

Для проведения исследований по взаимодействию с техногенной окружающей обстановкой комплексов классов СЛ1, СЛ2, СЛ3 и СЛ4, для исследования их мобильности, манёвренности и группового управления разработаны следующие испытательные комплексы.

6. Комплекс сооружений, воссоздающих условия ограниченного пространства и видимости, и имитирующих обстановку в помещениях (рисунок 6).

В состав комплекса входят реконфигурируемые сооружения, предназначенные для воссоздания интерьера складских, жилых и прочих помещений.

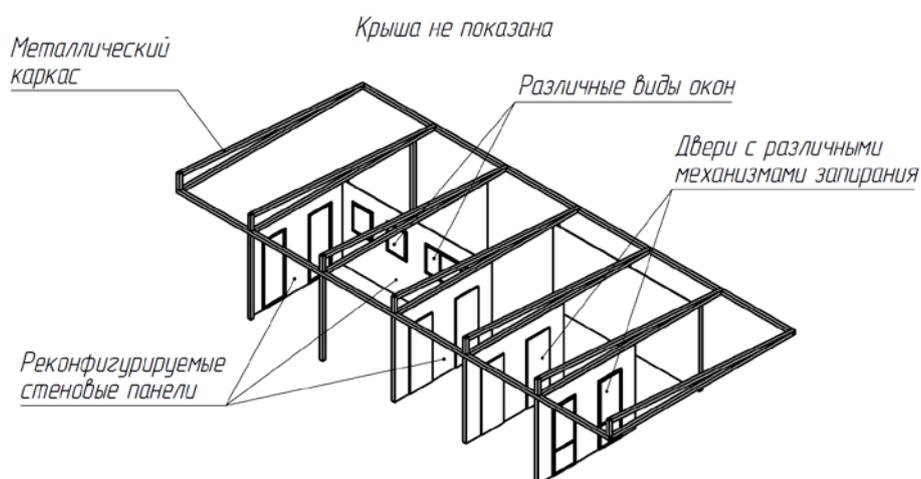


Рисунок 6 – комплекс сооружений для воссоздания интерьеров помещений

7. Реконфигурируемый модульный стенд с возможностью комбинировать различные препятствия (рисунок 7).

Стенд состоит из реконфигурируемых испытательных сооружений, расположенных внутри помещения:

- прямолинейные модули с песчаным, гравийным и травяным покрытиями;
- наклонные модули с углами наклона 15°, 20°, 30°, 35°, 45°;
- модули с лестничными маршами с размерами ступеней 340x150 мм; 250x150 мм; 200x150 мм; 150x150 мм.



Рисунок 7 – препятствия, входящие в состав комплекса

8. Реконфигурируемый модульный стенд с системой захвата движения (рисунок 8).

Стенд представляет собой сборную конструкцию  $4,8 \times 4,8 \times 3,8$  м и оборудован системой захвата движения, обеспечивающей определение шести координат объекта с точностью позиционирования 0,1 мм и точностью угла поворота  $0,01^\circ$ . Стенд предоставляет возможность подробной записи хода исследований МРК с захватом движения любых частей мобильных платформ. На основании данных о движении МРК строится компьютерная модель для подробных исследований с возможностью её использования при моделировании алгоритмов управления.



Рисунок 8 – комплекс сооружений, оснащённый системой захвата движения

Рассмотренные в пунктах 6, 7 и 8 испытательные комплексы применяются для исследования возможностей МРК с манипуляционными системами. Исследования включают в себя оценку способностей взаимодействовать с окружающей обстановкой, а также проверку алгоритмов управления манипулятором при недетерминированном положении мобильной платформы.

Использование испытательного полигона и разрабатываемых типовых методик и сценариев проведения испытаний, а так же ведение протокола исследований в автоматическом режиме будут способствовать их полноте и точности. Введение в классификацию МРК более подробных данных о представителях каждого класса может выявить перспективные направления развития конструктивных решений при проектировании МРК.

*В.М. Московченко<sup>1</sup>, В.Е. Дементьев<sup>2</sup>, М.А. Коцыняк<sup>2</sup>, А.П. Нечепуренко<sup>2</sup>, В.А. Краснов<sup>2</sup>*

## **ПОДХОД К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ПРОТОКОЛЬНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА РОБОТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ**

<sup>1</sup>*Россия, Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова,  
г. Новочеркасск, fvo.urgpu.npi@yandex.ru*

<sup>2</sup>*Россия, Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного,  
г. Санкт-Петербург, dem-vlad@rambler.ru, kot-c@yandex.ru, texas\_m720ex@mail.ru*

### **Аннотация**

В статье описан подход, позволяющий на основе анализа трафика в каналах управления роботизированных систем осуществлять прогнозирование протокольных воздействий на них. И используя полученные значения, в качестве исходных данных, обосновать структуру системы протокольной защиты каналов управления роботизированных систем.

Ключевые слова: роботизированные системы; протокольные воздействия; система протокольной защиты; канал управления; правила штатного функционирования.

Определено, что информация о сетевом трафике имеет статистический характер и представляет собой временные последовательности [9]. Методы статистического анализа сетевого трафика широко освещены при их использовании в качестве инструментов прогнозирования загруженности каналов управления роботизированных систем, определения потерь, качества управления и т.п. С точки зрения обеспечения сетевой безопасности, проводить анализ сетевого трафика с целью выявления аномального поведения системы (сбоев в работе, негативного внешнего воздействия, непреднамеренных нарушений) крайне необходимо как для решения задач сетевого администрирования, так и для мониторинга корректного функционирования роботизированных систем (РБС).

Как класс статистический анализ относится к поведенческим методам определения нарушений в каналах управления и основан на сопоставлении текущего состояния РБС с некими определенными заранее признаками, характеризующими штатное их функционирование. Методы статистического анализа имеют различные интерпретации, основанные на различных динамических характеристиках сетевого трафика, однако базовые принципы практически у всех идентичны. Неоспоримым преимуществом применения методов статистического анализа является возможность определения впервые реализовываемых методов негативного воздействия на объект атаки со стороны злоумышленника. Однако для его успешной реализации необходимо определить объект анализа, иметь определенные структурированные характеристики, образующие корректную конфигурацию, иметь критерии, по которым можно определить потенциальное протокольное воздействие (ПВ). Для уменьшения вероятности получения ошибочных результатов анализа, основного недостатка применения поведенческих методов выявления инцидентов информационной безопасности, при реализации комплексного подхода, положенного в основу разработки системы протокольной защиты каналов управления роботизированных систем (СПЗ КУ РБС) метод статистического анализа использовался совместно с компонентно-независимыми методами нейросетевого и сигнатурного анализа.

Таким образом, основными решаемыми задачами являлись: определение анализируемых и контролируемых характеристик сетевого трафика – признаков ПВ, разработка методик оценки информативности и идентификации признаков ПВ, построение правил штатного функционирования (ПШФ) КУ РБС, разработка алгоритма прогнозирования, а также интеграция методов прогнозирования ПВ в разработанную СПЗ КУ РБС.

Статистические методы универсальны, поскольку для идентификации не требуется знания о возможных ПВ и используемых ими уязвимостях и основаны на изменениях некоторых статистических характеристик трафика. Для решения задачи применения статистических методов анализа трафика, необходимо выделить основные показатели, характеризующие штатное функционирование КУ РБС, и осуществлять динамический контроль их состояния. В качестве таких показателей должны использоваться данные, по которым возможно проанализировать историю сетевого взаимодействия. К данным, которые могут быть проанализированы в первую очередь, относятся признаки ПВ, такие как поля заголовков пакетов и содержимое полей данных [10]. Для сокращения времени на обработку и последующее извлечение показателей для формирования ПШФ КУ РБС и анализа, из всех поступающих данных выделяются только наиболее информативные признаки.

Определённые ограничения в идентификации дают возможность уменьшить объём анализируемой информации, отсекая излишки неактуальных данных и увеличив быстродействие системы. Для проведения анализа необходимо заблаговременно сформировать актуальные ПШФ КУ РБС. В качестве хранилищ используются как SQL-базы данных, так и сформированные двоичные текстовые файлы, хранящие числовые характеристики. Корректность, актуальность данных и четкость временных интервалов ПШФ КУ РБС в данном случае определяются администратором СПЗ КУ РБС и являются одной из основных составляющих получения корректных результатов анализа.

Для идентификации ПВ необходимо сформировать их сигнатуры. Под сигнатурами будем понимать наборы признаков конкретного ПВ, в состав которых могут входить данные, коррелированные с полями заголовка и полезной нагрузки пакета. Кроме угроз, ПВ и защищаемых элементов РБС, интегральная обработка данных, связанная с идентификацией ПВ, позволяет ввести также сервис-ориентированный подход к протокольной защите, формируя автоматически или ручным способом описания сетевых и локальных служб, а также приоритезируя важность с точки зрения обеспечения должного уровня протокольной защищенности и функционирования КУ РБС.

Здесь учитываются как классические признаки ПВ (тип ПВ, протокол обнаружения, источник и объект ПВ, краткое сообщение), так и добавочные – фаза ПВ и тип угрозы. При этом сами правила могут быть сгруппированы в наборы, пригодные затем для связывания их с функционирующими в защищаемом КУ РБС сетевыми и локальными службами.

Таким образом, методы статистического анализа будут применяться на определенном временном интервале для сетевых пакетов, имеющих одинаковые сигнатуры, что позволит более детально проанализировать статистику ПВ. Также для прогнозирования вместо количества полученных или отправленных пакетов фиксируется объём данных, т.е. длина пакета. Это объяснимо стандартом формирования сетевых пакетов RFC, где каждый не фрагментированный кадр (Ethernet-frame) имеет определенную постоянную величину, что обуславливает использование не количественной характеристики по числу принятых или отправленных пакетов, а объёмной по количеству информации, обработанной сетевым интерфейсом.

Следовательно, любое зафиксированное ПВ можно описать вектором-объектом  $T_r = \langle P_r, S, D, M, F_E, L_S, C, T_S, R_{Бд}, S_{ID}, V_S, L_P, T_m \rangle$ . Время фиксации пакета необходимо для определения выборки событий, удовлетворяющих интервалу анализа. Зададим за  $T$  некий постоянный временной интервал. Его устанавливает администратор СПЗ КУ РБС в зависимости от преследуемых целей. Анализируемая статистика может быть как текущей или частной (при малых значениях  $T$ ), так и долговременной или глобальной (при значении  $T$  от нескольких часов или суток). Кроме временной составляющей присутствует и сам объект анализа. Его образует информация о сетевых взаимодействиях: сигнатура ПВ, тип протокола, источник, получатель, тип пакета, порт отправителя и получателя и т.д. Таким образом, при анализе имеем выборку из потока зафиксированных событий по детектированию пакета, прошедшего через сетевой интерфейс. Данная выборка позволяет определить активность источника или приемника по количеству обращений, полученным и отправленным пакетам и образует объёмную характеристику. Также данные о ПВ позволяет более детально персонифицировать процессы, происходящие в КУ РБС.

На этапе идентификации ПВ, на основе методики оценки информативности признаков, извлекаем

объект  $X = T_r \langle L \rangle$ , что соответствует длине зафиксированного пакета. Пусть  $X_i$  – событие из

множества событий  $X$  в момент времени  $t_i$ , при  $0 < t_i < T$ , где  $T$  – заранее установленный период анализа. Событие определяется изменением состояния сетевого адаптера: приём-отправка пакета с

постоянной логической сущностью. Тогда  $Y_i$  – аналогичный набор событий из множества, составляющего шаблон штатного функционирования сети. Пороговую методику применим в два этапа.

На первом этапе сопоставим значения  $X_i$  и  $Y_i$  в момент времени  $t_i$ . При заданном уровне "чувствительности" определяется допустимое значение возможного отклонения. Авторами применяется

значение коэффициента чувствительности  $k = 0,8$ . Тогда нижний порог определяется как  $X_i > kY_i$ , а

верхний – как  $X_i < Y_i / k$ . На втором этапе определяются краевые значения допустимых интервалов.

Для этого определим выборочное среднее из элементов множества  $X_i \in X$  (функция 1):

$$Average(X) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n X_i, \quad (1)$$

Допустимый диапазон определяется следующим неравенством:

$$3/2 Average(X) > X_i > Average(X) / 2.$$

Аналогичные операции применяются к множеству  $Y$  и определяются границы полуинтервалов на основе среднего значения выборки. Основываясь на характеристике потока трафика, многократное выявление отклонений от заданного интервала определенно свидетельствует об изменениях в процессе функционирования сети. Это могут быть, как и легальные изменения в нагрузке на узлы сети, так и иные несанкционированные действия.

Таким образом, имеем три признака: "пороговый на основе шаблона штатного функционирования сети (ШШФС)", "доверительного интервала", "доверительного интервала на основе ШШФС". Использование трех признаков сравнения характеристик позволяет с более высокой степенью вероятности выявить именно действия, направленные на нарушение безопасного сетевого взаимодействия. В результате система оповещает администратора набором следующих сообщений: "В период  $T$  у сущностей  $T_r < S / D >$  обнаружены отклонения от потока событий  $\langle X \rangle$  и/или  $\langle Y \rangle$  по признаку  $[1(0,1), 2(0,1), 3(0,1)]$ ".

Далее рассмотрим иные детектируемые характеристики трафика. Пусть имеется набор типов пакетов  $T_r < T_p \rangle = P\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ , тогда значения  $X_{p_i}$  – количество зафиксированных пакетов  $p_i$  -

типа. При этом  $Y = \sum_{i=0}^n X_{p_i}$  – общее количество пакетов. Тогда частота фиксации определенного типа

пакетов вычисляется как  $\rho(X_{p_i}) = X_{p_i} / Y$ . Аналогично определяется частота использования протоколов (служб) при взаимодействии в сети. В общем случае номера портов лежат в диапазоне значений от 0 до 65536. Данная информация составляет характеристику сетевых процессов более детально, так как позволяет персонафицировать логические сущности по использованию конкретных служб и приложений. При этом определяются значения, лежащие в интервале  $\rho(X_{p_i}) \in [0,1]$ .

В данном случае в качестве критериев пороговой методики используем математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение. При этом критерий математического ожидания определяется по функции (2):

$$M(X) = \sum_{i=0}^n X_{p_i} \rho(X_{p_i}), \quad (2)$$

где при достаточно большом размере выборки математическое ожидание стремится к среднему значению [2]. Также критерий среднеквадратического отклонения выборки определяем с использованием функции (3) для событий текущего потока:

$$\sigma = \sqrt{M(X_{p_i}^2) - (M(X_{p_i}))^2}, \quad (3)$$

Среднеквадратическое отклонение является наиболее распространённым показателем рассеивания значений случайной величины относительно её математического ожидания. Получаем, что любое анализируемое событие является аномальным, если оно не попадает в границы ожидаемых значений.

В случае использования ШШФС необходимо анализировать характеристики потока с данными, заложенными в шаблон. В этом случае среднеквадратическое отклонение определяется по функции 4.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (X_{p_i} - Y_{p_i})^2}, \quad (4)$$

Обычно в качестве  $Y_{p_i}$  выступает некоторое ожидаемое значение, определяемое как выборочное среднее, а именно  $Y_{p_i} = Average(X_{p_i})$ . Однако, имея ШШФС, ожидаемым значением определяется

характеристика потока сети в момент времени, соответствующий характеристике  $X_p$  из шаблона. Таким образом, имеем два признака: "отклонение потока", "отклонение потока от ожидаемого ШШФС".

При статистическом анализе необходимо учитывать, что трафик компьютерных сетей обладает свойством масштабной инвариантности – имеет особую фрактальную (самоподобную) структуру, сохраняющуюся на разных масштабах [11]. В процессе передачи возникают большие всплески при относительно низком среднем уровне трафика, что крайне важно учитывать при статистическом анализе.

Производя периодический или постоянный анализ состояния сетевой инфраструктуры, появляется возможность идентифицировать действия злоумышленников, направленные на подготовку к проведению атак: сканирование портов, службы, получение информации об используемом прикладном, системном программном обеспечении и системах защиты (на этапе рекогносцировки).

Четко зафиксировать время начала негативного воздействия на объект атаки (вторжение), из-за его краткосрочности, достаточно затруднительно (что не исключает такой возможности), однако, определить наличие последующего воздействия на объект возможно, после чего по отношению к источнику угрозы необходимо применять меры воздействия. В итоге даже визуальный анализ построенных характеристик позволяет выделить информацию об изменениях в долях используемых протоколов (служебных, прикладных, пользовательских), фиксируются изменения в нагрузке КУ РБС, по количеству зафиксированных пакетов определяется объём переданной/полученной информации, регистрируется теневое использование ресурсов РБС и т. п.

Описанные выше методы обнаружения попыток нарушения безопасности в КУ РБС основаны на том обстоятельстве, что в этом случае могут изменяться некоторые статистические характеристики потока пакетов. Например, в случае определенного вида воздействия изменяется отображаемая характеристика сетевого трафика. В этом случае обнаружение нарушений основывается на визуальном сравнении текущих характеристик потока пакетов с характеристиками, заложенными в ШШФС, а также на анализе сообщений автоматического контроля сетевой активности. Необходимо также учитывать актуальность и корректность построения ШШФС, так как ошибки в его построении могут оказывать влияние на процесс анализа, непосредственно связанного с сопоставлением характеристик из ШШФС.

Сопоставляя результаты, можно сделать вывод, что диапазоны значений характеристик штатного функционирования КУ РБС, имеют относительное постоянство уровней значений математических ожиданий и дисперсий. При возникновении нештатной ситуации аналогичные оценки по различным характеристикам изменяются значительно.

С целью уменьшения вероятности появления ошибок первого рода, характерных для таких процессов анализа, рекомендуется применять иные методы анализа трафика, не приводящие к наследованию некорректных результатов. Как описано выше, для решения задачи применены в совокупности методы статистического, нейросетевого и сигнатурного анализа с сетевым трафиком в качестве объекта анализа. Выбор данных методов обусловлен их "компоненто-независимостью" при анализе данных, что уменьшает вероятность наследования ошибок [6, 12, 13].

1. Гребенников А.В. Моделирование сетевого трафика и прогнозирование с помощью модели ARIMA / А.В. Гребенников, Ю.А.Крюков, Д.В.Чернягин // Электронный журнал «Системный анализ в науке и образовании». – 2011.-№1. – С.1-11. [Электронный ресурс].
2. Исхаков С.Ю. Прогнозирование в системе мониторинга локальных сетей / С.Ю.Исхаков, А.А.Шелупанов, С.В.Тимченко // Доклады ТУСУРа. – 2012.-№1(12).-Ч.2-С.100-103.
3. Руккас К.М. Сравнительный анализ методов прогнозирования трафика в телекоммуникационных системах / К.М.Руккас, Ю.В.Соляник, К.А.Овчинников и др. // Электронное научное специализированное издание – журнал «Проблемы телекоммуникаций». – 2014.-№1(13).-С.84-95.
4. Руккас К. М. Сравнительный анализ современных систем управления сетями MPLS / К. М. Руккас, К. А. Овчинников, Н. А. Королук // Системи обробки інформації. – 2011. – № 8(98). – С. 233–237.
5. Chabaa, S. Identification and prediction of internet traffic using artificial neural networks / Samira Chabaa, Abdelouhab Zeroual, Jilali Antari // Intelligent Learning Systems & Applications. – 2010. – P. 147–155.
6. Cortez, P. Multi-scale Internet traffic forecasting using neural networks and time series methods / Paulo Cortez, Miguel Rio, Miguel Rocha, Pedro Sousa // Expert Systems. – 2010. – Vol.29. – №2. – P. 143–155.
7. Shah, K. On the predictability of data network traffic / Khushboo Shah, Stephan Bohacek, Edmond Jonckheere // IEEE, American Control Conference. – 2003. – Vol.2. – P. 1619–1624.
8. The Internet Traffic Archive [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ita.ee.lbl.gov>.
9. Иванов В.В. Статистическая модель сетевого трафика: автореф. дисс. Дубна, 2009. 30 с.

10. Олифер В.Г. Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. Учебник для вузов. 4-е изд. С.-Пб.: "Питер", 2010. 944 с.
11. Петров В.В. Структура телетрафика и алгоритм обеспечения качества обслуживания при влиянии эффекта самоподобия: автореф. дисс. М., 2004. 20 с.
12. Дементьев В.Е., Васюков Д.Ю., Коцыняк М.А. и др. Способ обнаружения компьютерных атак в информационно-телекоммуникационной сети. Патент на изобретение US 2531878 13.08.2013.
13. Дементьев В.Е., Васюков Д.Ю., Коцыняк М.А. и др. Обеспечение устойчивости информационно-телекоммуникационных сетей в условиях информационного противоборства. Монография. С-Пб.: Научно-исследовательский институт связи и автоматизации., 2014. 117 с.

*A.V. Borisov*

**THE MODEL OF THE EXOSKELETON WITH LINKS OF VARIABLE LENGTH WITH AN ARBITRARY NUMBER OF LUMPED MASSES ON THE LINK: STUDY OF THE INFLUENCE OF THE LOCATION OF THE MASSES ON ITS DYNAMICS**

*The Branch of National Research University "Moscow Power Engineering Institute" in Smolensk, Smolensk, e-mail: BorisovAndrej@yandex.ru*

**Abstract**

The article describes a new model of the link of the exoskeleton of variable length in the form of a weightless rod and concentrated point masses placed on it. During the analytical study, the number and position of point masses on the rod are arbitrary. Specific model with three point masses is taken for the numerical calculations. Study of the effect of location of point masses on the dynamics of the exoskeleton is made. Significant changes in control moments and longitudinal forces when you change the location of the concentrated masses are found.

Keywords: exoskeleton, link of variable length, concentrated masses, continuity of the solutions, differential equations of motion, control points, longitudinal force.

**Introduction**

The modern models of the exoskeleton are composed of rigid links [1], so they are uncomfortable, which hinders their mass production, as the research of musculoskeletal system [2] showed that the distance between the axes of rotation in the joint is not constant but varies during the step. We have proposed a model of links of the exoskeleton, modeling this feature of the musculoskeletal system of man when walking.

**1. Description of useful model of the link and compiling of differential equations of motion**

Consider a model with three masses lumped at various locations on the web (Fig. 1). Consider the mass concentrated  $C_{10}$  in the point mass is  $m_{10}$ ,  $C_{11}$  in the point mass is  $m_{11}$ , the point mass is  $m_{12}$   $C_{12}$ . Their position on the rod sets the constant multipliers  $n_{10}$ ,  $n_{11}$  and  $n_{12}$ , respectively.

To solve this problem apply the Lagrange equations of the second kind. The kinetic energy of the link is going to be calculated, counting the kinetic energy of each focused on the element of mass and then summing them.

$$T = \xi_1(\dot{l}_1^2 + l_1^2 \dot{\phi}_1^2)/2, \Pi = \eta_1 g l_1 \sin \phi_1, \zeta_1 = m_{10} n_{10}^2 + m_{11} n_{11}^2 + m_{12} n_{12}^2, \eta_1 = m_{10} n_{10} + m_{11} n_{11} + m_{12} n_{12}. \quad (1)$$

If the number of  $\alpha$  of masses are arbitrary, the generalization of the equations for simple models have the following form:

$$l_1^2 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{1\beta} n_{1\beta}^2 \right) \ddot{\phi}_1 + g l_1 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{1\beta} n_{1\beta} \right) \cos \phi_1 + 2 l_1 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{1\beta} n_{1\beta}^2 \right) \dot{l}_1 \dot{\phi}_1 = M_1, \quad (2)$$

$$- l_1 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{1\beta} n_{1\beta}^2 \right) \dot{\phi}_1^2 + g \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{1\beta} n_{1\beta} \right) \sin \phi_1 + \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{1\beta} n_{1\beta}^2 \right) \ddot{l}_1 = F_1. \quad (3)$$

This model allows to approximate the model level with discrete masses to the model with distributed parameters due to the possibility to specify a large number of masses. Accordingly, it is possible to simulate irregularity of the structure of bone and muscle tissue, changes of the moment of inertia of a link of a real person.

Consider a model with three arbitrarily placed concentrated masses (Fig. 2). Their position will be set in multipliers  $n_{ij}$ , where the first index refers to the number of the link, the second to the number of masses on the level. Consider a model with three arbitrarily placed concentrated masses (Fig. 2). Their position will be set in

multipliers  $n_{ij}$ , where the first index refers to the number of the link, the second to the number of masses on the level. Consider the mass concentrated in the points: in point  $C_{10}$  mass of  $m_{10}$  is, in point  $C_{11}$  mass  $m_{11}$  is, in point  $C_{12}$  mass  $m_{12}$  is, in point  $C_{20}$  – mass  $m_{20}$  is, in point  $C_{21}$  mass  $m_{21}$  is, in point  $C_{22}$  mass  $m_{22}$  is.

The kinetic energy of the link is going to be calculated, counting the kinetic energy of each focused on the element of mass and then summing them.

$$\begin{aligned}
 T = & [(m_{10}n_{10}^2 + m_{11}n_{11}^2 + m_{12}n_{12}^2)(\dot{l}_1^2 + l_1^2\dot{\varphi}_1^2) + m_{20}((\dot{l}_1 \sin\varphi_1 + \dot{l}_2 n_{20}\sin\varphi_2 + l_1\cos\varphi_1 \dot{\varphi}_1 + \\
 & + l_2 n_{20}\cos\varphi_2 \dot{\varphi}_2)^2 + (\dot{l}_1 \cos\varphi_1 + \dot{l}_2 n_{20}\cos\varphi_2 - l_1\sin\varphi_1 \dot{\varphi}_1 - l_2 n_{20}\sin\varphi_2 \dot{\varphi}_2)^2) + m_{21}((\dot{l}_1 \sin\varphi_1 + \dot{l}_2 \\
 & n_{21}\sin\varphi_2 + \\
 & + l_1\cos\varphi_1 \dot{\varphi}_1 + l_2 n_{21}\cos\varphi_2 \dot{\varphi}_2)^2 + (\dot{l}_1 \cos\varphi_1 + \dot{l}_2 n_{21}\cos\varphi_2 - l_1\sin\varphi_1 \dot{\varphi}_1 - l_2 n_{21}\sin\varphi_2 \dot{\varphi}_2)^2) + m_{22}((\dot{l}_1 \\
 & \sin\varphi_1 + \\
 & + \dot{l}_2 n_{22}\sin\varphi_2 + l_1\cos\varphi_1 \dot{\varphi}_1 + l_2 n_{22}\cos\varphi_2 \dot{\varphi}_2)^2 + (\dot{l}_1 \cos\varphi_1 + \dot{l}_2 n_{22}\cos\varphi_2 - l_1\sin\varphi_1 \dot{\varphi}_1 - l_2 n_{22}\sin\varphi_2 \dot{\varphi}_2 \\
 & )^2)]/2 \quad (4)
 \end{aligned}$$

The system of differential equations of motion consider a rod model describing the change in the angular coordinates and the length of the link is not given here.

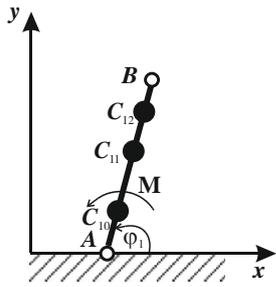


Figure 1 – The model of the exoskeleton with a movable element and three masses

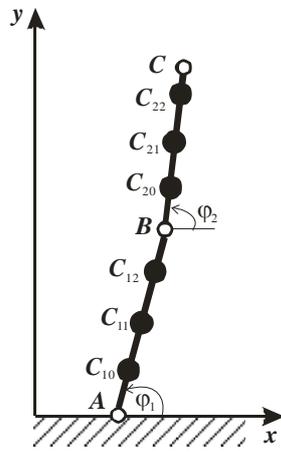


Figure 2 – The model of the exoskeleton with two movable elements and three masses

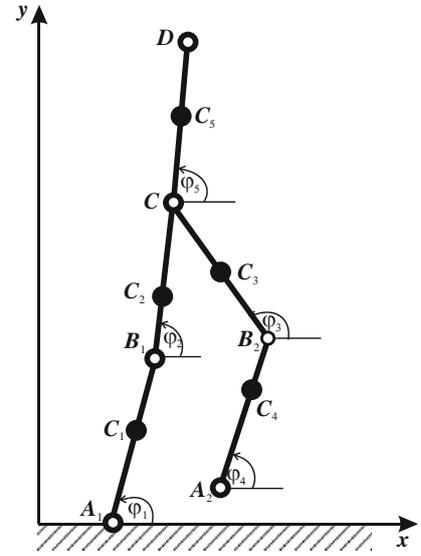


Figure 3 – The model of the exoskeleton with five movable links with lumped masses

## 2. Generalization of differential equations of motion for a model with n moving links and with an arbitrary number of masses on the link

Generalizations of the equations for a rod with  $\alpha$  masses of a mechanical system with two movable links have the following form:

$$\begin{aligned}
 & l_1^2 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{1\beta} n_{1\beta}^2 + \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} \right) \ddot{\varphi}_1 + l_1 l_2 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} n_{2\beta} \right) \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \ddot{\varphi}_2 + l_1 l_2 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} n_{2\beta} \right) \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \dot{\varphi}_2^2 + \\
 & + g l_1 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{1\beta} n_{1\beta} + \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} \right) \cos\varphi_1 + 2 l_1 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{1\beta} n_{1\beta}^2 + \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} \right) \dot{l}_1 \dot{\varphi}_1 + 2 l_1 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} n_{2\beta} \right) \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \dot{l}_2 \dot{\varphi}_2 - \quad (5)
 \end{aligned}$$

$$- l_1 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} n_{2\beta} \right) \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \ddot{l}_2 = M_1 - M_2,$$

$$\begin{aligned}
 & l_1 l_2 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} n_{2\beta} \right) \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \ddot{\varphi}_1 + l_2^2 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} n_{2\beta}^2 \right) \ddot{\varphi}_2 - l_1 l_2 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} n_{2\beta} \right) \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \dot{\varphi}_1^2 + \\
 & + g l_2 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} n_{2\beta} \right) \cos\varphi_2 + 2 l_2 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} n_{2\beta} \right) \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \dot{l}_1 \dot{\varphi}_1 + 2 l_2 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} n_{2\beta}^2 \right) \dot{l}_2 \dot{\varphi}_2 + l_2 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} n_{2\beta} \right) \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \dot{l}_2 \dot{\varphi}_2 - \quad (6)
 \end{aligned}$$

$$- \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} n_{2\beta} \right) \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \ddot{l}_1 = M_2,$$

$$\begin{aligned}
& l_2 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} n_{2\beta} \right) \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \ddot{\varphi}_2 - l_1 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{1\beta} n_{1\beta}^2 + \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} \right) \dot{\varphi}_1^2 - l_2 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} n_{2\beta} \right) \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \dot{\varphi}_2^2 + g \left( \sum_{j=0}^{k-1} m_{1j} n_{1j} \right. \\
& \quad \left. + \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} \right) \sin \varphi_1 + 2 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} n_{2\beta} \right) \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \dot{l}_2 \dot{\varphi}_2 + \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{1\beta} n_{1\beta}^2 + \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} \right) \ddot{l}_1 + \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} n_{2\beta} \right) \cos(\varphi_1 - \\
& \quad - \varphi_2) \ddot{l}_2 = M_1,
\end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}
& - l_1 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} n_{2\beta} \right) \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \ddot{\varphi}_1 - l_1 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} n_{2\beta} \right) \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \dot{\varphi}_1^2 - l_2 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} n_{2\beta}^2 \right) \dot{\varphi}_2^2 + g \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} n_{2\beta} \right) \\
& \quad \sin \varphi_2 - \\
& \quad - 2 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} n_{2\beta} \right) \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \dot{l}_1 \dot{\varphi}_1 + \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} n_{2\beta} \right) \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \ddot{l}_1 + \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} n_{2\beta}^2 \right) \ddot{l}_2 = M_2,
\end{aligned} \tag{8}$$

Considering models with three or more movable units which are not listed here due to the complexity of the equations, we obtain the generalization for a mechanism with  $n$  movable links of variable length. Here is an example for the matrix A:

$$a_{ij} = l_i l_j \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{j\beta} n_{j\beta} \tilde{\delta} n_{i\beta} + \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} \sum_{k=j+1}^n m_{k\beta} \right) \cos(\varphi_i - \varphi_j), \text{ where: symbol } \tilde{\delta} n_{i\beta} = \begin{cases} n_{j\beta}, & i = j \\ 1, & i \neq j \end{cases}. \tag{9}$$

Thus, the generalization of matrices for such models can be obtained for the first time. Generic matrix form of the equations for anthropomorphic mechanisms is given in [3].

### 3. Analytical study of the model

Conduct an analytical study of the model of the exoskeleton. When considering ballistic motions can be considered that the right side of the first equation of system (2) is equal to zero. Right side of the second equation of system (3) we assume the potential. Then there exists the energy integral for the considered model.

$$E = T + P = (m_{10} n_{10}^2 + m_{11} n_{11}^2 + m_{12} n_{12}^2) (\dot{l}_1^2 + l_1 \dot{\varphi}_1^2) / 2 + g(m_{10} n_{10} + m_{11} n_{11} + m_{12} n_{12}) l_1 \sin \varphi_1 = h. \tag{10}$$

This implies:

$$(m_{10} n_{10}^2 + m_{11} n_{11}^2 + m_{12} n_{12}^2) (\dot{l}_1^2 + l_1 \dot{\varphi}_1^2) = 2(h - g(m_{10} n_{10} + m_{11} n_{11} + m_{12} n_{12}) l_1 \sin \varphi_1). \tag{11}$$

The left part of equality (11) is positive definite. The right part of (11) depends on the trigonometric functions and takes all its possible values in some bounded closed region. Therefore, it is bounded from above by some constant  $H$ .

$$(m_{10} n_{10}^2 + m_{11} n_{11}^2 + m_{12} n_{12}^2) (\dot{l}_1^2 + l_1 \dot{\varphi}_1^2) \leq H. \tag{12}$$

Thus, the solution of the Cauchy problem for the system of differential equations of motion (2) and (3) at any initial conditions exist uniquely and indefinitely continue.

The obtained result is generalized to a model with  $n$  movable links. In a generalized form for the case of  $n$  links and the  $\alpha$  masses on the link of the expressions for the kinetic and potential energies are written as:

$$E = T + P = \sum_{i=1}^n \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{i\beta} (\dot{x}_{i\beta}^2 + \dot{y}_{i\beta}^2) / 2 + g \left( \sum_{i=1}^n \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} (m_{i\beta} n_{i\beta} + \sum_{j=i+1}^n m_{j\beta}) l_i \sin \varphi_i \right) = h. \tag{13}$$

Here  $x, y$  – coordinates of the mass element. This implies:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{i\beta} (\dot{x}_{i\beta}^2 + \dot{y}_{i\beta}^2) = 2(h - g \left( \sum_{i=1}^n \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} (m_{i\beta} n_{i\beta} + \sum_{j=i+1}^n m_{j\beta}) l_i \sin \varphi_i \right)). \tag{14}$$

Similar to the models, considered above, we have:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{i\beta} (\dot{x}_{i\beta}^2 + \dot{y}_{i\beta}^2) \leq H. \tag{15}$$

Got that for a mechanism with  $n$  movable links of the solution of the Cauchy problem for the system of differential equations of motion (2)-(3) at any initial conditions exist uniquely and indefinitely continue.

### 4. Comparative analysis of traffic control in different distribution of mass on the link

Consider a model with five units, consisting of two-legs and body (Fig. 3). Parameter values for the numerical calculations: the mass of the links  $m_1 = m_4 = 2,91$  kg,  $m_2 = m_3 = 8,93$  kg,  $m_5 = 28,93$  kg, they were distributed in the form of a point mass at joints  $1/4$  and  $1/2$  core from the mass of the link. Multipliers that specify the location of concentrated mass on the rod equal to:  $n_{11} = n_{41} = 0,595$ ,  $n_{21} = n_{31} = 0,545$ ,  $n_{51} = 0,500$ . The length

of the links was set as the interpolation functions of time according to empirical data [4]. Initial conditions:  $\varphi_1(0) = 1,68$  rad,  $\varphi_2(0) = 1,70$  rad,  $\varphi_3(0) = 1,21$  rad,  $\varphi_4(0) = 0,39$  rad,  $\varphi_5(0) = 1,57$  rad,  $\dot{\varphi}_1(0) = -1,57$  rad/s,  $\dot{\varphi}_2(0) = -2,92$  rad/s,  $\dot{\varphi}_3(0) = -0,19$  rad/s,  $\dot{\varphi}_4(0) = -2,83$  rad/s,  $\dot{\varphi}_5(0) = -0,07$  rad/s.

In Fig. 4 to illustrate the source of empirical data for the model are presented on the example of the portable lower leg foot – link number three.

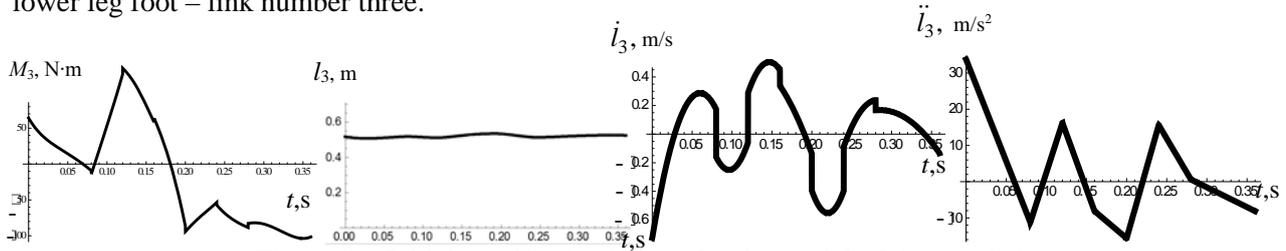


Figure 4 – Initial empirical evidence for the model of the exoskeleton link number three – lower portable legs

Consider the solution of the system differential equations of motion for the model with five moving links of variable length with a specified control, for different cases of mass distribution on the link. Let almost all mass – 90% concentrated in the center of mass of the link, and in hinge-joint located 5% of the mass of each link. This model is close to the model of a link of variable length, considered in [4], where it was believed that the entire mass of the link is concentrated in the center of mass of the link. Let's see how to change the control moments and longitudinal forces acting along the rod in this case (Fig. 5 and 6).

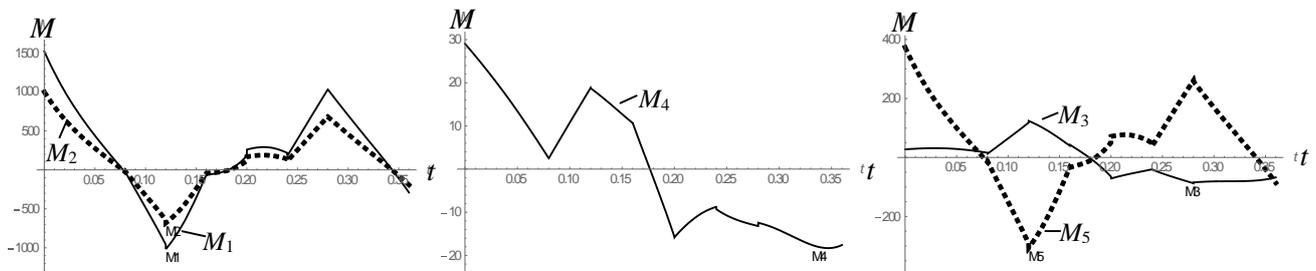


Figure 5 – The dependence of the control moments at the hinge-joint of the exoskeleton from time to time

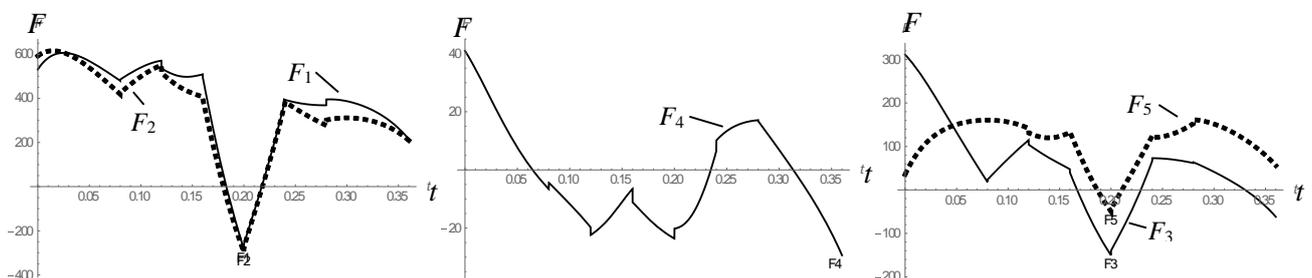


Figure 6 – The dependence of the longitudinal forces acting along the links of the exoskeleton from time to time

The dependences of the control points (Fig. 5) close to dependence obtained in [33].

Consider another limiting case. Now in the center of mass of the link is 10% of the mass of the link, and the link ends of each hinge-joint for 45% of the mass of the link. Define control points and the longitudinal force for this case (Fig. 7 and 8).

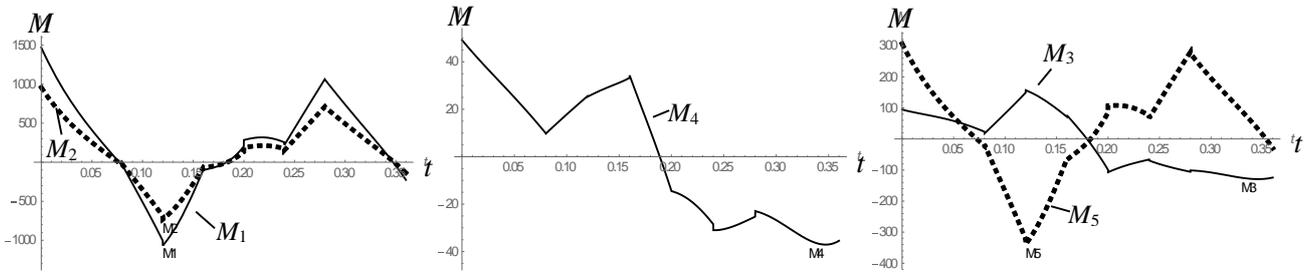


Figure 7 – The dependence of the control moments at the hinge-joint of the exoskeleton from time to time

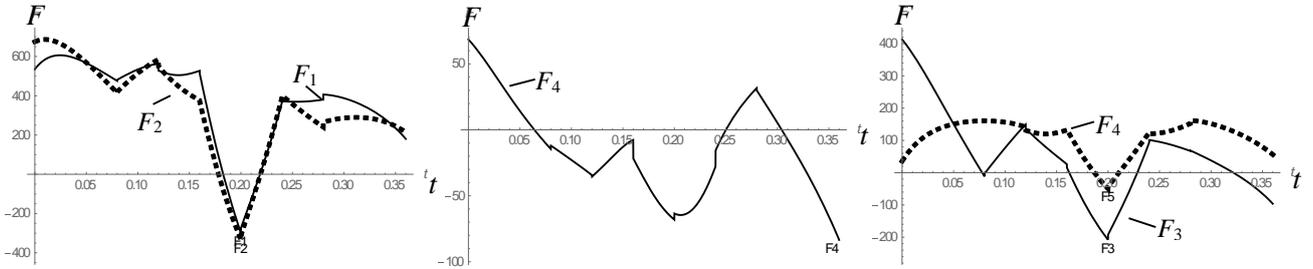


Figure 8 – The dependence of the longitudinal forces acting along the links of the exoskeleton from time to time

The obtained dependences show little change, the governing moments and axial forces in comparison with the models discussed above. Thus, for a symmetrical position of the masses at the ends of the rod at the hinge-joints significant changes in the management model is not set.

Consider the case of asymmetric distribution of masses on the ends of the link in the hinge-joints. Though almost all the mass of the link is 90% focused on the end of the link in a hinge-joint with index zero on the bottom level, and 5% in the center of mass and in another hinge-joint. Then we obtain the following control actions, and the longitudinal force (Fig. 8 and 10).

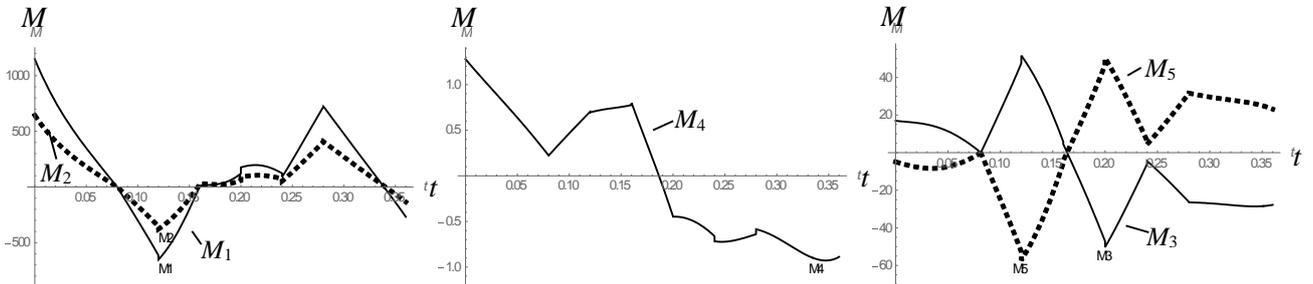


Figure 9 – The dependence of the control moments at the hinge-joint of the exoskeleton from time to time

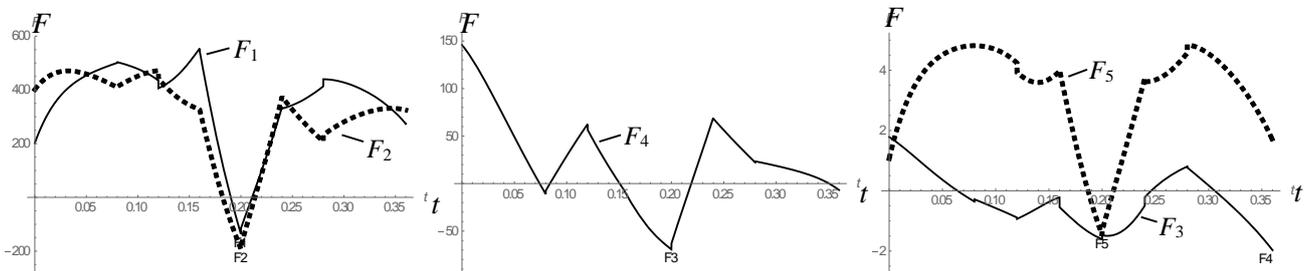


Figure 10 – The dependence of the longitudinal forces acting along the links of the exoskeleton from time to time

Comparing the obtained dependence (Fig. 9-10) with dependencies to the symmetrical arrangement of masses (Fig. 5-8) we see that the control of the impact and longitudinal forces change significantly. For portable foot and body they change dramatically.

Consider another case of asymmetric distribution of masses on the ends of the link in the hinge-joint. Though almost all the mass of the link is 90% focused on the end of the link in a hinge-joint with the index two, located at the top level, and 5% in the center of mass and in another hinge-joint. This model is closest to the link in the musculoskeletal system of man. We obtain the following control actions, and the longitudinal force (Fig. 11 and 12).

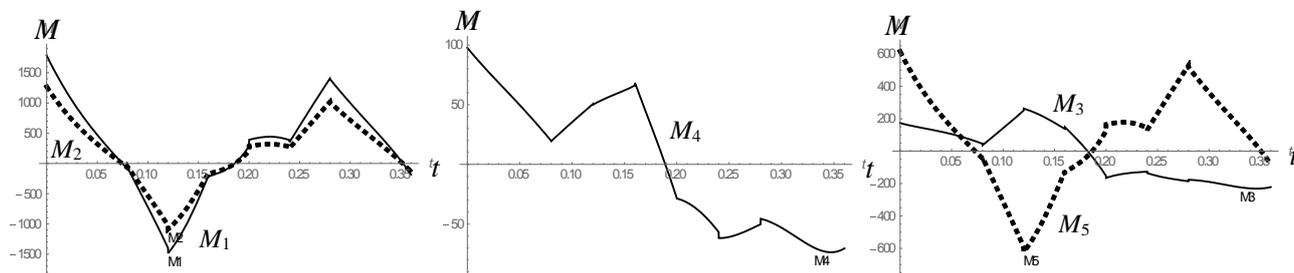


Figure 11 – The dependence of the control moments at the joints of the exoskeleton from time to time

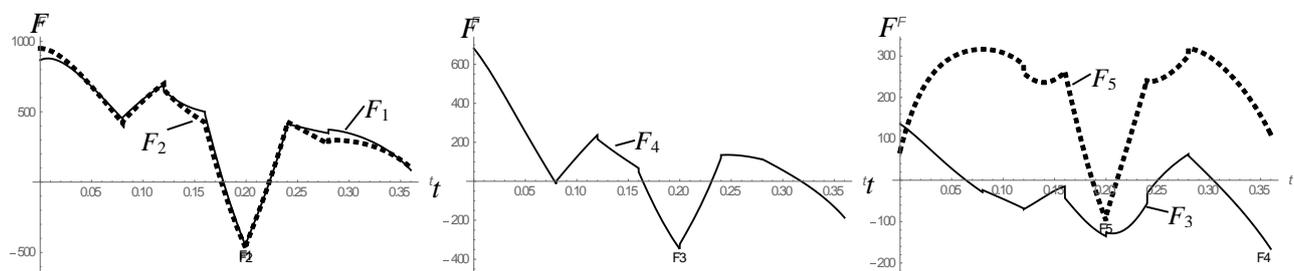


Figure 12 – The dependence of the longitudinal forces acting along the links of the exoskeleton from time to time

Comparing (Fig. 11 and 12) (Fig. 5-10), we see that they vary as compared to the symmetric arrangement of the mass and position of the masses from below link. Changes are observed in the form of dependences and the maximum values up to two orders of magnitude.

### Conclusion

The study found out that an asymmetrical arrangement of masses on the link leads to major changes of control points. This fact is important in the design of the exoskeleton, as the links of the musculoskeletal system of the person have a pronounced asymmetry in the distribution of mass on the link. Simulating the exoskeleton of a symmetric link it is impossible to achieve simultaneous quality of the work of the exoskeleton of the musculoskeletal system of man due to the significant differences in dynamic behavior models of link. It is observed in the current models of exoskeletons with rigid links. Thus, in the framework of the developed model by changing the ratio between the masses, to approximate the elements of the exoskeleton and the person to explore their behaviour.

1. Formalsky A. M. One method of controlling the exoskeleton. / Formalsky A. M.// Lomonosov readings: abstracts of scientific. conf. (16 – April 25, 2012, Moscow, MSU named after M. V. Lomonosov). – M.: Publishing house of Moscow University, 2012. – P. 151-152.
2. Borisov A.V. Calculation of deformations arising from loads in the musculoskeletal system of man / Borisov A.V. // Izvestiya of the Smolensk state University. – 2011. – No. 4. – S. 114-118.
3. Borisov A.V. Design automation for core exoskeletons / Borisov A. V. // mechatronics, automation, control. – 2014. – No. 10. – S. 29-33.
4. Borisov A.V. Modeling of the musculoskeletal apparatus and the application of the obtained results to develop a model for an anthropomorphic robot : monograph / A. V. Borisov, M. : Sputnik +, 2009. – 212p.

**МОДЕЛЬ ЭКЗОСКЕЛЕТА СО ЗВЕНЬЯМИ ПЕРЕМЕННОЙ ДЛИНЫ С ПРОИЗВОЛЬНЫМ КОЛИЧЕСТВОМ СОСРЕДОТОЧЕННЫХ МАСС НА ЗВЕНЕ: ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАСПОЛОЖЕНИЯ МАСС НА ЕГО ДИНАМИКУ**

Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Смоленск,  
e-mail: BorisowAndrej@yandex.ru

**Аннотация**

В статье описывается новая модель звена экзоскелета переменной длины в виде невесомого стержня и расположенных на нем сосредоточенных точечных масс. Количество и расположение точечных масс на стержне при аналитическом исследовании произвольно. Для численных расчетов берется конкретная модель с тремя точечными массами. Проводится исследование влияния расположения точечных масс на динамику экзоскелета. Установлены значительные изменения в управляющих моментах и продольных силах при изменении расположения сосредоточенных масс.

Ключевые слова: экзоскелет, звено переменной длины, сосредоточенные массы, продолжительность решения, дифференциальные уравнения движения, управляющие моменты, продольные силы.

**Введение**

Современные модели экзоскелета состоят из абсолютно твердых звеньев [1], поэтому они являются некомфортными, что мешает их массовому производству, так как исследования опорно-двигательного аппарата человека [2] показали, что расстояние между осями вращения в суставе не является постоянным, а изменяется в течение шага. Нами предложена модель звеньев, экзоскелета, моделирующая эту особенность опорно-двигательного аппарата человека при ходьбе.

**1. Описание модели звена и составление дифференциальных уравнений движения**

Рассмотрим модель с тремя массами, сосредоточенными в различных местах на стержне (рис. 1). Массы считаем сосредоточенными: в точке  $C_{10}$  масса  $m_{10}$ , в точке  $C_{11}$  масса  $m_{11}$ , в точке  $C_{12}$  масса  $m_{12}$ . Их положение на стержне задается постоянными множителями  $n_{10}$ ,  $n_{11}$  и  $n_{12}$  соответственно.

Для решения поставленной задачи применим уравнения Лагранжа второго рода. Кинетическую энергию звена будем вычислять, подсчитывая кинетическую энергию каждой сосредоточенной на звене массы и затем суммируя их.

$$T = \xi_1(\dot{l}_1^2 + l_1^2 \dot{\varphi}_1^2)/2, \quad \Pi = \eta_1 g l_1 \sin \varphi_1, \quad \zeta_1 = m_{10} n_{10}^2 + m_{11} n_{11}^2 + m_{12} n_{12}^2, \quad \eta_1 = m_{10} n_{10} + m_{11} n_{11} + m_{12} n_{12}. \quad (1)$$

Обобщения уравнений для однозвенной модели, если имеется произвольное количество  $\alpha$  масс, имеет вид:

$$l_1^2 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{1\beta} n_{1\beta}^2 \right) \ddot{\varphi}_1 + g l_1 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{1\beta} n_{1\beta} \right) \cos \varphi_1 + 2 l_1 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{1\beta} n_{1\beta}^2 \right) \dot{l}_1 \dot{\varphi}_1 = M_1, \quad (2)$$

$$- l_1 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{1\beta} n_{1\beta}^2 \right) \dot{\varphi}_1^2 + g \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{1\beta} n_{1\beta} \right) \sin \varphi_1 + \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{1\beta} n_{1\beta}^2 \right) \ddot{l}_1 = F_1. \quad (3)$$

Данная модель позволяет приблизить модель звена с дискретными массами к модели с распределенными параметрами за счет возможности задания большого количества масс. Соответственно, есть возможность моделировать неравномерность структуры костно-мышечной ткани, изменения момента инерции звена реального человека.

Рассмотрим модель с тремя произвольно расположенными сосредоточенными массами (рис. 2). Их положение будем задавать множителями  $n_{ij}$ , где первый индекс относится к номеру звена, второй к номеру массы на звене. Массы считаем сосредоточенными в точках  $C_{10}$  масса  $m_{10}$ ,  $C_{11}$  масса  $m_{11}$ ,  $C_{12}$  масса  $m_{12}$ ,  $C_{20}$  масса  $m_{20}$ ,  $C_{21}$  масса  $m_{21}$ ,  $C_{22}$  масса  $m_{22}$ .

Кинетическую энергию звена будем вычислять, подсчитывая кинетическую энергию каждой сосредоточенной на звене массы и затем суммируя их.

$$T = [(m_{10} n_{10}^2 + m_{11} n_{11}^2 + m_{12} n_{12}^2)(\dot{l}_1^2 + l_1^2 \dot{\varphi}_1^2) + m_{20}((\dot{l}_1 \sin \varphi_1 + \dot{l}_2 n_{20} \sin \varphi_2 + l_1 \cos \varphi_1 \dot{\varphi}_1 + l_2 n_{20} \cos \varphi_2 \dot{\varphi}_2)^2 + (\dot{l}_1 \cos \varphi_1 + \dot{l}_2 n_{20} \cos \varphi_2 - l_1 \sin \varphi_1 \dot{\varphi}_1 - l_2 n_{20} \sin \varphi_2 \dot{\varphi}_2)^2) + m_{21}((\dot{l}_1 \sin \varphi_1 + \dot{l}_2 n_{21} \sin \varphi_2 + l_1 \cos \varphi_1 \dot{\varphi}_1 + l_2 n_{21} \cos \varphi_2 \dot{\varphi}_2)^2 + (\dot{l}_1 \cos \varphi_1 + \dot{l}_2 n_{21} \cos \varphi_2 - l_1 \sin \varphi_1 \dot{\varphi}_1 - l_2 n_{21} \sin \varphi_2 \dot{\varphi}_2)^2) + m_{22}((\dot{l}_1 \sin \varphi_1 + l_1 \cos \varphi_1 \dot{\varphi}_1 + l_2 n_{22} \sin \varphi_2 \dot{\varphi}_2)^2 + (\dot{l}_1 \cos \varphi_1 + l_2 n_{22} \cos \varphi_2 \dot{\varphi}_2 - l_1 \sin \varphi_1 \dot{\varphi}_1 - l_2 n_{22} \sin \varphi_2 \dot{\varphi}_2)^2) + m_{22}((\dot{l}_1 \sin \varphi_1 +$$

$$+ \dot{l}_2 n_{22} \sin \varphi_2 + l_1 \cos \varphi_1 \dot{\varphi}_1 + l_2 n_{22} \cos \varphi_2 \dot{\varphi}_2)^2 + (\dot{l}_1 \cos \varphi_1 + \dot{l}_2 n_{22} \cos \varphi_2 - l_1 \sin \varphi_1 \dot{\varphi}_1 - l_2 n_{22} \sin \varphi_2 \dot{\varphi}_2)^2) / 2$$

Система дифференциальных уравнений движения рассматриваемой стержневой модели, описывающая изменение угловой координаты и длины звена здесь не приводится.

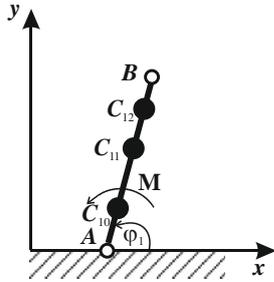


Рисунок 1 – Модель экзоскелета с одним подвижным звеном и тремя массами

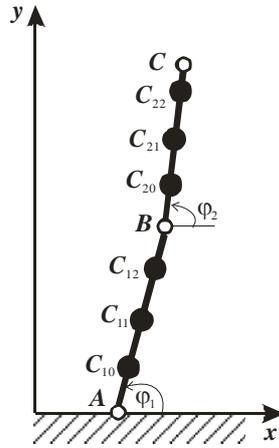


Рисунок 2 – Модель экзоскелета с двумя подвижными звеньями и тремя массами

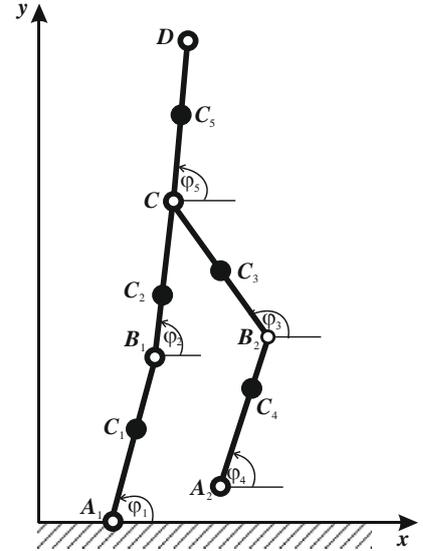


Рисунок 3 – Модель экзоскелета с пятью подвижными звеньями с сосредоточенными массами

## 2. Обобщения дифференциальных уравнений движения на случай модели с $n$ подвижными звеньями и с произвольным количеством масс на звене

Обобщения уравнений для стержня с  $\alpha$  массами механической системы с двумя подвижными звеньями имеют вид:

$$l_1^2 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{1\beta} n_{1\beta}^2 + \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} \right) \ddot{\varphi}_1 + l_1 l_2 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} n_{2\beta} \right) \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \ddot{\varphi}_2 + l_1 l_2 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} n_{2\beta} \right) \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \dot{\varphi}_2^2 +$$

$$+ g l_1 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{1\beta} n_{1\beta} + \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} \right) \cos \varphi_1 + 2 l_1 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{1\beta} n_{1\beta}^2 + \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} \right) \dot{l}_1 \dot{\varphi}_1 + 2 l_1 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} n_{2\beta} \right) \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \dot{l}_2 \dot{\varphi}_2 - \quad (5)$$

$$- l_1 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} n_{2\beta} \right) \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \ddot{l}_2 = M_1 - M_2,$$

$$l_1 l_2 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} n_{2\beta} \right) \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \ddot{\varphi}_1 + l_2^2 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} n_{2\beta}^2 \right) \ddot{\varphi}_2 - l_1 l_2 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} n_{2\beta} \right) \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \dot{\varphi}_1^2 +$$

$$+ g l_2 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} n_{2\beta} \right) \cos \varphi_2 + 2 l_2 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} n_{2\beta} \right) \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \dot{l}_1 \dot{\varphi}_1 + 2 l_2 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} n_{2\beta}^2 \right) \dot{l}_2 \dot{\varphi}_2 + l_2 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} n_{2\beta} \right) \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \dot{\varphi}_2^2 = M_2, \quad (6)$$

$$- l_2 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} n_{2\beta} \right) \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \ddot{\varphi}_2 - l_1 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{1\beta} n_{1\beta}^2 + \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} \right) \dot{\varphi}_1^2 - l_2 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} n_{2\beta} \right) \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \dot{\varphi}_2^2 + g \left( \sum_{j=0}^{k-1} m_{1j} n_{1j} + \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} \right) \sin \varphi_1 +$$

$$+ 2 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} n_{2\beta} \right) \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \dot{l}_2 \dot{\varphi}_2 + \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{1\beta} n_{1\beta}^2 + \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} \right) \ddot{l}_1 + \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} n_{2\beta} \right) \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \ddot{l}_2 = M_1, \quad (7)$$

$$- l_1 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} n_{2\beta} \right) \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \ddot{\varphi}_1 - l_1 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} n_{2\beta} \right) \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \dot{\varphi}_1^2 - l_2 \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} n_{2\beta}^2 \right) \dot{\varphi}_2^2 + g \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} n_{2\beta} \right) \sin \varphi_2 -$$

$$\quad (8)$$

$$-2\left(\sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} n_{2\beta}\right) \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \dot{l}_1 \dot{\varphi}_1 + \left(\sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} n_{2\beta}\right) \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \ddot{l}_1 + \left(\sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{2\beta} n_{2\beta}^2\right) \ddot{l}_2 = M_2,$$

Рассматривая модели с тремя и более подвижными звеньями, которые здесь не приводятся ввиду громоздкости уравнений, получаем обобщения для механизма с  $n$  подвижными звеньями переменной длины. Приведем в качестве примера для матрицы  $A$ :

$$a_{ij} = l_i l_j \left( \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{j\beta} n_{j\beta} \tilde{\delta} n_{i\beta} + \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} \sum_{k=j+1}^n m_{k\beta} \right) \cos(\varphi_i - \varphi_j), \text{ где: символ } \tilde{\delta} n_{i\beta} = \begin{cases} n_{j\beta}, & i = j \\ 1, & i \neq j \end{cases}. \quad (9)$$

Таким образом, впервые получены обобщения матриц для подобной модели. Универсальная матричная форма уравнений для антропоморфных механизмов приводится в [3].

### 3. Аналитическое исследование модели

Проведем аналитическое исследование рассматриваемой модели экзоскелета. При рассмотрении баллистических движений можно считать, что правая часть первого уравнения системы (2) равна нулю. Правую часть второго уравнения системы (3) будем считать потенциальной. Тогда существует интеграл энергии для рассматриваемой модели.

$$E = T + \Pi = (m_{10} n_{10}^2 + m_{11} n_{11}^2 + m_{12} n_{12}^2) (\dot{l}_1^2 + l_1 \dot{\varphi}_1^2) / 2 + g(m_{10} n_{10} + m_{11} n_{11} + m_{12} n_{12}) l_1 \sin \varphi_1 = h. \quad (10)$$

Отсюда получаем.

$$(m_{10} n_{10}^2 + m_{11} n_{11}^2 + m_{12} n_{12}^2) (\dot{l}_1^2 + l_1 \dot{\varphi}_1^2) = 2(h - g(m_{10} n_{10} + m_{11} n_{11} + m_{12} n_{12}) l_1 \sin \varphi_1). \quad (11)$$

Левая часть равенства (11) является положительно определенной. Правая часть (11) зависит от тригонометрической функции и принимает все свои возможные значения в некоторой ограниченной замкнутой области. Следовательно, она ограничена сверху некоторой постоянной величиной  $H$ .

$$(m_{10} n_{10}^2 + m_{11} n_{11}^2 + m_{12} n_{12}^2) (\dot{l}_1^2 + l_1 \dot{\varphi}_1^2) \leq H. \quad (12)$$

Таким образом, решение задачи Коши для системы дифференциальных уравнений движения (2) и (3) при любых начальных условиях существует, единственно и неограниченно продолжаемо.

Полученный результат обобщается на модель с  $n$  подвижными звеньями. В обобщенном виде для случая  $n$  звеньев и  $\alpha$  масс на звене выражения для кинетической и потенциальной энергий записываются в виде:

$$E = T + \Pi = \sum_{i=1}^n \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{i\beta} (\dot{x}_{i\beta}^2 + \dot{y}_{i\beta}^2) / 2 + g \left( \sum_{i=1}^n \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} (m_{i\beta} n_{i\beta} + \sum_{j=i+1}^n m_{j\beta}) l_i \sin \varphi_i \right) = h. \quad (13)$$

Здесь  $x, y$  – координаты массы на звене. Отсюда получаем.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{i\beta} (\dot{x}_{i\beta}^2 + \dot{y}_{i\beta}^2) = 2(h - g \left( \sum_{i=1}^n \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} (m_{i\beta} n_{i\beta} + \sum_{j=i+1}^n m_{j\beta}) l_i \sin \varphi_i \right)). \quad (14)$$

Аналогично рассмотренной выше модели имеем:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{i\beta} (\dot{x}_{i\beta}^2 + \dot{y}_{i\beta}^2) \leq H. \quad (15)$$

Таким образом, получили, что для механизма с  $n$  подвижными звеньями решение задачи Коши для системы дифференциальных уравнений движения (2)-(3) при любых начальных условиях существует, единственно и неограниченно продолжаемо.

### 4. Сравнительный анализ управления движением при различном распределении масс на звене

Рассмотрим модель с пятью звеньями, состоящую из двухзвенных ног и корпуса (рис. 3). Значения параметров для численных расчетов: массы звеньев  $m_1 = m_4 = 2,91$  кг,  $m_2 = m_3 = 8,93$  кг,  $m_5 = 28,93$  кг, они распределялись в виде точечных масс – в шарнирах  $1/4$  и на стержне  $1/2$  от массы звена. Множители, задающие положение сосредоточенной массы на стержне равны:  $n_{11} = n_{41} = 0,595$ ,  $n_{21} = n_{31} = 0,545$ ,  $n_{51} = 0,500$ . Длины звеньев задавались в виде интерполяционных функций времени по эмпирическим данным [4]. Начальные условия:  $\varphi_1(0) = 1,68$  рад,  $\varphi_2(0) = 1,70$  рад,  $\varphi_3(0) = 1,21$  рад,  $\varphi_4(0) = 0,39$  рад,  $\varphi_5(0) = 1,57$  рад,  $\dot{\varphi}_1(0) = -1,57$  рад/с,  $\dot{\varphi}_2(0) = -2,92$  рад/с,  $\dot{\varphi}_3(0) = -0,19$  рад/с,  $\dot{\varphi}_4(0) = -2,83$  рад/с,  $\dot{\varphi}_5(0) = -0,07$  рад/с. На рис. 4 в качестве иллюстрации приводятся исходные эмпирические данные для модели на примере голени переносимой ноги – звена номер три.

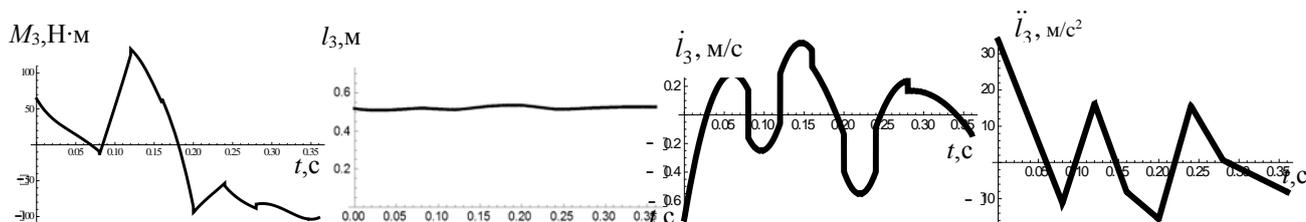


Рисунок 4 – Исходные эмпирические данные для модели экзоскелета для звена номер три – голени переносимой ноги

Рассмотрим решение системы дифференциальных уравнений движения для модели с пятью подвижными звеньями переменной длины с заданным управлением, для различных случаев распределения масс на звене. Интерес представляет анализ предельных случаев. Пусть практически вся масса – 90% сосредоточена в центре масс звена, а в шарнирах суставах располагается по 5% массы звена в каждом. Данная модель близка к модели звена переменной длины, рассмотренной в [4], где считалось, что вся масса звена сосредоточена в центре масс звена. Посмотрим, как изменяются управляющие моменты и продольные силы, действующие вдоль стержня в этом случае (рис. 5 и 6).

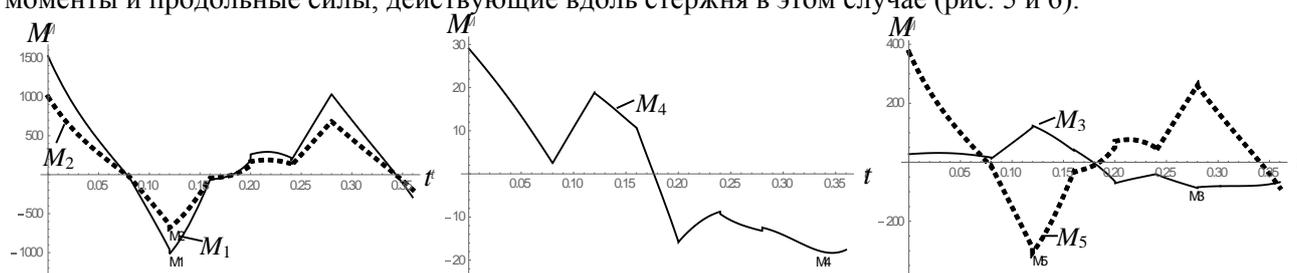


Рисунок 5 – Зависимости управляющих моментов в шарнирах-суставах экзоскелета от времени

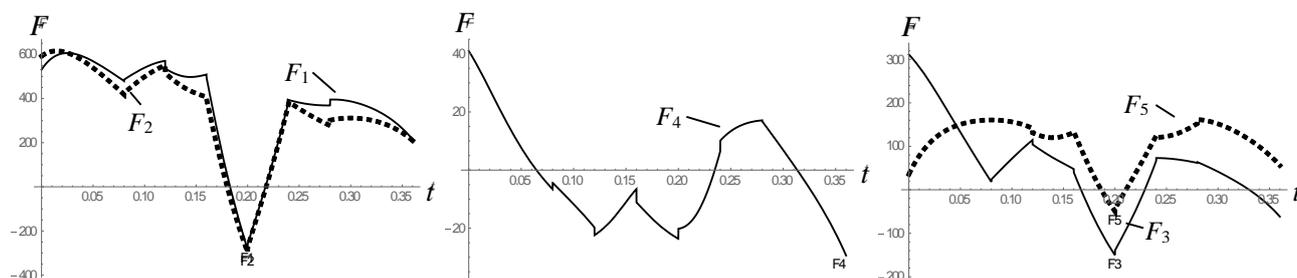


Рисунок 6 – Зависимости продольных сил, действующих вдоль звеньев экзоскелета от времени

Полученные зависимости управляющих моментов (рис. 5) близки к полученным в [33].

Рассмотрим другой предельный случай. Пусть теперь в центре масс звена располагается 10% массы звена, а на концах звена в каждом шарнире-суставе по 45% массы звена. Определим управляющие моменты и продольные силы для этого случая (рис. 7 и 8).

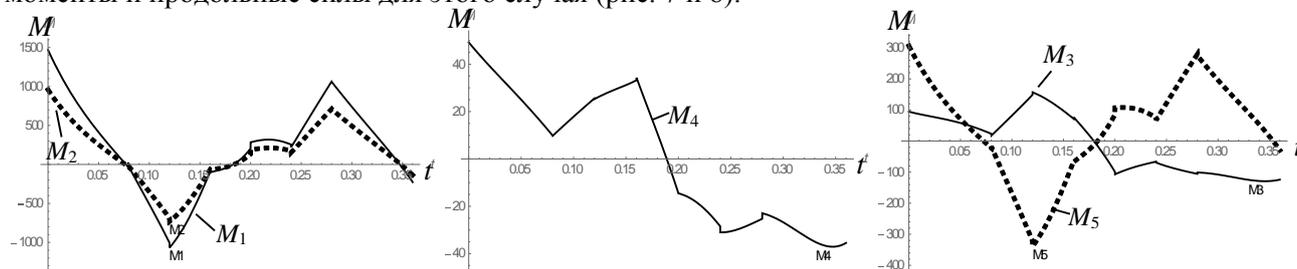


Рисунок 7 – Зависимости управляющих моментов в шарнирах-суставах экзоскелета от времени

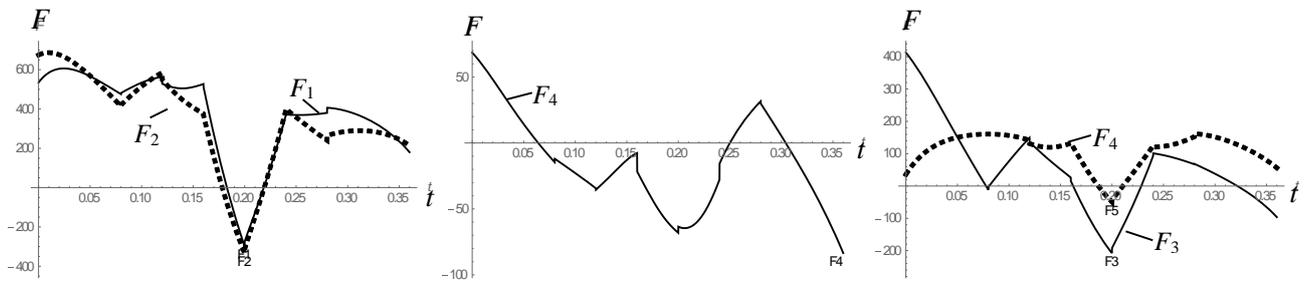


Рисунок 8 – Зависимости продольных сил, действующих вдоль звеньев экзоскелета от времени

Полученные зависимости показывают незначительные изменения управляющих моментов и продольных сил в сравнении с моделями, рассмотренными выше. Таким образом, при симметричном расположении масс на концах стержня в шарнирах-суставах значительных изменений в управлении модели не установлено.

Рассмотрим случай несимметричного распределения масс на концах звена в шарнирах-суставах. Пусть почти вся масса звена 90% сосредоточена на конце звена в шарнире-суставе с индексом ноль, расположенном снизу звена, а по 5% в центре масс и в другом шарнире-суставе. Тогда получаем следующие управляющие воздействия и продольные силы (рис. 8 и 10).

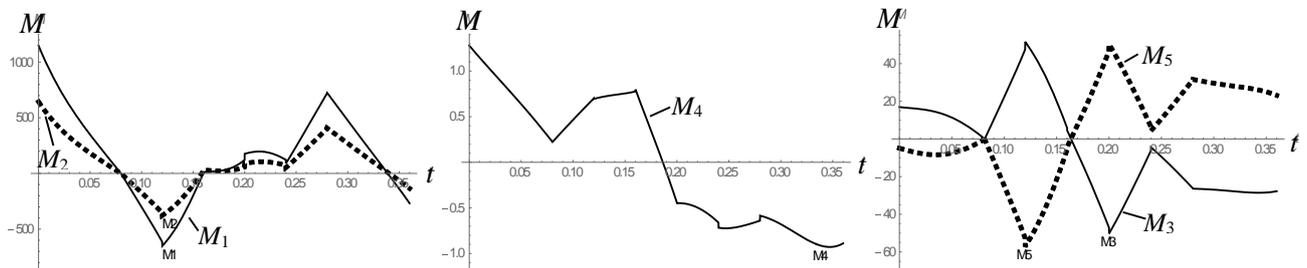


Рисунок 9 – Зависимости управляющих моментов в шарнирах-суставах экзоскелета от времени

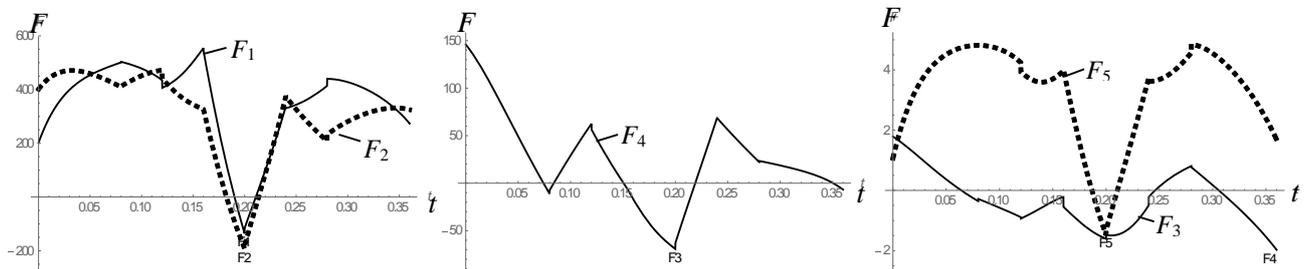


Рисунок 10 – Зависимости продольных сил, действующих вдоль звеньев экзоскелета от времени

Сравнивая полученные зависимости (рис. 9-10) с зависимостями для симметричного расположения масс (рис. 5-8) видим, что управляющие воздействия и продольные силы изменяются значительно. Для переносной ноги и корпуса они изменяются кардинально.

Рассмотрим еще один случай несимметричного распределения масс на концах звена в шарнирах-суставах. Пусть почти вся масса звена 90% сосредоточена на конце звена в шарнире-суставе с индексом два, расположенном сверху звена, а по 5% в центре масс и в другом шарнире-суставе. Такая модель наиболее близка к звену опорно-двигательного аппарата человека. Получаем следующие управляющие воздействия и продольные силы (рис. 11 и 12).

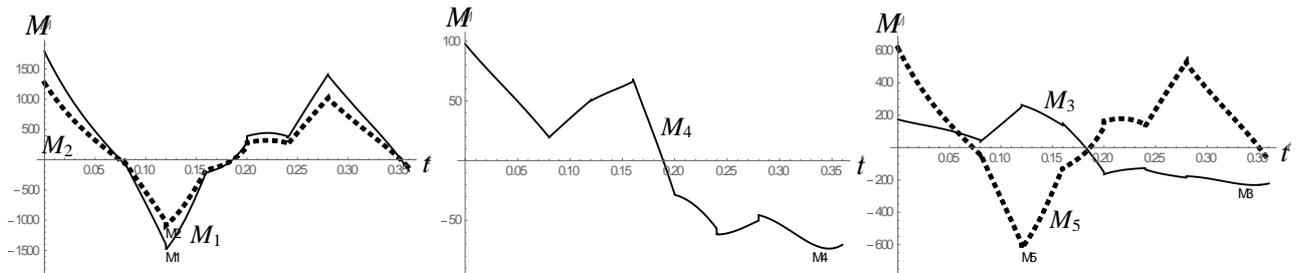


Рисунок 11 – Зависимости управляющих моментов в шарнирах-суставах экзоскелета от времени

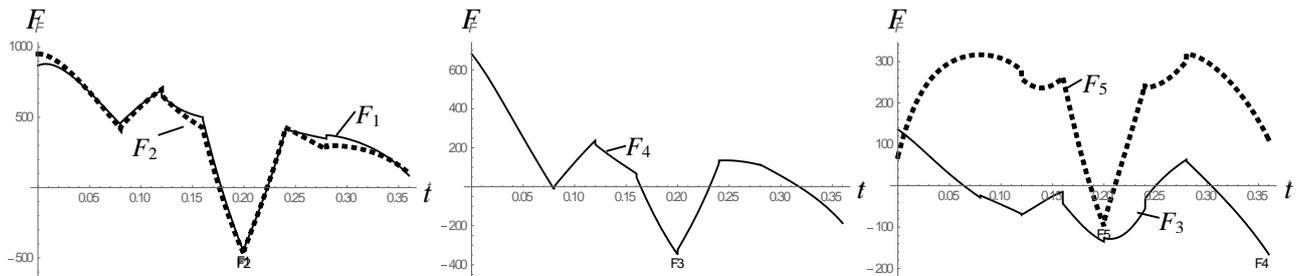


Рисунок 12 – Зависимости продольных сил, действующих вдоль звеньев экзоскелета от времени

Сравнивая (рис. 11 и 12) с (рис. 5-10), видим, что они меняются как по сравнению с симметричным расположением масс, так и с расположением масс снизу звена. Изменения наблюдаются как в форме зависимостей, так и в максимальных значениях для до двух порядков.

### Заключение

В результате исследования установлено, что несимметричное расположение масс на звене приводит к серьезным изменениям управляющих моментов. Этот факт является важным при проектировании экзоскелета, так как звенья опорно-двигательного аппарата человека обладают явно выраженной несимметричностью в распределении массы на звене. Моделируя экзоскелет симметричными звеньями невозможно достичь синхронной, комфортной работы экзоскелета с опорно-двигательным аппаратом человека из-за значительных динамических различий поведения моделей звеньев. Это наблюдается в нынешних моделях экзоскелетов с абсолютно твердыми звеньями. Таким образом, в рамках разработанной модели можно изменять соотношения между массами, аппроксимировать различные звенья экзоскелета и человека, исследовать их поведение.

1. Формальский А. М. Об одном способе управления экзоскелетом. / А. М. Формальский // Ломоносовские чтения: тезисы докладов науч. конф. (16 – 25 апреля 2012, Москва, МГУ имени М. В. Ломоносова). – М.: Издательство Московского университета, 2012. – С. 151-152.
2. Борисов А. В. Расчет деформаций, возникающих при нагрузках в опорно-двигательном аппарате человека / А. В. Борисов // Известия Смоленского гос. университета. – 2011. – № 4. – С. 114-118.
3. Борисов А. В. Автоматизация проектирования стержневых экзоскелетов / А. В. Борисов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2014. – № 10. – С. 29-33.
4. Борисов А. В. Моделирование опорно-двигательного аппарата человека и применение полученных результатов для разработки модели антропоморфного робота : монография / А. В. Борисов. – М. : Спутник +, 2009. – 212 с.

*E.S. Briskin, Ya.V. Kalinin*

## ON ENERGETICALLY EFFICIENT GAITS OF WALKING ROBOTS<sup>VIII</sup>

*Volgograd State Technical University, Volgograd, dtm@vstu.ru*

### Annotation

The conditions of changing the type of gait of the walking robot due to self-synchronization of the operation of the drives are studied. The conditions under which this or that gait turns out to be most energetically favorable are determined.

Keywords: Gait of walking robot, self-synchronization of motion, energy efficiency.

*Е.С. Брискин, Я.В. Калинин*

## ОБ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНЫХ ПОХОДКАХ ШАГАЮЩИХ РОБОТОВ<sup>7</sup>

*Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, dtm@vstu.ru*

### Аннотация

Изучаются условия изменения типа походки шагающего робота за счёт явления самосинхронизации работы приводов. Определяются условия, при которых наиболее энергетически выгодной оказывается та или иная походка.

Ключевые слова: походка шагающего робота, самосинхронизация движения, энергетическая эффективность.

**Введение.** Задача повышения энергетической эффективности шагающих роботов является одной из важнейших при их разработке и эксплуатации [1, 2]. Низкая энергетическая эффективность шагающих роботов обусловлена тем, что шагающий движитель является неуравновешенным механизмом [3] и при его периодическом переносе в новое положение значительная часть мощности двигателя расходуется на преодоление сил инерции. Известно, что, как правило, эта мощность при поступательном равномерном движении корпуса робота пропорциональна кубу скорости [4]. Известны и некоторые методы решения этой задачи: за счёт введения рекуператоров энергии [5, 6], за счёт отказа от равномерного движения центра масс корпуса робота при сохранении средней скорости [7, 8] и другие.

При движении многоприводной системы, какой и является любой шагающий робот с групповым или индивидуальным управлением шагающими движителями, возможно возникновение явления самосинхронизации приводов [9]. Под групповым управлением понимается управление одним двигателем всеми или несколькими движителями, например, сдвоенными механизмами шагания в машине «Восьминог» (рис. 1а); индивидуальное управление – это управление каждым механизмом шагания одним или несколькими приводами. Поэтому задача учёта самосинхронизации для построения энергетически эффективных походок шагающих роботов является актуальной.



Рисунок 1 – Шагающие роботы Волгоградского государственного технического университета:  
а) шагающая машина «Восьминог», б) шагающий робот «Ортоног»

**Постановка задачи.** Рассматриваются шагающие роботы с индивидуальными или групповыми механизмами шагания, в простейшем случае сдвоенными. К таким роботам, в частности, относится шагающий робот «Ортоног» (рис. 1б) [10] со сдвоенными ортогонально-поворотными движителями.

Ставится задача определения энергоэффективности различных расписаний походок [11] шагающего робота в зависимости от скорости его движения. Энергоэффективность оценивается уровнем тепловых потерь в приводных двигателях.

**Расчётная схема и математическая модель динамики движения.** Постановка задачи приводит к необходимости рассмотрения шагающего робота (рис. 2) как несвободной механической системы [9], в которой несущим телом является корпус робота массы  $M$ , упруго связанный с неподвижным основанием (грунтом с параметрами жёсткости  $c$  и вязкости  $\mu$ ) через движители, находящиеся в фазе опоры на грунт. Несомыми телами являются переносимые шагающие движители, массы  $m$  каждый.

Рассеиваемая колебательной системой за цикл механическая энергия определяется как

$$A = \pi \mu a^2 \omega, \tag{1}$$

где  $a$  – амплитуда колебаний корпуса робота на упругом грунте,  $\omega$  - круговая частота колебаний.

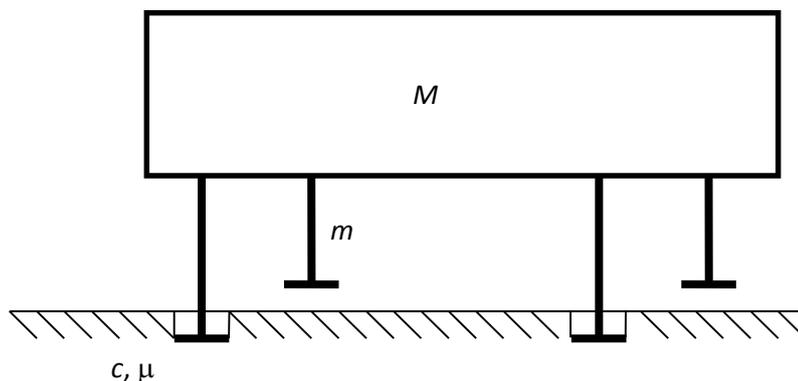


Рисунок 2 – Расчётная схема шагающего робота «Ортоног»

Рассматриваются роботы со сдвоенными шагающими движителями, для механизмов шагания каждого из которых коэффициент режима [11]  $\gamma = 0,5$  [12]. Для периодической походки с одними и теми же законами переноса движителей, но при различных расписаниях походки  $\epsilon$  [11], характеризующих относительное время начала переноса  $\epsilon = \tau^*/\tau$ , где  $\tau$  – время переноса механизма шагания,  $\tau^*$  - время начала переноса следующего движителя (рис. 3). Могут быть реализованы различные варианты переноса: «четвёрками», «двойками», одиночно, а также достаточно большое количество смешанных вариантов.

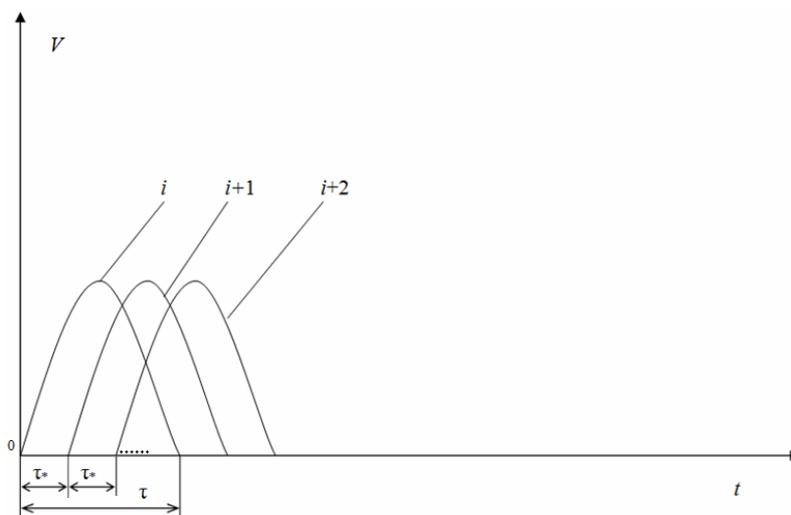


Рисунок 3 – Циклограмма расписания походок шагающего робота

Все возможные законы переноса движителей достаточно хорошо аппроксимируются первыми несколькими гармониками разложения в ряд Фурье. В рассматриваемой модельной задаче можно ограничиться рассмотрением первой гармоники разложения.

Для случая гармонических колебаний амплитуда колебаний вид:

$$a = \frac{H_0}{M \sqrt{(k^2 - \omega^2)^2 + 4n^2 \omega^2}}, \quad (2)$$

где  $k^2 = c/M$ ,  $n = \mu/(2M)$ ,  $H_0$  – амплитуда вынуждающей силы. В поставленной задаче при  $\epsilon$ , не зависящем от номера движителя, под амплитудой вынуждающей силы понимается сила инерции переносимого движителя массы  $m\epsilon$  (переносимая масса зависит от расписания походки)  $H_0 = \lambda m \omega^2 \epsilon$ , где  $\lambda$  параметр, трактуемый как амплитуда колебаний переносимого механизма шагания и приближённо равный  $0,5S$ ; под частотой вынуждающей силы величина  $\omega = V\pi/(S\epsilon)$ , определяемая средней скоростью движения корпуса робота  $V$  с длиной шага по следовой дорожке  $S$  и расписанием  $\epsilon$ .

При преобразовании (1) с учётом (2) и введённых выражения для  $H_0$  и  $\omega$  получается выражение для энергии, рассеиваемой за цикл колебаний в зависимости от расписания походки:

$$A = \frac{\pi^6 \mu \lambda^2 m^2 V^5 \epsilon}{M^2 S \left[ (\epsilon^2 S^2 k^2 - \pi^2 V^2)^2 + \frac{\mu^2}{M^2} V^2 \pi^2 S^2 \epsilon^2 \right]}. \quad (3)$$

Полученные результаты позволяют определять потери энергии в колебательной системе в зависимости от параметров робота (масса робота  $M$  и движителей  $m$ , кинематического параметра механизма шагания  $\lambda$ ), законов его движения (скорости  $V$  и длины шага  $S$ ), параметров колебательной системы грунт-опорный движитель-корпус робота (жёсткости грунта  $c$  и его вязкости  $\mu$ ), а также расписания походки  $\epsilon$ .

Возможно определить и резонансные скорости для каждого расписания конкретной походки

$$V_{\text{рез}} = \frac{S}{\pi \epsilon} \sqrt{\frac{c}{M}}. \quad (4)$$

**Анализ результатов.** По полученной зависимости (3) можно построить кривые, характеризующие потери энергии для робота с параметрами шагающего робота «Ортоног» на суглинистом грунте ( $m = 230$  кг,  $M = 1500$  кг,  $\mu = 250$  кг/с,  $c = 10000$  Н/м,  $\lambda = 0,25$  м,  $S = 0,5$  м) с одной и той же походкой (законами переноса движителей), но при различных расписаниях переноса  $\epsilon_1 = 1$  (походка «четвёрками»),  $\epsilon_2 = 0,5$  (походка «двойками»),  $\epsilon_3 = 0,25$  (походка с индивидуальным переносом движителей) (рис. 4).

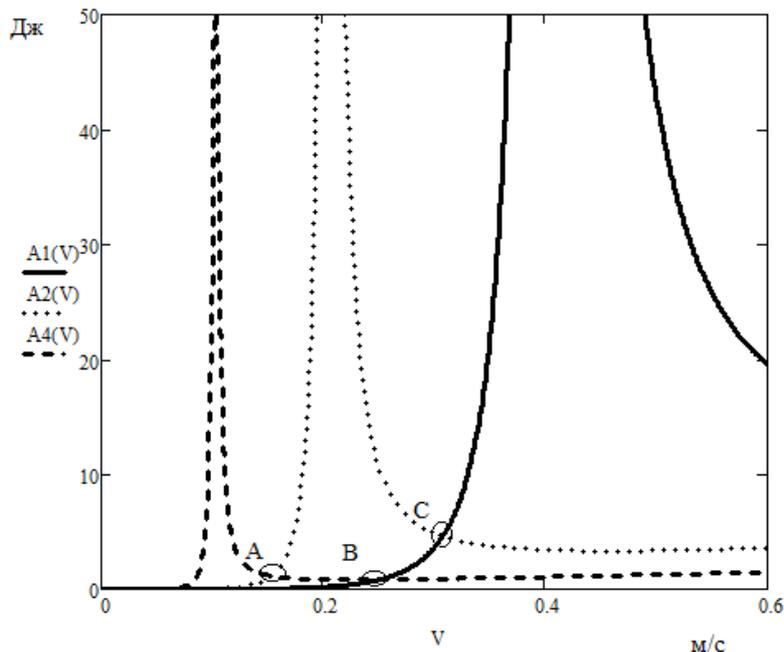


Рисунок 4 – Энергетическая эффективность различных расписаний походок

На графике энергетической эффективности различных расписаний походок видны резонансы, соответствующие скоростям, вычисленным по формуле (4), а также скорости, соответствующие энергетической эквивалентности для различных расписаний походок (точки А, В, С). Например, точка А соответствует энергетической эквивалентности походки «двойками» и походки с индивидуальным переносом движителей. Также из графика видно, что наиболее энергетически выгодной является походка «четвёрками» при скоростях от 0 до В, а при скоростях выше В наиболее выгодна походка с индивидуальным переносом движителей.

Полученные теоретические результаты подтверждаются и экспериментальными результатами, полученными на шагающей машине «Восьминог» со сдвоенными механизмами шагания, коэффициентом режима движителей 0,5 и кинематически задаваемыми законами переноса реализуемыми для всех движителей, когда из походки с индивидуальным переносом движителей на одних скоростях движения машина самопроизвольно через достаточно большое число циклов шагания переходила на походку «двойками», а на других скоростях – на походку «четвёрками» (рис. 5), при чём рис. 5а, соответствует режиму движения до первого резонанса, когда энергетически выгоднее сменить походку с индивидуальным переносом на походку «четвёрками», а рис. 5б соответствует промежутку скоростей сразу после первого резонанса, когда машина успела сменить походку с индивидуальным переносом на походку «двойками», но ещё не успела изменить походку до «четвёрок».

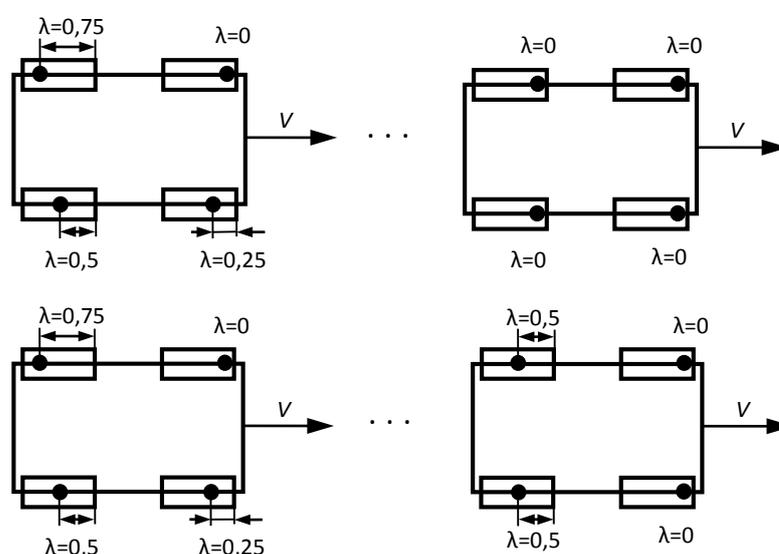


Рисунок 5 – Самосинхронизация движителей шагающей машины «Восьминог» а) дорезонансный режим, б) резонансный режим

**Выводы.** Получены условия для согласованного движения шагающих движителей при учёте явления самосинхронизации, обеспечивающие энергетически оптимальные с точки зрения минимума рассеиваемой механической энергии режимы движения (расписания походок шагающего робота). Эти результаты соответствуют выводам теории самосинхронизации И.И. Блехмана [9] и экспериментальными исследованиями движения шагающих роботов [13].

1. Охочимский, Д.Е. Энергетика движения шестиногого шагающего аппарата / Д.Е. Охочимский, А.К. Платонов, В.В. Лапшин // Известия РАН. Теория и системы управления. 1976. №5. - С. 42.
2. Брискин, Е.С. Сравнительный анализ колесных, гусеничных и шагающих машин / Е.С. Брискин, В.В. Чернышев, А.В. Малолетов, Н.Г. Шаронов // Робототехника и техническая кибернетика. 2013. № 1(1). - С. 6-14.
3. Six Link Mechanisms for the Legs of Walking Machines / Bessonov A.P., Umnov N.V., Korenovsky V.V. and other // Theory and Practice of Robots and Manipulators. ROMANSY 13: Proc. of the 13-th CISM-IFTToMM Symp., Zakopane, Poland, 2000. P.347-354.
4. Лапшин, В.В. Модельные оценки энергозатрат шагающего аппарата / В.В. Лапшин // Известия РАН, МТТ. № 1, 1993 - С. 65-74.
5. Лапшин, В.В. Об одном способе рекуперации энергии при движении шагающего аппарата / В.В. Лапшин, Д.Е. Охочимский, А.К. Платонов // Известия АН СССР, МТТ. № 5, 1986 – С. 67-71.

6. Гончаров, С.И. Анализ динамики периодической работы двигателей шагающих машин с целью увеличения их быстродействия / С.И. Гончаров // Дисс. канд. техн. наук. Ин-т машиноведения АН СССР. 1989.
7. Белецкий, В.В. Двухногая ходьба: модельные задачи динамики и управления. / В.В. Белецкий. - М.: Наука, 1984. - 288 с.
8. Брискин, Е.С. Об энергетически эффективных алгоритмах движения шагающих машин с цикловыми движителями / Е.С. Брискин, Я.В. Калинин // Известия РАН. Теория и системы управления. 2011. №2. - С. 170-176.
9. Блехман, И.И. Самосинхронизация в природе и технике / И.И. Блехман. - М.: Наука, 1981. - 352 с.
10. Брискин, Е.С. Об управлении движением шагающей машины со сдвоенными ортогонально-поворотными движителями / Е.С. Брискин, И.П. Вершинина, А.В. Малолетов, Н.Г. Шаронов // Известия РАН. Теория и системы управления. 2014. №3. - С. 168-176.
11. Охоцимский, Д.Е. Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата / Д.Е. Охоцимский, Ю.Ф. Голубев. - М.: Наука, 1984. - 312 с.
12. Брискин, Е.С. Тяговая динамика шагающих машин с ортогональными движителями / Е.С. Брискин, В.М. Соболев // Проблемы машиностроения и надёжности машин. 1990. №3. – С. 28-34.
13. Брискин, Е.С. Экспериментальные исследования многоопорной шагающей машины с движителями лямбдаобразного типа / Е.С. Брискин, В.В. Чернышев // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 1999. №4. – С. 32-37.

*V.S. Grishin*

### **SEMIREALISTIC SIMULATION APPLICATION TO DESIGN AND ANALYZE ROBOTICS SYSTEMS**

*SEC «Robotics» BMSTU, Moscow  
veekteam@gmail.com*

**Abstract**

Comparison between semirealistic, mathematical and full-scale simulations is made in short. Problems solved during the development of complex for semirealistic simulation of manipulating robotic systems are listed. Description of complex and its main part – universal educational and research stand for electrical drive load simulation – is given. Current and planning applications of complex for researching of mechatronic modules of robots are listed.

Keywords: Semirealistic simulation, manipulating robots designing, loading simulation, electrical drive

*В.С. Гришин*

### **ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУНАТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

*НУЦ «Робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва  
veekteam@gmail.com*

**Аннотация**

Проведено краткое сравнение полунатурного моделирования с математическими и натурными методами. Перечислены решенные в ходе разработки комплекса для полунатурного моделирования манипуляционных робототехнических систем задачи. Рассмотрено описание работы комплекса и его основной составляющей – универсального учебно-исследовательского стенда для имитации нагружения электродвигателей. Перечислены текущие и планируемые применения комплекса для исследования мехатронных модулей роботов.

Ключевые слова: Полунатурное моделирование, проектирование манипуляционных роботов, имитация нагружения, электродвигатель

**Введение.** Полунатурное моделирование – это вид исследования, при котором часть моделируемой системы заменяется реальными устройствами. То есть, полунатурное моделирование является промежуточным типом между математическим и физическим (натурным).

Такой тип исследования сочетает в себе достоинства математического и натурального моделирования, что позволяет использовать оба этих метода в необходимой комбинации для повышения точности анализа системы. При математическом моделировании сложных мехатронных устройств часто имеют место погрешности и допущения, связанные с численными способами решения уравнений, описывающих их поведение. Использование же натуральных устройств гарантирует нам отсутствие таких пренебрежений при исследовании. Кроме того, наличие натуральных устройств придает работе системы наглядность и простоту оценки правильности поведения системы и лишает необходимости проектировать макет всего разрабатываемого устройства для исследования.

Предлагается использовать полунатурное моделирование для анализа работы манипуляционных робототехнических систем на промежуточном этапе проектирования, когда приводная часть робота подобрана (проведен энергетический расчет приводов, выбраны редукторы и известны особенности данных комплектующих), известна кинематическая схема манипулятора, его массо-инерционные характеристики и типовые режимы работы.

**Постановка задачи.** Была поставлена задача проектирования программно-аппаратного комплекса, с помощью которого можно моделировать поведение манипуляционных робототехнических систем при наличии реальных приводов и в отсутствии звеньев манипулятора. То есть, влияние массо-инерционных характеристик звеньев на приводы моделируется математически, в то время как сами приводы представлены в натуре.

Такая система может стать базой для тестирования робототехнических систем на этапе, когда сама система еще не создана. Это может помочь проанализировать проектируемую систему при работе в различных условиях, при разных внешних воздействиях и при необходимости учесть влияние специфических факторов. Причем, так как будет проводиться анализ работы реально существующих приводов, данные такого моделирования будут более приближенными к реальности, чем при математическом моделировании всей системы.

На основании вышесказанного были поставлены следующие задачи, которые были решены при разработке комплекса:

1. Комплекс для полунатурного моделирования манипуляционных робототехнических систем должен состоять из двух основных частей: аппаратной, представленной в виде электроприводов с системой имитации нагружения, и системы управления, представленной в виде программы или приложения, для управления комплексом и сбора информации о состоянии его составляющих;

2. Задача аппаратной части комплекса – воспроизводить заданное нагружение на электропривод, причем данная система нагружения должна давать возможность оперативно изменять параметры нагрузки в процессе работы комплекса;

3. В задачи управляющей программы (или приложения) входит управление исследуемыми электроприводами, а также сбор и вывод информации о текущем состоянии системы. Но основное, именно в программной части комплекса производится расчет движения манипулятора под действием внешних сил, с учетом динамического взаимовлияния звеньев и при различных свойствах рабочего пространства.

После анализа поставленных задач и рассмотрения аналогов среди систем полунатурного моделирования была разработана структурная схема комплекса, показанная на рисунке 1.

**Система нагружения электродвигателя.** Одной из важных задач при разработке комплекса для полунатурного моделирования робототехнических систем является проектирование системы нагружения электродвигателя. Из-за необходимости оперативно изменять условия нагружения каждого привода было принято решение спроектировать универсальный учебно-исследовательский стенд для имитации нагружения электродвигателя [1, 2] на основе комплектующих фирмы maxon motor ag [3] с возможностью управления с персонального компьютера.

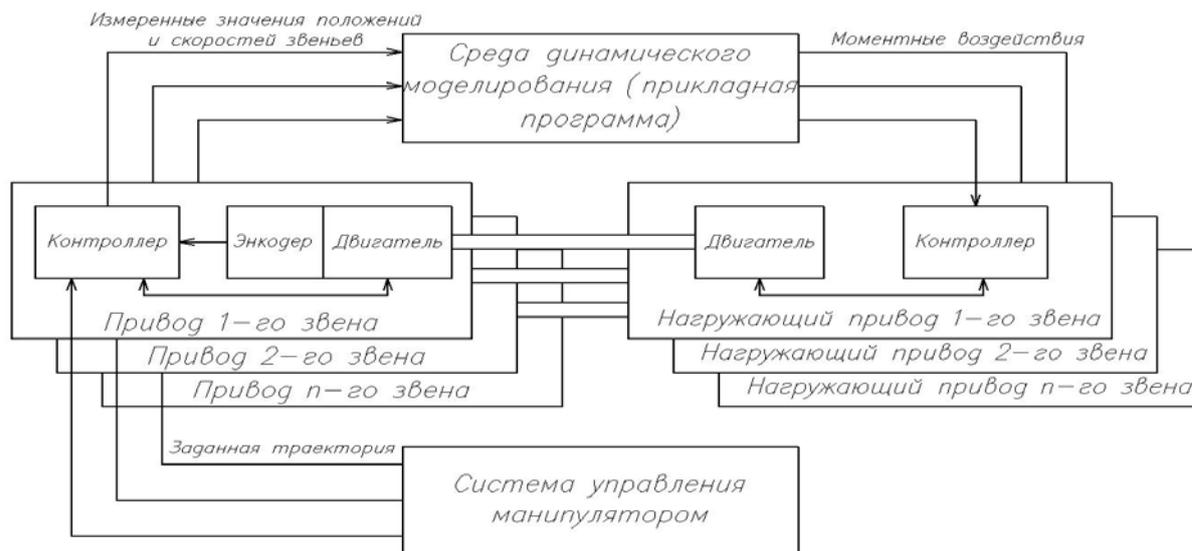


Рисунок 1 – Структурная схема комплекса для полунатурного моделирования манипуляционных роботов

Общая идея такого стенда заключается в механическом скреплении двух валов электродвигателей упругой муфтой (рисунок 2). Один из этих двигателей – испытуемый. Его поведение которого в составе манипулятора в предполагается исследовать. Назначение другого двигателя – нагружающего – воспроизводить такой момент, который был бы равен моменту нагружения от моделируемой механической оснастки. Таким образом, получается устройство, предоставляющее возможность моделировать широкий спектр различных типов нагружения на электродвигатель.

Подобные системы широко используются в качестве лабораторных стендов. В основном, их применение ограничивается экспериментальным построением механических характеристик электродвигателей [4, 5].

В [1] подробно описан принцип работы и особенности данного стенда, а также приведены результаты его работы. Каждый стенд управляется с одного персонального компьютера по USB с помощью разработанного управляющего приложения. Реализованы следующие типы нагружений и особенностей механической передачи (рисунок 3):

1. Дополнительный момент инерции (маховик);
2. Вязкое трение (демпфер);
3. Шарнирный момент (пружина);
4. Внешний момент;
5. Упругость механических передач;
6. Люфт механических передач;
7. Передаточное число редуктора (идеальный редуктор).

Перечисленные факторы выбраны в силу того, что они всегда присутствуют в реальных устройствах и механических передачах. Например, в большинстве редукторов существует люфт, предотвращающий заклинивание зубчатых передач.

Следует заметить, что при сравнении имитации нагружения с помощью стенда и с применением только математического моделирования в MatLAB Simulink [6] была выявлена погрешность, не превышающая 10%, что говорит о достоверности результатов полунатурного моделирования нагружения электродвигателя.



Рисунок 2 – Внешний вид универсального учебно-исследовательского стенда для имитации нагружения электродвигателя

**Программно-аппаратный комплекс для полунатурного моделирования манипуляционных робототехнических систем.** После разработки и тестирования системы нагружения электропривода можно перейти к имитации его использования в составе манипуляционного робота.

Для создания взаимодействия между стендами была организована сеть, в которой все персональные компьютеры подключены к одному маршрутизатору. К каждому ПК, в свою очередь, по USB подключен стенд. Управляющее приложение позволяет с одного из компьютеров подключиться к любому другому, на котором запущено приложение. Это позволяет управлять необходимым для моделирования манипуляционного механизма количеством стендов.

Чаще всего при моделировании манипуляционных роботов не учитываются особенности механических передач. Однако, использование универсального учебно-исследовательского стенда предоставляет возможность имитировать влияние перечисленных выше факторов.

Кроме того, на этом этапе разработки встал вопрос о необходимости введения в систему управления стендом масштабирования двигателя по мощности из-за того, что в наличии есть только 6 стендов с одинаковыми двигателями, в то время как в реальных манипуляторах в разных степенях подвижности должны использоваться отличные по мощности двигатели.

Таким образом, звено манипулятора приводится в движение не самим валом электродвигателя, а валом нагрузки (рисунок 3). Для иллюстрации этой особенности приведена схема, показанная на рисунке 4.

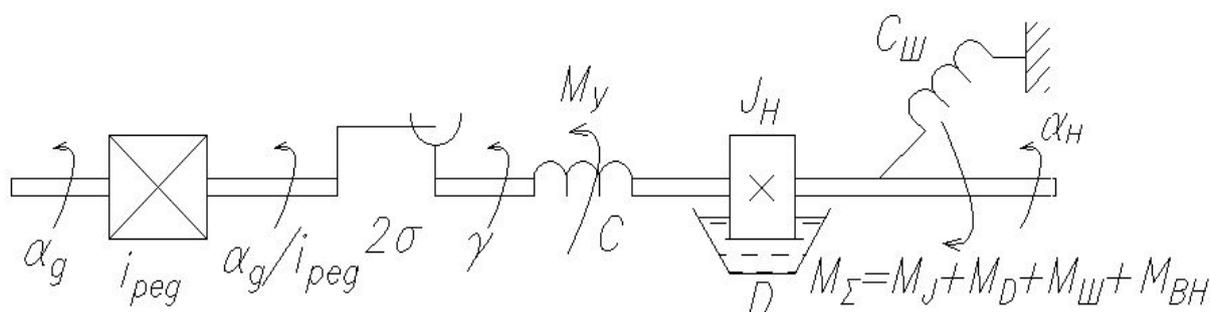


Рисунок 3 – Функциональная схема нагружения электродвигателя

При работе манипуляционного механизма на его приводы действуют силы и моменты взаимовлияния. Поэтому в схеме, представленной на рисунке 4 влияние звена на привод можно заменить моментом взаимовлияния  $M_{ВВ.i}$ .

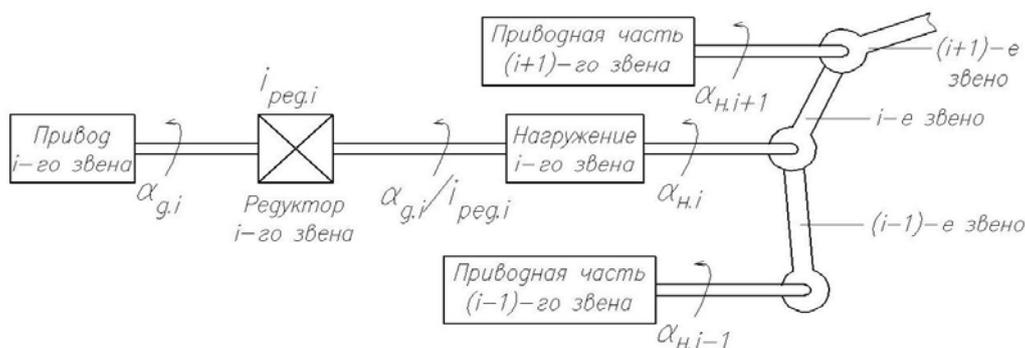


Рисунок 4 – Схема передачи движения от привода к звену манипулятора

Соответственно, для моделирования поведения механизма необходимо рассчитывать этот момент и добавлять его к моменту, действующему на испытуемый привод со стороны нагружающего.

В рамках разработки комплекса спектр моделируемых манипуляционных роботов был ограничен:

1. Рассматривается механизм, совершающий движение в одной плоскости;
2. Основание манипулятора неподвижно;
3. Все звенья манипулятора представляются в виде однородных стержней;
4. Все сочленения манипулятора – вращательные с осью вращения, перпендикулярной плоскости движения механизма;
5. Максимальное количество звеньев – 6;
6. Центр тяжести звеньев совпадает с их геометрическим центром;
7. Массо-инерционные характеристики звена включают в себя его собственную массу, а также массу нагрузки, приложенную к концу звена.

Для описания динамики движения робота используется уравнение движения манипулятора в форме Лагранжа-Эйлера [7]:

$$A(\bar{\alpha}_n) \bar{\varepsilon}_n + B(\bar{\alpha}_n, \bar{\omega}_n) + C(\bar{\alpha}_n) = \bar{M}_{BB},$$

где  $\bar{\alpha}_n$ ,  $\bar{\omega}_n$  и  $\bar{\varepsilon}_n$  – векторы соответственно положений, скоростей и ускорений звеньев манипулятора;

$A(\bar{\alpha}_n)$  – матрица инерции манипулятора;

$B(\bar{\alpha}_n, \bar{\omega}_n)$  – вектор кориолисовых и центробежных сил;

$C(\bar{\alpha}_n)$  – вектор гравитационных сил.

Как видно, использование данного уравнения для расчета моментов взаимовлияния влечет за собой численное определение ускорения вала нагрузки и, как следствие, неточные значения элементов вектора ускорений звеньев манипулятора. Однако, влияние этого негативного эффекта снижено за счет возможности учесть редуктор (так как в стенде редукторов нет) и отмасштабировать электродвигатели по мощности. В дальнейшем будет проводиться сравнение различных методов расчета динамики механизма для повышения точности моделирования и ускорения расчетов.

Необходимо добавить, что разработанная система для полунатурного моделирования позволяет отслеживать поведение исследуемого манипулятора в реальном времени. То есть, при проведении эксперимента пользователь может наблюдать за движением механизма и оперативно исправить условия опыта, если результаты его не удовлетворяют.

**Выводы.** Разработка системы для полунатурного моделирования манипуляционных робототехнических систем представляется важной задачей в рамках исследования работы данного типа роботов на различных этапах проектирования. Как говорилось выше, такие системы дают более точное и наглядное представление о поведении разрабатываемого механизма, чем математическое моделирование. Помимо этого, в такой системе гораздо проще создать для проектируемого робота условия работы, отличные от лабораторных (например, невесомость), так как есть возможность запрограммировать широкий спектр законов нагружения на исследуемые двигатели.

Отдельно стенд для имитации нагружения электродвигателя применялся для исследования работы приводов робота для покраски внутритрубных поверхностей, что позволило разработчику на основе результатов экспериментов подобрать двигатели и редукторы.

Описанный комплекс может быть в будущем предназначен не только для имитации поведения манипуляционных механизмов, но и для любых мехатронных систем (например, для моделирования работы колесных приводов мобильных роботов). Сейчас ведется работа, направленная на отладку и увеличение точности работы комплекса для полунатурного моделирования, причем как в аппаратной, так и в программной частях. Например, рассматривается применение мастер-контроллеров для имитации нагружения, что позволит уменьшить задержку работы всей системы в целом.

Сейчас комплекс в основном используется в качестве лаборатории для изучения работы электроприводов школьниками, студентами и инженерами из промышленности с активным применением стендов для имитации нагружения электродвигателей.

1. Гришин В.С., Орлов М.Ю., Польский В.А. Универсальный учебно-исследовательский стенд для имитации нагружения электроприводов // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. Электрон. журн. 2016. № 2. DOI: 10.7463/aplts.0216.0838843.
2. Ванин А.В., Польский В.А. Универсальный исследовательский стенд для испытаний электромеханических модулей манипуляционных роботов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана Сер. «Приборостроение», 2012. С. 136–147.
3. maxon motor ag. Официальный сайт. Режим доступа: <http://www.maxonmotor.com/>.
4. Лиходедов А.Д. Построение механической характеристики асинхронного двигателя и ее апробация // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 5.
5. Кафедра ФН7 «Электротехника и промышленная электроника». Режим доступа: <http://hoster.bmstu.ru/~fn7/index.html>.
6. The MathWorks Inc. Официальный сайт. Режим доступа: <http://www.mathworks.com/>
7. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Основы управления манипуляционными роботами: Учебник для вузов. – 2-е изд., исправ. и доп. Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 480 с

*N.A. Pavluk*

## **MODELING BEARING SUPPORT STRUCTURE PELVIC MECHANISM ANTHROPOMORPHIC ROBOT ANTARES<sup>IX</sup>**

*St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences, St. Petersburg  
antei.hasgard@gmail.com*

### **Abstract**

The problem of designing the bearing supporting structure of the pelvic mechanism for anthropomorphic robots is considered, an overview of the existing design solutions of mechanical assemblies anthropomorphic robots with the analysis of actuators and structural parts taking most of the load during the movement of the robot is provided. A variant of design of the pelvic mechanism for the developed robot Antares is proposed. The bearing support structure includes elastic elements that reduce impacts to the mechanical components of the robot.

Keywords: Anthropomorphic robots; servomechanisms; Antares; pelvic mechanism; flange support; elastic coupling.

*Н.А. Павлюк*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПОРНОЙ КОНСТРУКЦИИ ТАЗОВОГО МЕХАНИЗМА АНТРОПОМОРФНОГО РОБОТА АНТАРЕС<sup>8</sup>**

*Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук,  
Санкт-Петербург, antei.hasgard@gmail.com*

### **Аннотация**

Рассматривается задача проектирования опорной конструкции тазового механизма для антропоморфных роботов, приводится обзор существующих конструктивных решений механических узлов антропоморфных роботов с анализом сервоприводов и несущих деталей, принимающих основную нагрузку во время движения робота. Предложен вариант конструкции тазового механизма для разрабатываемого робота Антарес. Опорная конструкция включает в себя упругие элементы, снижающие ударные воздействия на механические узлы робота.

Ключевые слова: Антропоморфные роботы; сервоприводы; Антарес; тазовый механизм; фланцевая опора; упругая муфта.

### **Введение**

Повышение устойчивости и опорной проходимости мобильных роботов является одной из основных задач разработчиков аппаратного и программного обеспечения антропоморфных роботов. Тазовый механизм представляет собой наиболее сложный узел, подвергающийся повышенным нагрузкам. Степень деформации и скорость износа механических узлов конструкции можно снизить за счет увеличения площади опоры, рассеивания и снижения динамических нагрузок. Несмотря на то, что рычажно-шарнирная система, спроектированная по аналогии с тазовым поясом человека, представляется наиболее целесообразной при конструировании антропоморфного робота, повторить ее в исходном виде практически невозможно, в виду сложности ее строения.

Одним из важных моментов при разработке конструкции робота является обеспечение долгосрочной работы несущего каркаса, сервоприводов и узловых элементов робота. В малогабаритных антропоморфных роботах все узлы соединяются напрямую, корпус каждого сервопривода является частью несущей конструкции, потому что вероятность получения критических повреждений от перегрузки или большого веса крайне мала. При разработке антропоморфного робота Антарес [1] данный подход неприменим, так как расчетные нагрузки на конструкцию достаточно велики.

### **Обзор существующих антропоморфных роботов**

В работах [2] описывается антропоморфный робот Lola, имеющий конструкцию ног с 7 степенями свободы, весит 55 кг при росте 180 см. Обсуждается проблема устойчивости робота после остановки, а также поэтапное соприкосновения частей ступни с поверхностью во время ходьбы. Эластичные материалы носка и каблука ступни робота обеспечивают снижение силы удара на конструкцию робота

при касании поверхности. Основные опорные конструкции робота для облегчения веса отлиты из алюминия, детали разработаны путем оптимизации топологии конструктивных решений. Робот разрабатывается Техническим Университетом Мюнхена.

В работе [3] рассматривается движение гуманоидного робота по лестничным маршам, что требует большей длины шага, дополнительных нагрузок при вертикальном перемещении, что в целом сказывается на сложности динамической стабилизации робота, конструкции таза и системы управления движением.

В работе [4] на основе анализа походки человека предложена модель ноги в виде вертикально сжимающейся пружины и модель сустава в виде пружины кручения. Также замечено, что движение таза во фронтальной плоскости способствует увеличению силы прыжков. Разработанная конструкция состоит из таза и ног с вращательными суставами. Используемые две листовые пружины в механизме регулировки жесткости ноги обеспечили возможность скачкообразного изменения резонанса тазового движения и эластичности суставов при прыжке. В последующей работе авторов [5] проводится моделирование человекоподобного движения таза робота, где нижние конечности представлены в виде подпружиненных перевернутых маятников. Предложенная модель конструкции SLIP2 экспериментально подтвердила возможность вертикального прыжка робота и способность поглощения удара на конструкцию при приземлении обратно на поверхность.

В работе [6] при создании медицинского робота-экзоскелета для помощи передвижения инвалидов-опорников был проведен анализ движения тазового механизма при ходьбе и выявлено, что конструкция таза с шестью степенями свободы сможет обеспечить свободное перемещение и балансировку. Эксперименты проводились при различных длинах шага, отклонениях в левую и правую сторону, разных скоростях. При балансировке робота следует учитывать вращение таза и перенос веса в одной ноги на другую в процессе ходьбы.

### **Разработка опорного узла тазового механизма антропоморфного робота Антарес**

Так как робот Антарес является человекоподобным по своей конструкции, антропоморфным двуногим шагающим роботом [7], тазовый механизм, осуществляющий осевое и сагиттальное движение педипуляторов, является одним из важнейших узловых элементов в кинематике, динамике и физической структуре робота. Через данный узел проходит большая часть ударных нагрузок, приходящихся на каркас робота во время движения даже по ровным поверхностям. Конструкция робота Антарес предусматривает не только движение по ровной и пересеченной местности, но и в определенной степени допускает прыжки робота на месте за счет работы механизмов ног. Это означает, что при заданных массогабаритных параметрах робота нельзя использовать базовый корпус сервоприводов как часть несущей конструкции, а осевое вращение педипуляторов напрямую валом двигателя быстро приводит к поломке редуктора сервопривода. Наличие или отсутствие корпуса сервопривода в конструкции робота влияет только на количество деталей и удобство сборки, которые могут отличаться от механизма к механизму даже в одной системе, однако осевое вращение ног необходимо антропоморфному роботу для передвижения, будь то статическая или динамическая походка.

Первая версия тазового механизма робота представляла собой зубчатую передачу с передаточным отношением 1:1 и ведущий вал, что приводило к снижению КПД осевого сервопривода, но давало защиту двигателю от различных ударных нагрузок при передвижении прототипа. Однако механизм оказался массивен, не удобен и не надежен в работе и обслуживании, малая площадь опоры ведущего вала приводила к тому, что соединение требовало постоянной регулировки, без которой быстро выходило из строя и приводило к сбоям при движении. С учетом недостатков первой версии конструкции был сформирован ряд основных требований, которым должен соответствовать тазовый механизм и его узлы:

- тазовый механизм должен давать большую, чем у первой версии, площадь опоры,
  - механизм должен позволять внутреннюю прокладку проводки для сети питания и управления педипуляторами робота,
- механизм передачи осевого вращения должен снижать ударные нагрузки на осевой сервопривод,
  - узловые элементы механизма должны быть удобны в обслуживании и просты в сборке, не массивны,
  - принцип работы конструкции должен позволять применение как шариковых, так и игольчатых подшипников,
  - конструкция опоры должна позволять несколько вариантов сборки механизма с частичной заменой деталей при необходимости.

В соответствии с этими требованиями для робота Антарес был разработан узловой элемент сборной фланцеобразной опоры с упругой муфтой. В представленном решении упругая муфта состоит из двух полумуфт, одна из которых устанавливается на фланец приводящего в движение сервопривода, вторая полумуфта монтируется на верхней фланцевой опоре. Полумуфты соединяются эластичным венцом, обеспечивающим взаимное зацепление при сборке и установке в рабочее положение. Муфта разработана с учетом возможности пропуска через узел сети питания и управления механизмом, который предполагается устанавливать на фланец опоры. Прототипом решения послужила кулачковая муфта, описанная в ГОСТ Р 50894-96. Такой механизм может передавать значительный крутящий момент, будучи при этом компактным, обладая малым весом и низким моментом инерции. Основанием фланцеобразной опоры с упругой муфтой является фланцевая опора, для простоты изготовления собираемая из двух пластин, имеющих установочную площадку для подшипников, отличающуюся шириной в зависимости от типа устанавливаемого подшипника. В зависимости от выбранного варианта сборки верхняя и нижняя фланцевые опоры соединяются таким образом, чтобы зажимать корпусные пластины, на которые опираются подшипники, или наоборот. В данной статье рассматривается обратный вариант сборки, когда пластины корпуса зажимают опоры как кассета. На рисунке 1 представлена общая схема сборки фланцевой опоры и упругой муфты.

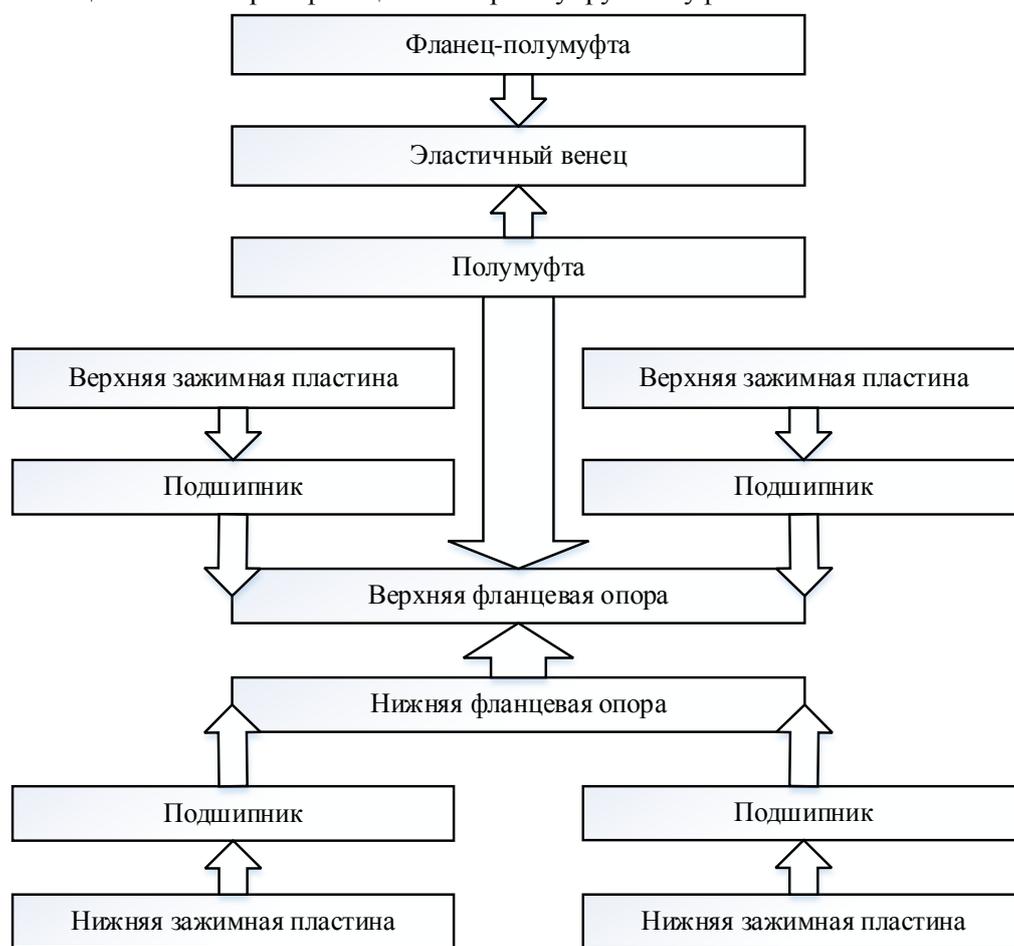


Рисунок 1 – Схема сборки фланцевой опоры с упругой муфтой

Разработанный узловой механизм (рис. 2а, б) имеет значительно большую площадь опоры по сравнению с первой версией прототипа и имеет в своей конструкции элементы, поглощающие и рассеивающие ударные нагрузки, которые могли бы повредить сервоприводу робота во время движения. В текущей версии прототипа нового узла используются осевые роликовые упорные подшипники, изготавливаемые из подшипниковой стали ШХ-15, соответствующей ГОСТ 801-78. Применяемые подшипники рассчитаны на статическую нагрузку в 80 кН и 17 кН динамической нагрузки при максимально допустимом количестве оборотов 6 тысяч в минуту. При изготовлении полумуфт, корпусных пластин и опор использовался алюминиевый сплав Д16, ГОСТ 4784-97, обладающий достаточным пределом текучести, чтобы выдерживать переменные циклические нагрузки на узел. Суммарная площадь контактных точек опоры разработанного узла составляет 31,1 см<sup>2</sup>, что

значительно превышает общую площадь опоры первой версии тазового механизма, состоявшей из фланца, закрепленного на валу шпонкой и суммарно дающей  $1,48 \text{ см}^2$ , на которые и приходились все нагрузки при работе тазового механизма. Это приводило к быстрому износу деталей механизма, увеличению люфтов в месте установки педипуляторов и необходимости постоянной регулировки. В конструкции нового узла нет технологически сложных в изготовлении деталей, рассчитанные на износ детали можно изготовить с помощью технологий трехмерной печати, что упрощает обслуживание при эксплуатации и доработке конструкции робота, а также сводит к минимуму дополнительные регулировки механизма в ходе работы. Концепт фланца-полумуфты позволяет устанавливать его не только на фланцы сервоприводов, но и устанавливать его на любую подходящую шестерню, что дает возможность в случае необходимости включить фланцевую опору с упругой муфтой в редуктор, мультипликатор или любую другую механическую передачу, имеющую стандартные крепления для фланцевых соединений [8]. На рисунке 2 показана модель прототипа разработанного конструктивного решения фланцевой опоры с упругой муфтой.



Рисунок 2 – а) фланцевая опора с упругой муфтой; б) фланцевая опора без упругой муфты

С помощью симуляции в системе твердотельного моделирования [9] было проведено исследование модели на усталость при прохождении 1000 циклов, с прикладываемой нагрузкой в  $100 \text{ кг/см}^2$ , для проверки потенциального протекания процесса постепенного накопления повреждений под действием переменных и циклических напряжений, приводящих к изменению свойств материалов, использованных в конструкции узла, образованию в пластинах металла трещин, со временем развивающихся и приводящих к разрушению отдельных элементов конструкции [10]. На рисунке 3 показано, что при прохождении 1000 циклов переменной нагрузки наибольшей усталости подвержен прототип упругой муфты, получившая наибольшие, 3,33 процента, повреждения.

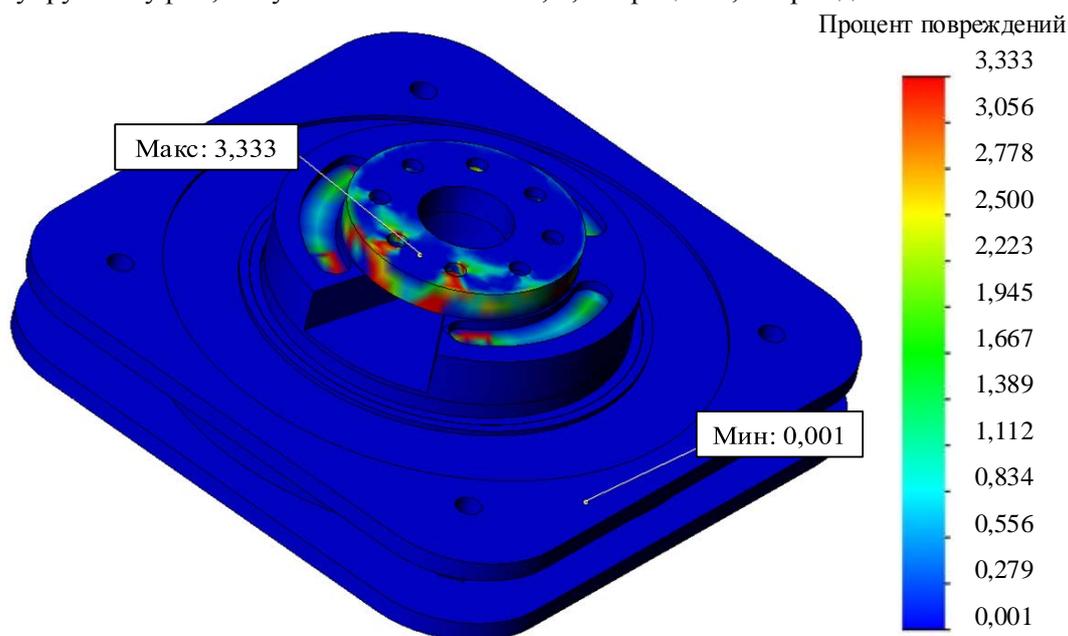


Рисунок 3 – Усталостные повреждения узла при прохождении 1000 циклов переменной нагрузки

Это вызвано тем, что конструкция упругой муфты должна позволять вертикальную и горизонтальную прокладку проводной сети, что усложняет оптимизацию структуры узла. В дальнейшем будет проведена оптимизация узла для большего соответствия нормативам ГОСТ для механических конструкций. По результатам симуляции был предварительно определен средний срок службы разработанной фланцевой опоры с упругой муфтой, составивший примерно 8 миллионов циклов переменной нагрузки, при этом срок службы деталей, рассчитанных на запланированный износ составил 30 тысяч циклов.

### **Заключение**

Новая конструкция узла тазового механизма робота имеет площадь опоры в 21 раз больше, чем у предыдущего передаточного механизма. Конструкция фланцевой опоры увеличивает срок работы деталей за счет более эффективного распределения нагрузки по площади опоры и отсутствия в конструкции сложных в изготовлении и имеющих малый срок работы деталей, таких как шестерни. Исследования разработанного механизма показали, что основные детали имеют большой срок службы и наиболее быстрой усталости материала подвержены детали, спроектированные как расходный материал, при этом они также способны выдержать большое количество циклов переменной и циклической нагрузки во время эксплуатации. Рассматривается возможность применения результатов разработки при построении модели управления экзоскелетом [11]. Также возможно применение результатов исследования при построении различных реабилитационных систем, экзоскелетов и ортезов [12], а также спасательных робототехнических система [13]. Для управления механическими узлами робота используются сервоприводы Dynamixel с необходимыми силовыми характеристиками, а также ведется разработка собственных контроллеров и электромеханических узлов для увеличения возможностей робота Антарес. В дальнейшем будет проведена доработка узла с учетом результатов проведения симуляций и собранного прототипа, будут доработаны фланцевые опоры, места установки подшипников и полумуфты, в целях получения большей универсальности и расширения возможностей применения в робототехнических системах и различных механических устройствах.

1. Павлюк Н.А., Будков В.Ю., Бизин М.М., Ронжин А.Л. Разработка конструкции узла ноги антропоморфного робота Антарес на основе двухмоторного колена // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 1 (174). С. 227-239.
2. Buschmann T., Lohmeier S., Ulbrich H. Humanoid Robot Lola: Design and Walking Control // Journal of Physiology, 103 (2009). P. 141-148.
3. Kim J., Park I., Oh J. Realization of Dynamic Stair Climbing for Biped Humanoid Robot Using Force/Torque Sensors // Journal of Intelligent and Robotic Systems. 2009. Volume 56. №4. P. 389-423.
4. Otani T. et al. (2014) Hopping Robot Using Pelvic Movement and Leg Elasticity. In: Ceccarelli M., Glazunov V. (eds) Advances on Theory and Practice of Robots and Manipulators. Mechanisms and Machine Science, vol 22. Springer, Cham
5. Otani T., Hashimoto K., Yahara M., Miyamae S., Isomichi T., Hanawa T., Sakaguchi M., Kawakami Y., Lim H., Takanishi A. Utilization of human-like pelvic rotation for running robot // Frontiers in Robotics AI, 2015. 08 July. Volume 2. Article 17.
6. Olensek A., Zdravec M., Matjacic Z. A novel robot for imposing perturbations during overground walking: mechanism, control and normative stepping responses // Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation. 2016. 11 June. DOI: 10.1186/s12984-016-0160-7
7. Pavluk, N., Denisov, A., Kodyakov, A., Ronzhin, A.: Mechanical Engineering of Leg Joints of Anthropomorphic Robot // International Conference on Power, Energy and Mechanical Engineering 2016, MATEC Web of Conferences, 77, art. no. 04006.
8. Шаныгин С.В. Разработка механической модели двуногого шагающего робота // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2012. № 4. С. 72-74.
9. Карпенко А.П. Робототехника и системы автоматизированного проектирования. Учебное пособие. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.
10. Петухов А.Н. Проблемы многоциклового усталости конструкционных материалов и деталей ГТД // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета), 2012. С. 17-25.
11. Ворочаева Л.Ю., Яцун А.С., Яцун С.Ф. Управление квазистатической ходьбой экзоскелета на основе экспертной системы // Труды СПИИРАН. 2017. Вып. 52. С. 70-94.
12. Low K.H. Subject-oriented overground walking pattern generation on a rehabilitation robot based on foot and pelvic trajectories // Procedia IUTAM. 2011. Volume 2. P. 109-127

13. Мотиенко А.И., Ронжин А.Л., Павлюк Н.А. Современные разработки аварийно-спасательных роботов: возможности и принципы их применения // Научный вестник НГТУ. 2015. Том 60. №3. С. 147–165.

*O.Yu. Osipov, R.V. Mesheryakov, M.G. Shepelenko*

**DESIGNING DIGITAL MODELS OF ELEMENTS OF THE ELECTROMACHINE PART OF ELECTROMECHATRONIC MODULES OF ROBOTIC SYSTEM**

*FGBU VO "TUSUR", Tomsk city  
e-mail: [ems2009@mail.ru](mailto:ems2009@mail.ru), [ems2009tomsk@gmail.com](mailto:ems2009tomsk@gmail.com)*

**Abstract**

Completed research project "Development of a technique of the automated calculation of the prototype product range elektromehatronnyh motion modules manufacturer" The article discussed the design of digital models of the elements of the motor-machine modules elektromehatronnyh movement of robotic systems, which allows: to increase design productivity elektromehatronnyh components manipulators robotic and mechatronic systems. The software allows: 2D / 3D-modeling of electric machine parts; elektromehatronnyh calculation and electrical elements and visualization of electric machine parts; automatic acquisition of design documentation, drawn up by ESKD; reduce the cost of designing robotic manipulators elektromehatronnyh components and mechatronic systems in accordance with the target criterion of "price-quality."

Keywords: digital model of the elements of the rotating part electromechatronic modules motion

*О.Ю. Осипов, Р.В. Мещеряков, М.Г. Шепеленко*

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОМАШИНОЙ ЧАСТИ ЭЛЕКТРОМЕХАТРОННЫХ МОДУЛЕЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

*ФГБУ ВО «ТУСУР» г. Томск  
e-mail: [ems2009@mail.ru](mailto:ems2009@mail.ru), [ems2009tomsk@gmail.com](mailto:ems2009tomsk@gmail.com)*

**Аннотация**

Выполнена НИР «Разработка методики автоматизированного расчета ассортиментного ряда электромехатронных модулей движения с изготовлением опытного образца» В статье рассмотрено проектирование цифровых моделей элементов электромашинной части электромехатронных модулей движения робототехнических систем, позволяющей: повысить производительность проектирования электромехатронных компонентов манипуляторов робототехнических и мехатронных систем. Программное обеспечение позволяет обеспечить: 2D/3D-моделирование электромашинной части; расчет электромехатронных и электрических элементов и визуализацию электромашинной части; автоматическое получение конструкторской документации, оформленной по ЕСКД; снизить стоимость проектирования электромехатронных компонентов манипуляторов робототехнических и мехатронных систем в соответствии с целевым критерием «цена-качество».

Ключевые слова: цифровая модель элементов электромашинной части электромехатронных модулей движения

**Введение.** На протяжении десятилетий в России было создано множество методов расчета и анализа специальных электрических машин. Многие ученые внесли значительный вклад в создание и развитие этих методов: А.В. Иванов-Смоленский создал методы анализа электромагнитных сил и расчета электрических машин на основе метода проводимостей зубцовых контуров; И.П. Копылов значительно углубил методологию математического моделирования на основе аппарата обобщенной электрической машины; Т.Г. Сорокер и Б.И. Кузнецов обобщили теорию разработки САПР, В.А. Балагуров, А.И. Бертинов, Ф.Ф. Галтеев, А.А. Дубенский, А.Н. Ларионов, И.Е. Овчинников и др. внесли значительный вклад в развитие теории и методов расчета электрических машин с постоянными магнитами; В.В. Жуловян, Д.Л. Калужский и А.Ф. Шевченко исследовали электрические машины с дискретно-распределёнными обмотками.

Созданные в 1950–1980 гг. расчетные методы и подсистемы САПР электрических машин обладали достаточной для того времени точностью и позволили создать целую гамму уникальных электрических машин общего и специального назначения.

Аналогичная техника в настоящее время — в большинстве это электромехатронные модули и системы движения автоматических систем электромеханического преобразования энергии, создаваемых путем функционального и конструктивного объединения электромеханических преобразователей (специальных электрических машин) с электронными компонентами [1].

Современные исследования создания электромашинных частей (ЭМЧ) электромехатронных модулей движения (ЭМД) робототехнических систем с сегментным индуктором (индукторами) с трехфазными катушечными обмотками и с ротором с постоянными магнитами показали, что разработать ЭМЧ ассортиментного ряда ЭМД качественно, быстро и с минимумом трудозатрат возможно, если процесс разработки автоматизировать. Возникла задача разработки современных методик автоматизированного расчета, так как основное требование в модернизации промышленности и импортозамещении — ускоренное проектирование робототехнических и мехатронных систем для изделий различного назначения.

Основное требование, предъявляемое к результатам разработок ЭМД — получение характеристик движений робототехнического средства (РТС), приближенных к естественным движениям человека и обеспечивающих интегральное движение каждого элемента РТС от эластичных, ползучих скоростей до резких и быстрых движений, адаптированных к текущему событию, с освоением точных и сложных операций.

Исследования научно-технического коллектива НИЛ МЭ показали, что основной и трудозатратой частью разработки являются расчеты электромашинной части ЭМД, что обусловило создание настоящей методики автоматизированного расчета электромашинной части с катушечными обмотками и с возбуждением от постоянных магнитов для электромехатронных модулей движения для изделий различного назначения.

В статье рассмотрено проектирование цифровых моделей элементов электромашинной части электромехатронных модулей движения робототехнических систем, позволяющей повысить производительность проектирования электромехатронных компонентов манипуляторов робототехнических и мехатронных систем. Программное обеспечение позволяет обеспечить:

2D/3D-моделирование электромашинной части;

расчет электромехатронных и электрических элементов и визуализацию электромашинной части;

автоматическое получение конструкторской документации, оформленной по ЕСКД;

снизить стоимость проектирования электромехатронных компонентов манипуляторов робототехнических и мехатронных систем в соответствии с целевым критерием «цена-качество».

**Основная часть.** Для проектирования цифровых моделей элементов электромашинной части электромехатронных модулей робототехнических систем создана подсистема автоматизации расчета на основе *Autodesk Inventor Professional 2010/2011/2012/2013/2014* [2]. Для работы *MyInventorPlug-in.exe* на компьютере должно быть установлено следующее программное обеспечение.

1. Операционная система Windows XP/7/8/10

2. Autodesk Inventor Professional 2010/2011/2012/2013/2014

Работа с программой начинается с запуска файла программы *MyInventorPlug-in.exe*. При старте программы на экран выводится основное окно программы (рис.1).

Для генерации деталей и сборок ассортиментного ряда электромашинной части электромехатронного модуля движения пользователь может сначала выбрать ряд параметров, по которым будет производиться генерация. Для этого в поле «Размер магнита» из выпадающего списка нужно выбрать одно из значений размера для магнита: 25 или 50. Далее в поле «Тип двигателя» из выпадающего списка можно выбрать соответствующий тип двигателя. При этом программа автоматически установит необходимые геометрические параметры, соответствующие выбранному типу. Далее в поле «Количество отверстий под крепления ротора» из выпадающего списка можно выбрать необходимое количество креплений. В поле «Количество индукторов» из выпадающего списка выбирается нужное количество индукторов. Все поля заполнены значениями по умолчанию, и, если пользователь ничего не выбрал или выбрал не все значения, то в качестве оставшихся значений будут использованы значения по умолчанию. Для генерации деталей и сборок с установленными значениями пользователь должен нажать кнопку «Генерация сборки».

После нажатия кнопки программа откроет *Autodesk Inventor*, сгенерирует в нем все нужные детали и сборки и сохранит их в папку готовых деталей *C:\Temp\Autodesk\CЭМД\Детали* и в папку готовых

сборок C:\Temp\Autodesk\CЭМД\Сборки. Имена полученных файлов будут содержать название детали или сборки, тип двигателя, число и дату, установленные на данном компьютере в момент работы программы.

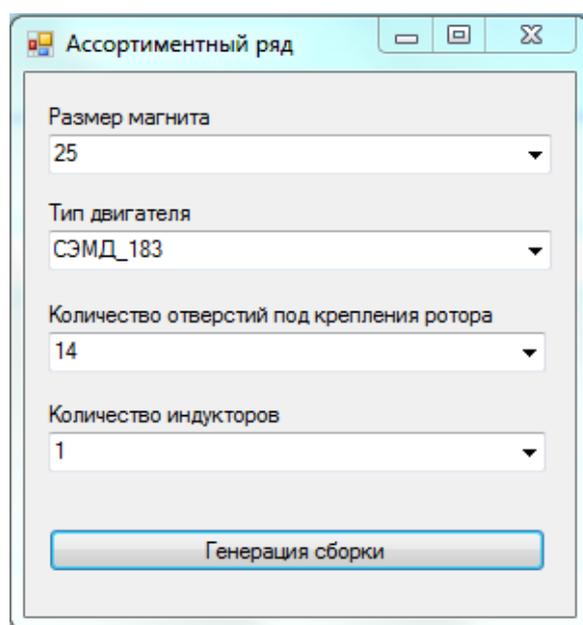


Рисунок 1 – Основное окно программы

Для примера на рис.2 и 3 представлены эскизы цифровых моделей детали – корпуса индуктора СЭМД 183-25 и сборки СЭМД 183-25, на рис. 4 и 5 представлены чертежи магнита и катушки.

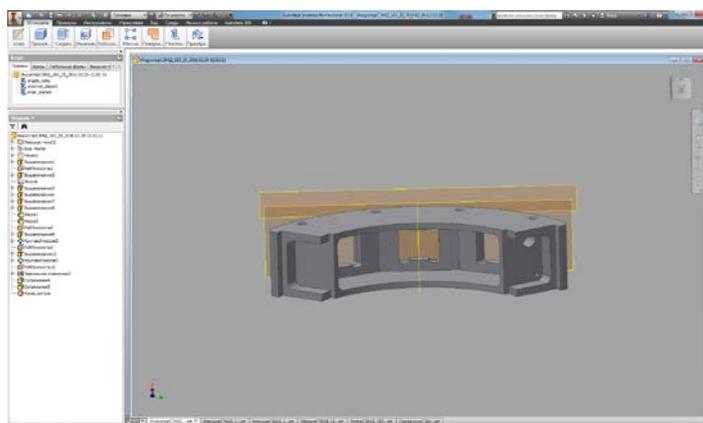


Рисунок 2 – Эскиз цифровой модели корпуса индуктора СЭМД 183-25

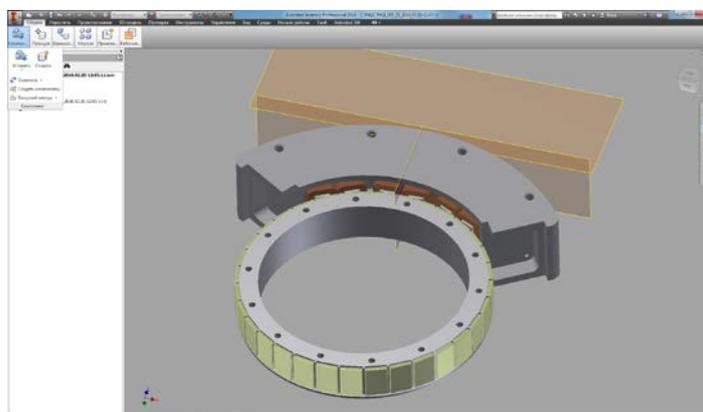


Рисунок 3 – Эскиз цифровой модели сборки СЭМД 183-25

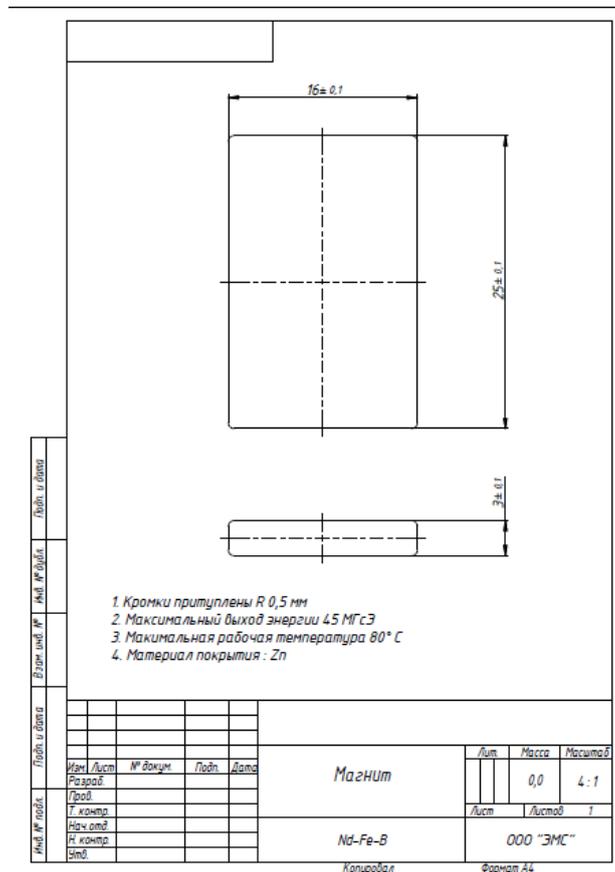


Рисунок 4 – Чертеж магнита

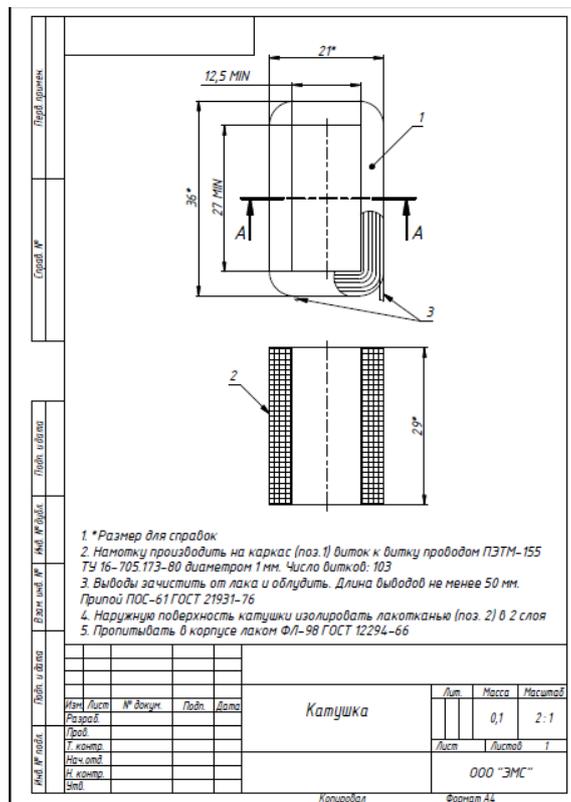


Рисунок 5 – Чертеж катушки

### Заключение

Разработано программное обеспечение, предназначенное для расчета ассортиментного ряда элементов электромашинной части ЭМД с индуктором с трехфазными катушечными обмотками и с

многополюсным ротором на постоянных магнитах. Программа позволяет указать входные данные и на выходе вычислить оптимальные значения элементов электромашинной части ЭМД. Ввод пользователем информации об исходных параметрах проектируемой ЭМЧ обеспечивает модуль интерфейса, позволяющий пользователю возможности создания сборочных конструкций. Во время моделирования на каждом участке фиксируются выходные параметры элементов электромашинной части ЭМД.

Программа позволяет последующую стыковку с САПР Autodesk Inventor Professional для автоматического получения конструкторской документации по ЕСКД.

1. Осипов О. Ю. , Осипов Ю. М. , Щербинин С. В. Мультикоординатные электромехатронные системы движения: моногр. — Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2010. — 320 с.
2. Общее представление о САПР Autodesk Inventor [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.autodesk.ru/adsk/servlet/index?siteID=871736&id=22741018>.

*I.A. Vasiliev*

## **SIMULATION OF RESCUE ROBOT FOR USE IN RESCUE OPERATIONS GROUP**

*CRDI RTC, Saint-Petersburg*

### **Abstract**

The rescue of people in distress through autonomous means of evacuation in some cases is the only way to prevent their destruction. Rescue missions are often in inaccessible places. The article discusses the modeling of a universal rescue vehicle (URV), as an engine which applied screw drives.

Keywords: robot, evacuation, screw drives.

*И.А. Васильев*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ СПАСАТЕЛЬНОГО СРЕДСТВА ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СПАСАТЕЛЬНЫХ ГРУППАХ**

*ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург, vas@rtc.ru*

### **Аннотация**

Спасение терпящих бедствие людей посредством автономных средств эвакуации в ряде случаев является единственной возможностью предотвратить их гибель. Миссии спасения часто проходят в труднодоступных местах. В статье рассматривается моделирование универсального спасательного средства, в качестве движителя которого применены шнековые приводы.

Ключевые слова: Робот, эвакуация, шнеко-роторный движитель.

### **Введение**

Универсальное спасательное средство (УСС) представляет собой пассажирское транспортное средство повышенной проходимости амфибийного типа, для обеспечения которой снабжённое четырьмя шнековыми движителями, по два с каждой стороны платформы – см. рисунок 1.

На этом рисунке хорошо видна причина, по которой с каждой стороны корпуса установлены по два изламывающихся шнека – для повышения проходимости. Шнековые движители применены тут и ещё по одной причине – для обеспечения движения на плаву, т.к. шнеки полые и их объём обеспечивает положительную плавучесть всего аппарата УСС.

Таким образом, универсальное спасательное средство может перемещаться как по твёрдым покрытиям, так и по нетвёрдым, включая плавание по воде.



Рисунок 1 – Внешний вид УСС

### Кинематическая схема УСС

Рассмотрим кинематическую схему УСС – см. рисунок 2.

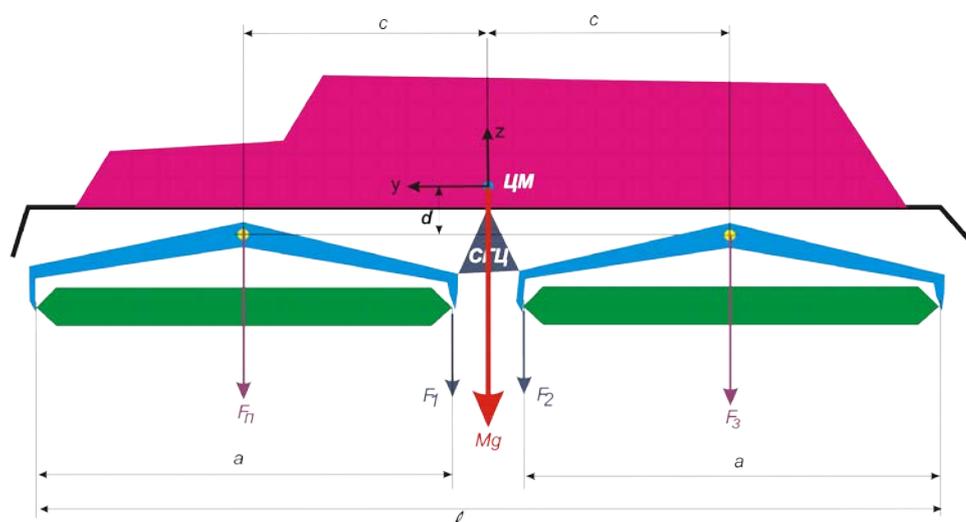


Рисунок 2– Кинематическая схема УСС

На этой схеме обозначено: ЦМ – центр масс. Что ЦМ находится строго посередине между осями крепления шнеков логично – для одинаковой нагрузки шнеков при движении по горизонтали. В реальной ситуации, разумеется, это может быть (и будет) не так. Причин тут возможно много: от разного остатка топлива в баках до неправильной посадки пассажиров в салоне. Но здесь рассмотрим именно ситуацию, когда всё идеально. Далее обозначены:  $Mg$  – сила тяжести центра масс УСС, осями  $y$  и  $z$  обозначена базовая система координат (БСК) аппарата (логичнее её помещать в центр масс),  $F_{п}$  – составляющая силы тяжести УСС, приходящаяся на передний шнек,  $F_{з}$  – составляющая силы тяжести УСС, приходящаяся на задний шнек. Для идеальной ситуации, которая изображена на рисунке 2.29, передняя и задняя силы, разумеется, будут равны и составляют каждая ровно  $1/2$  от силы тяжести УСС.

Аббревиатурой СГЦ обозначена система гидроцилиндров, обеспечивающая поворот шнеков. Соответственно, силы этих гидроцилиндров обозначены как  $F_1$  и  $F_2$ . Для описываемой идеальной ситуации эти две силы будут равны нулю.

### Модель цилиндра в воде

Пусть расстояния от начала БСК до осей поворота шнеков в горизонтальной плоскости имеют обозначения  $c$ , а смещение по вертикали –  $d$ .

Попробуем рассчитать глубину погружения в воду полого цилиндра известной массы и размеров. Для простоты будем считать, что у нас просто цилиндр, без конусных «крышек» на концах. Пусть соотношение веса самого цилиндра и веса вытесняемой воды обозначается символом  $\xi$ .

<sup>1</sup> Для упрощения (но без потери общности) будем считать, что УСС снабжено всего ДВУМЯ шнеками, передним и задним. Пока «забудем», что УСС имеет и третье измерение – ширину и, соответственно, шнеков четыре.

Первый случай – цилиндр стоит в воде вертикально. Этот вариант кажется не самым очевидным, но он самый простой, поэтому рассмотрим его первым. Рассмотрим рисунок 3, на котором изображен цилиндр в воде.

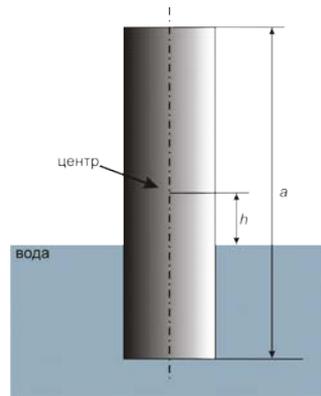


Рисунок 3 – Цилиндр в воде вертикально.

Здесь искомое расстояние  $h$  найти несложно:

$$h = a \left( \frac{1}{2} - \xi \right),$$

здесь все обозначения указаны ранее.

Второй случай – цилиндр горизонтально лежит в воде. Здесь ситуация сложнее – рассмотрим рисунок 4.

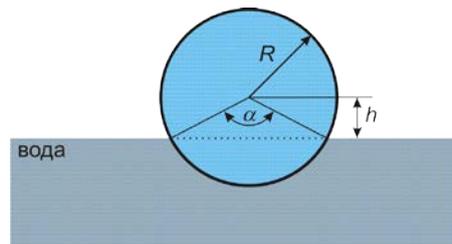


Рисунок 4 – Цилиндр горизонтально в воде. Вид с торца

Очевидно, что соотношения объёмов  $\xi$  равны соотношению площадей сегмента круга ниже пунктирной линии и площади самого круга. Поэтому и правомочно объёмную задачу привести к плоской, изображённой на рисунке 4.

Несложно получить формулу для соотношения объёмов:

$$\frac{\text{Arccos} \frac{h}{R}}{2\pi} - \frac{h}{\pi R^2} \sqrt{R^2 - h^2} = \xi.$$

Отсюда видно, что уравнение относительно искомой высоты  $h$  является сильно нелинейным, что плохо. Заменяем  $\text{Arccos} \frac{h}{R}$  на  $\frac{\pi}{2} - 1.25 \frac{h}{R}$  что оправдано тем, что графики для целей моделирования неплохо совпадают – рисунок 5.

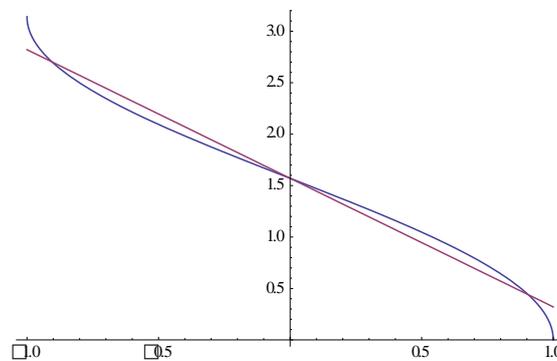


Рисунок 5 – Графики  $\text{Arccos} x$  (синяя кривая) и  $\frac{\pi}{2} - 1.25x$  (красная кривая)

В итоге получается уравнение 4-й степени, решение которого, выражается «габаритной» формулой, занимающей целую страницу. Нет необходимости приводить её здесь.

Опять же, для целей моделирования вполне достаточно заменить окружность квадратом одной площади – см. рисунок 6.

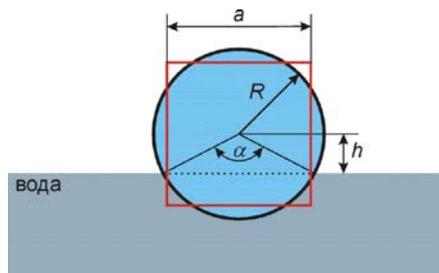


Рисунок 6 – Замена круга квадратом

Здесь  $a$  – это размер стороны квадрата. Для одинаковой площади с кругом квадрат должен иметь сторону, равную:

$$a = \sqrt{\pi R}.$$

Теперь получаем знакомое выражение для высоты  $h$ :

$$h = a \left( \frac{1}{2} - \xi \right).$$

Третий, самый общий случай – когда цилиндр находится под углом  $\alpha$  к зеркалу воды – см. рисунок 7.

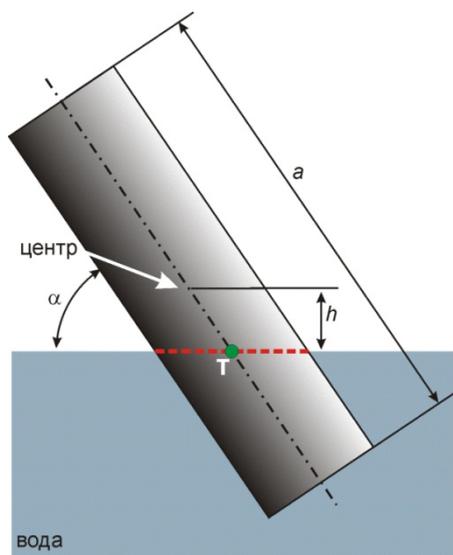


Рисунок 7 – Цилиндр под наклоном

Здесь красной пунктирной линией показан уровень зеркала воды. При наклонах цилиндра можно считать, что цилиндр поворачивается вокруг точки T, выделенной на рисунке 7 зелёной точкой. Следовательно, величина  $h$  здесь вычисляется по простой формуле:

$$h = a \left( \xi - \frac{1}{2} \right) \cos \alpha.$$

### Моделирование захода УСС с воды на лёд

Исходя из этих формул можно рассчитывать положение УСС при различных его положениях, как в воде, так и при наезде на твёрдые поверхности (берег или лёд). Рассмотрим усилия, которые возникают при таких движениях – см. рисунок 8.

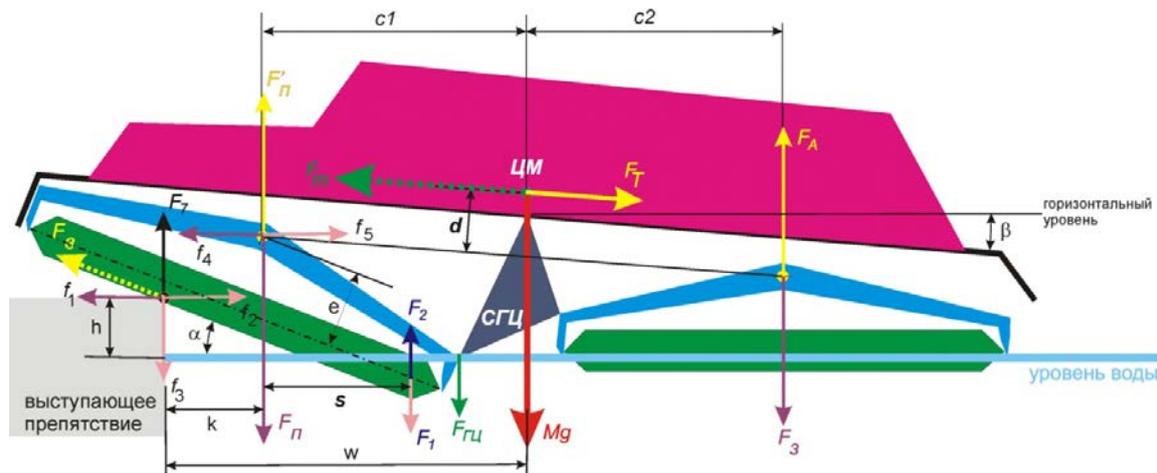


Рисунок 8 – Демонстрация заезда на препятствие

Здесь обозначены следующие силы:

- $Mg$  - вес УСС;
- $F_A$  и  $F'_n$  - реакции в точках подвеса шнеков;
- $F_3$  и  $F_n$  - нагрузка в точках подвеса шнеков;
- $F_{гц}$  – усилие гидроцилиндра по наклону шнека;
- $F_1$  и  $F_2$  – часть силы тяжести приходящаяся на конец переднего шнека и соответствующая ей архимедова сила;
- $F_7, f_1, f_2$  и  $f_3$  – силы, возникающие от опоры переднего шнека на препятствие;
- $F_b$  – сила ввинчивания шнека в препятствие;
- $F_m$  – сила тяги, требующаяся для движения аппарата.

Для поднятия на препятствие недостаточно только силы ввинчивания  $F_b$ , так как эта сила зависит от силы давления  $f_3$ , а она в начальный момент может быть недостаточной, т.к. зависит от величин  $w$  и  $F_1$ :

$$f_3 = Mg \frac{c_2}{w} - F_1.$$

Тяговая сила шнека в воде незначительна, поэтому УСС должен быть снабжён дополнительным двигателем – водомётom.

Зная коэффициент зацепления за выступающее препятствие, который является аналогом коэффициенту трения, можно подсчитать требуемое усилие для движения УСС:

$$F_m = F_b \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} + F_T,$$

где  $\alpha$  - угол наклона шнека к горизонту;  
 $\beta$  - угол наклона корпуса УСС к горизонту;  
 $F_T$  - сила тяги водомёта.

Подсчитаем необходимую силу тяги водомёта. При движении аппарата главная и основная сила сопротивления – это сила тяжести, т.к. происходит поднятие УСС на препятствие. Поэтому сила  $f_3$  должна быть спроецирована на ось действия силы  $F_b$ :

$$f_3 \sin \alpha = F_T \frac{\cos \beta}{\cos \alpha} + F_b = F_T \frac{\cos \beta}{\cos \alpha} + \vartheta f_3 \cos \alpha,$$

где  $\vartheta$  – коэффициент зацепления шнека о материал препятствия.

Отсюда требуемая сила тяги водомёта:

$$F_T = \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} f_3 (\sin \alpha - \vartheta \cos \alpha).$$

### Заключение

Работы по моделированию и созданию универсального спасательного средства ещё только в самом начале. Тем не менее, становится очевидным, что возможности проходимости УСС практически в любых условиях почти безграничны. В настоящее время производится изготовление макета аппарата и ещё в этом году макет УСС начнёт проходить испытания.

1. Брискин Е.С., Чернышев В.В., Малолетов А.В., Шаронов Н.Г. Сравнительный анализ колёсных, гусеничных и шагающих машин. // Научно-технический журнал «Робототехника и техническая кибернетика», №1, 2013 г.

2. Шнекороторный вездеход. Электронный ресурс:  
[https://ru.wikipedia.org/wiki/Шнекороторный\\_вездеход](https://ru.wikipedia.org/wiki/Шнекороторный_вездеход)
3. В.Н. Наумов, К.Ю. Машков, К.Е. Бяков. Моделирование прямолинейного движения транспортно-технологического средства с роторно-винтовым двигателем. // Журнал «Машиностроение», №12-2013
4. В.Н. Наумов, К.Е. Бяков. Изменение тагово-скоростных характеристик транспортно-технологического средства с роторно-винтовым двигателем варьированием угла подъёма винтовой лопасти в процессе движения. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана: электронное издание. 2013

*A.S. Shalumov*

## **AUTOMATED MODELING TO EXTREME EXTERNAL FACTORS IN THE DESIGN OF ROBOTIC SYSTEMS**

*Scientific-research institute «ASONIKA» LTD  
als@asonika-online.ru*

### **Annotation**

The problems of designing robotic systems and business reasons for launching the project and basic assumptions are considered. The concept of creating on the basis of the ASONIKA system of domestic CAD systems of robotic systems and the mechanism for its implementation are proposed. The available potential is revealed. Proposals on standardization in the field of simulation of robotic systems for extreme external factors are given.

Keywords: robotics systems, electronic equipment, modeling, thermal effects, mechanical effects, electromagnetic effects, reliability, ASONIKA.

*A.C. Шалумов*

## **ПРИМЕНЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ВНЕШНИЕ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИЕ ФАКТОРЫ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

*ООО «Научно-исследовательский институт «АСОНИКА», г. Ковров  
als@asonika-online.ru*

### **Аннотация**

Рассмотрены проблемы проектирования робототехнических систем и бизнес-причины для запуска проекта и основные предположения. Предложена концепция создания на базе системы АСОНИКА отечественной САПР робототехнических систем и механизм её реализации. Раскрыт имеющийся потенциал. Даны предложения по стандартизации в области моделирования робототехнических системы на экстремальные внешние воздействующие факторы.

Ключевые слова: робототехнические системы, электронная аппаратура, моделирование, тепловые воздействия, механические воздействия, электромагнитные воздействия, надёжность, АСОНИКА.

### **1. Проблемы**

1.1. Тепловые, механические, электромагнитные, радиационные воздействия могут приводить к отказам робототехнических систем (РТС).

1.2. Использование только натуральных испытаний РТС на внешние воздействующие факторы (ВВФ) без применения моделирования малоинформативно и неэффективно, так как:

- на этапе проектирования не отслеживается большинство возможных отказов РТС;
- при испытаниях не проверяются экстремальные режимы (либо технически невозможно, либо дорого из-за возможных отказов испытываемых изделий);
- из-за недоработок проектирования РТС, вскрытых путем испытаний, возможно множество итераций: доработка проекта – испытания опытного образца – доработка проекта и т.д., что значительно увеличивает сроки и стоимость разработки;

- при натуральных испытаниях практически невозможно воспроизвести комплексные (одновременно действующие) воздействия

- невозможно установить датчики во всех точках конструкции РТС и контролировать их поведение; выбор контрольных точек при испытаниях субъективен и опирается в основном на опыт и интуицию.

1.3. На рынке РФ много лет доминирует импортное программное обеспечение (ПО), которое так и не прижилось на предприятиях РФ в виду того, что оно не специализировано для моделирования РТС, вызывает трудности освоения и адаптации, не считая того, что ПО англоязычное и дорогое. В настоящее время импортное ПО также противоречит политике Правительства РФ в области импортозамещения.

## **2. Бизнес-причины для запуска проекта и основные предположения**

Основными покупателями и потенциальными потребителями предлагаемой технологии являются научно-исследовательские институты, конструкторские бюро, научно-производственные объединения, заводы и различные информационно-научные центры, занятые проектированием и производством РТС.

Полный список таких предприятий в России на сегодняшний день составляет более 1000. Они могут покупать как программное обеспечение, так и заказывать услуги по консалтингу (расчётам схем и конструкций), а также заполнение базы данных новыми электрорадиоизделиями (ЭРИ).

Жесткая конкурентная борьба за рынок сбыта продукции как на российском, так и на зарубежном уровне заставит предприятия обеспечивать высокую надёжность электроники в сжатые сроки. Без моделирования на ранних этапах проектирования (до изготовления опытного образца) при этом обойтись в принципе невозможно, так как отсутствие моделирования наверняка приведет к отказам либо на этапе испытаний опытного образца, либо, что еще хуже, на этапе эксплуатации. Первое приведёт к множественным итерациям по исправлению ошибок при проектировании, а значит к увеличению сроков проектирования и, как следствие, к быстрому моральному старению продукции. Второе – к недоверию на рынке, массовой потере клиентов, штрафам. Таким образом, предприятия просто вынуждены будут применять моделирование, как схемотехническое, так и конструкторское, а значит потребуются модели ЭРИ для проведения расчетов схем и конструкций. Сбором информации для базы данных ЭРИ не будет заниматься ни одно предприятие по причинам: 1) отсутствия соответствующей информации и моделей; 2) отсутствия квалифицированных специалистов в данной предметной области; 3) отсутствием возможности сертификации введенных данных. Главным рычагом воздействия на предприятия по внедрению результатов данного проекта является борьба за рынок сбыта продукции на рынке.

Гарантированно мы сможем внедрить результаты проекта на предприятиях военно-промышленного комплекса РФ, так как продукция принимается военными представителями заказчика, а они требуют обеспечения высоких показателей надёжности и выполнения всех требований ТЗ по внешним воздействующим факторам. При этом ими принимаются только результаты моделирования по системе АСОНИКА как альтернатива испытаниям (макетированию) на ранних этапах проектирования, так как только АСОНИКА аттестована Министерством обороны РФ и рекомендована РДВ в составе комплекса стандартов «МОРОЗ-6» для замены испытаний (макетирования) на ранних этапах проектирования. А система АСОНИКА является базовой в данном проекте.

В настоящее время на предприятиях РФ, создающих электронную аппаратуру (ЭА) в составе РТС и проектирующих электронные схемы практически не проводится комплексное моделирование электрических, тепловых, механических процессов с передачей данных в карты рабочих режимов электронных компонентов и для анализа показателей надёжности. Это приводит к низкому качеству и надёжности ЭА, а также увеличивает сроки проектирования аппаратуры из-за множества итераций, связанных с доработкой по результатам испытаний опытных образцов. Основной причиной, не позволяющей проводить комплексное моделирование, является отсутствие интегрированной базы данных по геометрическим, теплофизическим, физико-механическим, электрическим параметрам, а также механизма её постоянного обновления.

Это не гипотеза. Это проблема и беда практически всех предприятий РФ в области электроники, которую никто, кроме нас, не предлагает и потенциально не может решить. Попыток было немало, в том числе со стороны государственных организаций. На эти цели государство за последние годы выделило миллиарды рублей различным организациям и вузам, а также потеряло из-за отсутствия правильной стратегии и тактики в данном направлении в виду большого количества отказов российской электроники в процессе эксплуатации. Все эти попытки закончились ничем. В результате государство не смогло создать аналога системы АСОНИКА и уже вряд ли сможет, так как на его разработку потребуется не менее 20-и лет при условии подключения высококвалифицированных специалистов, которых в РФ дефицит.

Более оптимальным решением было бы финансировать развитие системы АСОНИКА и интеграцию вокруг неё российских разработчиков ПО в области электроники и робототехники, что и предлагается в данном проекте. Это было бы и дешевле, так как затраты были бы на 2 порядка меньше, и быстрее, и результативнее.

Несмотря на отсутствие государственного финансирования, АСОНИКА эффективно развивается за счет высокого научного потенциала коллектива разработчиков и за счет их высочайшей активности, желания и умения работать даже в условиях полного отсутствия финансирования, на что не способно ни одно государственное предприятие, а также за счет грамотного маркетинга и менеджмента, проводимого не экономистами и управленцами, а именно разработчиками системы АСОНИКА.

Ярчайшим доказательством вышесказанного является состоявшееся 21 марта 2017 г. в Рособоронэкспорте совместное заседание Комитета по информационно-коммуникационным технологиям и Комитета по приборостроению, системам управления, электронной и электротехнической промышленности при Бюро Ассоциации «Лига содействия оборонным предприятиям» и «Союзе Машиностроителей России». Тема заседания: «Автоматизация проектирования электроники. Текущая ситуация, планы использования и развития eCAD». Генеральный директор Шалумов А.С. выступил с докладом на тему: "Моделирование военной и космической электроники на внешние тепловые, механические, электромагнитные воздействия в системе АСОНИКА". Из программы заседания можно увидеть реальных разработчиков САПР электроники в России. Их всего несколько. АСОНИКА заняла центральное место.

### **3. Перспективы**

#### **3.1. Концепция создания на базе системы АСОНИКА отечественной САПР РТС**

Необходимо создать новые программные модули, которых нет в отечественной Автоматизированной системе обеспечения надежности и качества аппаратуры (АСОНИКА), но которые крайне необходимы разработчикам РТС для выполнения всех требований технического задания (ТЗ) на разработку РТС по внешним воздействиям.

Их реализация в совокупности с системой АСОНИКА и с отечественными системами моделирования электрических характеристик СИМИКА, Delta Design позволит осуществить сквозное компьютерное моделирование РТС в минимальные сроки и с минимальными затратами, значительно сократив количество испытаний и обеспечив высокую надежность РТС.

Структура САПР РТС представлена на рис.1. Система как интегрирует уже существующее независимое отечественное ПО - АСОНИКА, СИМИКА, Delta Design и др., так и включает вновь разрабатываемые программные продукты (на рис.1 они выделены красным цветом).

Каждый из этих независимых продуктов не может охватить все требования ТЗ, а в составе интегрированной системы - может.

САПР РТС выступает интегратором существующих программ. При этом ее центральной частью является система АСОНИКА, которая существует уже 40 лет.

#### **3.2. Механизм реализации концепции**

Сформировать команду для выполнения проекта. В команду войдут специалисты из ООО «НИИ «АСОНИКА» (АСОНИКА), ООО «Интегральные решения» (СИМИКА), ООО «ЕРЕМЕКС» (Delta Design), новые программисты. Совместно подготовить техническое задание, куда должны войти следующие задачи:

*На первом этапе:*

1) реализация модулей стыковки электрических расчетов (СИМИКА, Delta Design) и системы АСОНИКА для формирования и передачи электрических параметров схем в систему АСОНИКА: токов, напряжений, мощностей и т.д.;

2) отработка стыковки АСОНИКА – СИМИКА - Delta Design на конкретных примерах предприятий – потенциальных заказчиков (ОАО «РКК «Энергия», фирмах-резидентах Сколково и др.);

3) создание модулей идентификации параметров спайс-моделей электронных компонентов, без которых невозможно проведение электрических расчетов, создание компьютерного измерительного стенда для экспериментального определения электрических характеристик электронных компонентов и последующей идентификации параметров их спайс-моделей, формирование базы данных спайс-моделей.

Исполнители проекта - высококвалифицированные специалисты (преимущественно кандидаты технических наук), подготовленные в научной школе профессора Шалумова А.С.

Требования к исполнителям проекта:

- владение математическими методами, используемыми для моделирования физических процессов в РТС, в том числе численными методами - методом конечных разностей, методом конечных элементов и др.;
- владение физикой процессов, протекающих в РТС;
- знания в области конструирования и автоматизации проектирования РТС;
- умение и опыт программирования на языках высокого уровня: Си++, Дельфи и др.



Рисунок 1 – Структура САПР РТС

4) проведение испытаний для проверки точности моделей электрических схем и конструкций и идентификации параметров спайс-моделей и моделей физических процессов РТС. Создание лаборатории по непрерывному получению спайс-моделей и их параметров и параметров моделей физических процессов РТС по заказам предприятий.

5) создание лаборатории моделирования РТК на базе Фонда перспективных исследований (ФПИ).

*На втором этапе:*

Создание новых программных модулей, указанных на рис. 1 (выделены красным цветом).

Реализация проекта позволит создать инновационную технологию информационной поддержки комплексного моделирования ЭА РТС на основе широко применяемых на предприятиях автоматизированных систем, включающую:

1. Разработку информационных моделей электронных компонентов для формирования базы данных по геометрическим, теплофизическим, физико-механическим, электрическим параметрам.

2. Идентификацию параметров Spice - моделей для разработки и анализа электрических схем.

3. Моделирование электрических характеристик электронных схем с использованием Spice-моделей: токи, напряжения, мощности для каждого электронного компонента.

4. Моделирование тепловых и механических процессов в электронной аппаратуре с получением ускорений и температур электронных компонентов, создание карт рабочих режимов, анализ показателей надёжности электронных компонентов с помощью системы АСОНИКА.

5. Тестирование моделей электрических, тепловых, механических процессов электронных компонентов и ЭА.

В результате реализации проекта предприятия РФ смогут системно создавать ЭА РТС с применением моделирования на ранних этапах проектирования до изготовления опытного образца, позволяя избежать отказы или значительно сократить их на этапе испытаний опытного образца, сокращая тем самым количество испытаний опытного образца, возможные итерации по доработке схем и конструкций, затраты на разработку аппаратуры при одновременном повышении качества и

надёжности, в том числе в экстремальных режимах работы, делая электронную аппаратуру конкурентоспособной на отечественном и международном рынке, получая на выходе электронную модель изделия на принципах CALS-технологий.

#### **4. Имеющийся потенциал**

Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт «АСОНИКА» (ООО «НИИ «АСОНИКА») - научная организация, занимающаяся разработкой, развитием и внедрением на предприятиях РФ Автоматизированной системы обеспечения надёжности и качества аппаратуры АСОНИКА в соответствии с требованиями CALS-технологий на этапах проектирование-производство-эксплуатация.

В составе ООО «НИИ «АСОНИКА» работают 15 специалистов, имеющие ученые степени кандидатов и докторов наук и являющиеся участниками научной школы моделирования, информационных технологий и автоматизированных систем НШ-5574.2014.10 в области знаний «Военные и специальные технологии» под руководством профессора Шалумова А.С.

Система АСОНИКА внедрена более чем на 100 отечественных предприятиях промышленности, разрабатывающих РТС военного и народнохозяйственного назначения, в частности в ПАО «РКК «Энергия» при разработке электронных приборов для Международной космической станции.

Применение системы АСОНИКА при проектировании и при технической экспертизе опытных образцов РТС, таких, как аппаратные комплексы АСУ Вооружённых сил РФ, изделия ЗРС С-300ПК, системы управления РК "Тополь-М", космических аппаратов "Метеор", "Ямал", "Sesat", самолётов СУ-27, МИГ-29, позволило снизить трудоёмкость проведения проектных исследований (в отдельных случаях до 35-40 %), повысить качество разрабатываемых образцов (прежде всего – их надёжности за счет своевременного выявления и устранения предпосылок к отказам, связанных с нерациональными схемными и конструктивными решениями), сэкономить средства за счёт сокращения объёмов работ по созданию и исследованию макетов, уменьшить объёмы всех видов испытаний (на 10-15%).

АСОНИКА – это замена испытаний РТС компьютерным моделированием еще до изготовления опытных образцов. Система сертифицирована по ГОСТ Р ИСО 9001-2008, аттестована Министерством обороны РФ, выпущены Руководящие документы военные. Имеется лицензия Роскосмоса. Активное применение системы АСОНИКА в промышленности позволяет перейти к значительной экономии денежных средств и сокращению сроков создания РТС при одновременном повышении их качества, надёжности и сокращении количества натуральных испытаний.

Вся современная техника (ракеты, самолёты, танки, корабли, подводные лодки, автомобили) обязательно включает электронную аппаратуру, которая состоит из печатных плат, микросхем и др. И если одна из них не работает, то не функционирует вся техника.

Работу аппаратуры значительно ухудшают воздействия вибраций, ударов, тепла, электромагнитных полей, радиации и др. Поэтому важным этапом создания электронной аппаратуры являются её испытания на все воздействия. Испытания очень дороги, требуют много времени и часто не позволяют правильно прогнозировать состояние электронной аппаратуры в реальных условиях, особенно в критических режимах.

В последнее время произошло большое количество катастроф космических аппаратов (ГЛОНАСС, «Фобос-Грунт», «Меридиан», ПРОТОН и др.). Катастрофы обусловлены тем, что фактически не проводится моделирование электронных приборов космических аппаратов на воздействие внешних дестабилизирующих факторов, в том числе в критических ситуациях. Однако моделирование электронных приборов космических аппаратов невозможно без наличия необходимого специализированного программного обеспечения и базы данных электронных компонентов и конструкционных материалов. Ниже рассматриваются такая система и база данных, т.е. разработана Автоматизированная система обеспечения надёжности и качества аппаратуры (АСОНИКА) [1 - 16].

В течение многих лет создавалась и апробировалась на многих российских предприятиях, прежде всего оборонной, космической и авиационной отраслей, технология двойного назначения. Суть технологии состоит в следующем: используя систему АСОНИКА, можно с помощью компьютера предвидеть и предотвращать всевозможные отказы ещё не изготовленной электронной аппаратуры, предназначенной для функционирования на военных, космических и гражданских объектах. Фрагменты результатов работы системы АСОНИКА представлены на рис.2.

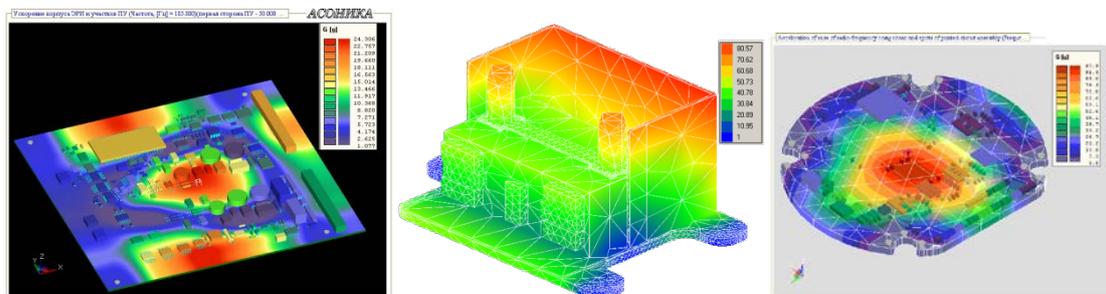


Рисунок 2 – Фрагменты результатов работы системы АСОНИКА представлены

Применение системы АСОНИКА позволит автоматизировать проектирование сложных РТС в условиях воздействия внешних дестабилизирующих факторов в соответствии с требованиями CALS-технологий на этапах проектирование–производство–эксплуатация и тем самым обеспечить:

- повышение качества проектирования сложных РТС;
- исключение критических ошибок при проектировании сложных РТС;
- сокращение времени и трудоёмкости работ по проектированию сложных РТС;
- достижение полного охвата всех этапов жизненного цикла продукции от маркетинговых исследований до утилизации в соответствии со стандартами CALS-технологий;
- учёт наиболее полного спектра воздействующих факторов (механических, тепловых, электромагнитных, радиационных);
- снижение сроков и затрат на проектирование за счет доступности разработчику сложных РТС предлагаемых программных средств и адекватности результатов моделирования.

Актуальность задач, связанных с автоматизацией проектирования и моделирования радиоэлектронных средств, в том числе ракетно-космической и военной техники, была рассмотрена на выставке 11 декабря 2009 г. в г. Санкт-Петербурге. Важность данного проекта для отечественной промышленности можно посмотреть на сайте [www.asonika-online.ru](http://www.asonika-online.ru).

Из Указа Президента РФ от 7 мая 2012 г. №603 «О реализации планов (программ) строительства и развития Вооруженных Сил Российской Федерации, других войск, воинских формирований и органов и модернизации оборонно-промышленного комплекса» следует, что «планируется внедрить систему управления полным индустриальным циклом производства вооружения, военной и спецтехники – от моделирования и проектирования до серийного выпуска изделий, обеспечения их эксплуатации и дальнейшей утилизации».

Система АСОНИКА предназначена для решения четырех основных проблем, существующих при разработке современной ЭА РТС:

- предотвращения возможных отказов при эксплуатации на ранних этапах проектирования за счёт комплексного моделирования разнородных физических процессов;
- обеспечения безопасности человека при полётах на самолётах (предотвращения авиакатастроф) за счёт комплексного автоматизированного анализа системы управления самолётом на основе созданной электронной модели при всех видах внешних дестабилизирующих факторах, в том числе в критических режимах;
- сокращения сроков и затрат на проектирование за счёт доступности разработчику аппаратуры предлагаемых программных средств и адекватности результатов моделирования;
- автоматизации документооборота и создания электронной модели ЭА РТС за счёт интеграции предлагаемых программных средств в рамках PDM-системы хранения и управления инженерными данными и жизненным циклом аппаратуры.

Эксплуатация бортовых РТС характеризуется воздействием на них совокупности жёстких внешних факторов, которые действуют одновременно, что приводит к отказам системного характера. Такие отказы трудно выявить при испытаниях, так как нет стендов, позволяющих комплексно воспроизвести одновременно электрические процессы функционирования, сопутствующие тепловые, механические, аэродинамические, радиационные и другие внешние воздействия, технологические явления случайных разбросов параметров, старение, коррозию и другие деградиционные факторы. Проблема осложняется тем, что современные РТС включают в себя сложные микросистемные изделия, обладающие определёнными физико-технологическими особенностями, которые также должны быть учтены при комплексном математическом моделировании. Все эти факторы в совокупном и взаимосвязанном проявлении обязательно должны быть правильно учтены при схемно-конструкторско-технологическом проектировании, что можно выполнить только с помощью ЭВМ. В этом случае действительно заранее

могут быть выявлены и устранены основания для системных отказов и обеспечены высокие показатели надёжности РТС.

Причины существования четырёх перечисленных выше проблем коренятся в недостатках процессов проектирования и отработки создаваемых образцов, связанных с недостаточным применением автоматизированных методов проектирования и современных информационных технологий, базирующихся на комплексном математическом моделировании одновременно протекающих электрических, тепловых, механических, аэродинамических, электромагнитных и других процессов, обусловленных как функционированием аппаратуры и воздействием внешних факторов, так и её износом и старением. Выход из создавшегося положения лежит в унификации математических моделей разнородных физических процессов на основе существующей аналогии протекания. Это позволит значительно снизить трудоёмкость интеграции их в единую комплексную модель, обеспечить полноту и достоверность результатов моделирования, разработать соответствующую методологию и реализующую её принципиально новую многофункциональную автоматизированную систему анализа схемотехнических и конструктивно-технологических решений и надёжности проектируемых РТС. Данная система, как сказано выше, получила название АСОНИКА и внедрена на ряде предприятий военно-промышленного комплекса Российской Федерации.

Система АСОНИКА дополняет обычный перечень конструкторской документации результатами расчётов и моделями, по которым эти расчёты проведены. Тем самым формируется электронный виртуальный макет создаваемой аппаратуры, который может быть передан на этапы изготовления и эксплуатации. В рамках системы АСОНИКА реализуется специальный программный комплекс, который формирует структуру электронного (виртуального) макета разрабатываемой аппаратуры, наполняет данную структуру результатами работы проблемных подсистем системы АСОНИКА. Эти подсистемы позволяют моделировать электрические, тепловые, аэродинамические, механические и деградационные процессы в аппаратуре, осуществлять диагностическое моделирование, анализ показателей надёжности, а также интегрироваться с системами топологического проектирования систем и устройств телекоммуникаций Mentor Graphics, Cadence, Altium Designere, PCAD и др.

Программный комплекс управляет процессом отображения результатов модельных экспериментов на геометрической модели, входящей в состав электронного макета, а также преобразует электронный макет после его обработки в формат стандарта ISO 10303 STEP. Данные, входящие в электронный макет, используются на последующих стадиях жизненного цикла РТС.

В настоящее время система АСОНИКА состоит из тринадцати подсистем:

- анализа типовых конструкций блоков РТС на механические воздействия АСОНИКА-М;
  - анализа типовых конструкций шкафов и стоек РТС на механические воздействия АСОНИКА-М-ШКАФ;
  - анализа и обеспечения стойкости произвольных объёмных конструкций, созданных в системах ProEngineer, SolidWorks и других САЕ-системах в форматах IGES и SAT, к механическим воздействиям АСОНИКА-М-3D;
  - анализа и обеспечения стойкости к механическим воздействиям конструкций РТС, установленных на виброизоляторах, АСОНИКА-В;
  - анализа и обеспечения тепловых характеристик конструкций РТС АСОНИКА-Т;
  - анализа конструкций печатных узлов РТС на тепловые и механические воздействия АСОНИКА-ТМ;
  - автоматизированного заполнения карт рабочих режимов электрорадиоизделий (ЭРИ) АСОНИКА-Р;
  - анализа показателей надёжности РТС с учетом реальных режимов работы ЭРИ АСОНИКА-Б;
  - справочной базы данных ЭРИ и материалов по геометрическим, физико-механическим, теплофизическим, электрическим и надёжностным параметрам АСОНИКА-БД;
  - идентификации физико-механических и теплофизических параметров моделей РТС АСОНИКА-ИД;
  - анализа усталостной прочности конструкций печатных плат и ЭРИ при механических воздействиях АСОНИКА-УСТ;
  - анализа и обеспечения электромагнитной совместимости РТС АСОНИКА-ЭМС;
  - управления моделированием РТС при проектировании АСОНИКА-УМ.
- Система АСОНИКА включает в себя следующие конверторы с известными САПР:

- модуль интеграции системы моделирования электрических процессов в схемах PSpice и подсистем АСОНИКА-Р, АСОНИКА-Б (ведётся разработка модулей интеграции с системами Cadence и Altium Designere);

- модуль интеграции систем проектирования печатных узлов PCAD, Mentor Graphics, Cadence, Altium Designere и подсистемы АСОНИКА-ТМ;

- модуль интеграции 3D-модели, созданной в системах КОМПАС, ProEngineer, SolidWorks, Inventor, T-FLEX в форматах IGES, SAT и подсистемы АСОНИКА-М (версия АСОНИКА-М-3D).

Предполагается разработка подсистемы радиационной стойкости РТС АСОНИКА-РАД.

Структура системы АСОНИКА (см. рис.3) предусматривает, что в процессе проектирования, в соответствии с требованиями CALS-технологий, на базе подсистемы управления данными при моделировании АСОНИКА-УМ (PDM-системы) и с использованием подсистем моделирования происходит формирование электронной модели изделия.

С помощью специального графического редактора вводится электрическая схема, которая сохраняется в базе данных проектов в подсистеме АСОНИКА-УМ и передаётся в виде файла в системы анализа электрических схем PSpice, Mentor Graphics, Cadence и Altium Designere, а также в системы размещения и трассировки печатных плат PCAD, Mentor Graphics, Cadence и Altium Designere. Выходные файлы системы PCAD в формате PDIF и Mentor Graphics, Cadence и Altium Designere в формате IDF либо сохраняются в подсистеме АСОНИКА-УМ, либо направляются в системы AUTOCAD, КОМПАС, ProEngineer, SolidWorks, Inventor, T-FLEX для создания чертежей и сохраняются в подсистеме АСОНИКА-УМ. В подсистему АСОНИКА-УМ также передаются 3D-модели шкафов и блоков РТС, созданные в системах КОМПАС, ProEngineer, SolidWorks, Inventor, T-FLEX в форматах IGES и SAT, которые направляются в подсистемы АСОНИКА-М и АСОНИКА-В (1) для анализа механических процессов в шкафах и блоках РТС, а также в подсистему АСОНИКА-Т (3) для анализа тепловых процессов в шкафах и блоках РТС.

Полученные в результате моделирования напряжения, перемещения, ускорения и температуры в конструкциях шкафов и блоков сохраняются в подсистеме АСОНИКА-УМ (2, 4). Чертежи печатных узлов (ПУ) и спецификации к ним, а также файлы в форматах PDIF и IDF передаются из подсистемы АСОНИКА-УМ в подсистему АСОНИКА-ТМ (5) для комплексного анализа тепловых и механических процессов в ПУ. Кроме того, передаются температуры воздуха в узлах, полученные в подсистеме АСОНИКА-Т, а также ускорения опор, полученные в подсистеме АСОНИКА-М (6). Полученные в результате моделирования температуры и ускорения ЭРИ сохраняются в подсистеме АСОНИКА-УМ (7).

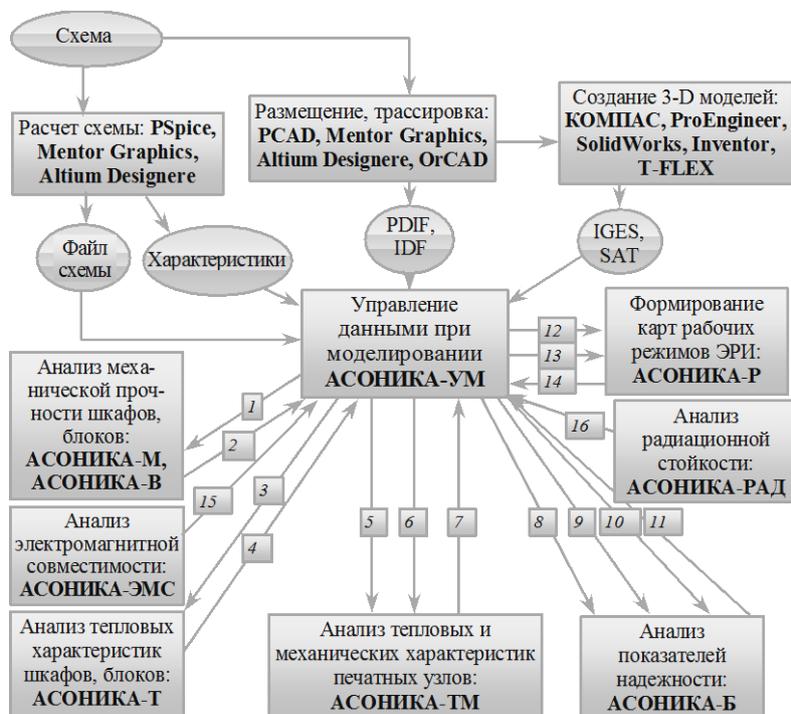


Рисунок 3 – Структура системы АСОНИКА

Перечень ЭРИ (8), файлы с электрическими характеристиками ЭРИ (9), температурами и ускорениями ЭРИ (10), результаты электромагнитного (15) и радиационного (16) анализа, полученные в подсистемах АСОНИКА-ЭМС и АСОНИКА-РАД, передаются из подсистемы АСОНИКА-УМ в подсистему анализа показателей надёжности РТС АСОНИКА-Б. Полученные в результате показатели надёжности РТС сохраняются в подсистеме АСОНИКА-УМ (11). Перечень ЭРИ, файлы с электрическими характеристиками ЭРИ (12), температурами и ускорениями ЭРИ (13) передаются из подсистемы АСОНИКА-УМ в подсистему формирования карт рабочих режимов ЭРИ АСОНИКА-Р. Полученные в результате карты рабочих режимов сохраняются в подсистеме АСОНИКА-УМ (14).

Система ориентирована на разработчика РТС. Для этого в подсистемах АСОНИКА-М и АСОНИКА-ТМ созданы специальные интерфейсы для ввода типовых конструкций аппаратуры – шкафов, блоков, печатных узлов, что значительно упрощает анализ физических процессов в РТС.

Если бы пользователь строил модель механических процессов сложного шкафа или блока в обычной конечно-элементной системе, например ANSYS, то вначале пришлось бы пройти специальное обучение и набраться опыта. Для работы с системой АСОНИКА не нужно специального обучения, достаточно просто ввести в неё на доступном конструктору языке то, что представлено на чертеже. Ввод того же сложного шкафа может быть осуществлён в течение получаса.

Таким образом, полноценный комплексный анализ шкафа на тепловые и механические воздействия вплоть до каждого ЭРИ (получаем ускорения и температуры на каждом элементе) может быть проведён в течение 1 дня.

Подсистема АСОНИКА-М позволяет анализировать блоки кассетного, этажерочного и цилиндрического типов, шкафы РТС и проводить расчёт следующих механических воздействий: гармоническая вибрация, случайная вибрация, одиночный и многократный удар, линейное ускорение, статика, давление, а также проводить модальный анализ.

В результате моделирования могут быть получены: зависимости ускорений от частоты и времени в контрольных точках и узлах конструкции; перемещения, прогибы, ускорения и напряжения участков конструкции блоков и шкафов; деформации блоков и шкафов; ускорения в местах крепления печатных узлов, необходимые для их дальнейшего анализа вплоть до каждого ЭРИ в подсистеме АСОНИКА-ТМ.

Подсистема АСОНИКА-М включает в себя базу данных со справочными геометрическими, теплофизическими и физико-механическими параметрами конструкционных материалов.

Подсистема АСОНИКА-В предназначена для анализа механических характеристик конструкций шкафов, стоек и блоков РТС, установленных на виброизоляторах, при воздействии гармонической вибрации, случайной вибрации, ударных нагрузок, линейного ускорения, акустических шумов. На основе полученных механических характеристик можно принять решение для обеспечения стойкости аппаратуры при механических воздействиях. Подсистема имеет специальный графический интерфейс ввода конструкции на виброизоляторах. Подсистема позволяет идентифицировать параметры виброизоляторов, а также оптимизировать их с целью снижения нагрузок на конструкцию. В результате моделирования могут быть получены зависимости ускорений конструкции на виброизоляторах от частоты и времени. Подсистема АСОНИКА-В включает в себя базу данных со справочными параметрами виброизоляторов.

Подсистема АСОНИКА-Т позволяет анализировать тепловые характеристики следующих типов конструкций РТС: микросборок, радиаторов и теплоотводящих оснований, гибридно-интегральных модулей, блоков этажерочной и кассетной конструкции, шкафов, стоек, а также произвольных конструкций РТС.

Подсистема позволяет анализировать стационарный и нестационарный тепловые режимы аппаратуры, работающей при естественной и вынужденной конвекциях в воздушной среде как при нормальном, так и при пониженном давлении.

При анализе произвольных конструкций определяются температуры выделенных изотермических объёмов и выводятся графики зависимости температур от времени для нестационарного теплового режима.

Подсистема АСОНИКА-Т включает в себя базу данных со справочными теплофизическими параметрами конструкционных материалов.

Подсистема анализа конструкций печатных узлов РТС на тепловые и механические воздействия АСОНИКА-ТМ позволяет анализировать печатные узлы РТС и проводить расчёт стационарного и нестационарного тепловых режимов: как при нормальном, так и при пониженном давлении; при следующих видах механических воздействий: гармоническая вибрация, случайная вибрация, одиночный и многократный удар, линейное ускорение, акустический шум.

Подсистема имеет специальный графический интерфейс ввода конструкции печатного узла.

В результате моделирования могут быть получены: зависимости ускорений от частоты и времени в контрольных точках конструкции; максимальные температуры, ускорения и напряжения участков печатных узлов и ЭРИ; формы колебаний печатных узлов на собственных частотах; карты тепловых и механических режимов ЭРИ.

Подсистема АСОНИКА-Р предназначена для облегчения и ускорения процесса заполнения карт рабочих режимов ЭРИ. В подсистему заложены все возможные формы карт рабочих режимов последней редакции РДВ.319.01.09-94 (2000). Результаты работы подсистемы – заполненные карты режимов ЭРИ – автоматически конвертируются программой в текстовый процессор WORD, где они могут быть отредактированы и распечатаны. Подсистема имеет необходимую базу данных, в которой находится информация о предельных значениях параметров ЭРИ, взятая из нормативно-технической документации (НТД).

Подсистема АСОНИКА-Б позволяет анализировать шкафы, блоки, печатные узлы, ЭРИ и решать следующие задачи: определение показателей безотказности всех ЭРИ; обоснование необходимости и оценка эффективности резервирования РТС.

Подсистема поддерживает: пассивное резервирование с неизменной нагрузкой; активное нагруженное резервирование; активное ненагруженное резервирование; активное облегчённое резервирование.

В результате моделирования могут быть получены эксплуатационные интенсивности отказов, вероятности безотказной работы и среднее время безотказной работы РТС. Сервисное обеспечение подсистемы АСОНИКА-Б включает в себя базу данных с математическими моделями для расчёта значений эксплуатационной интенсивности отказов ЭРИ и значениями коэффициентов, входящих в модели, а также редактор базы данных. Подсистема позволяет импортировать данные о составе конструкции из других САПР электроники (PCAD), а также тепловые и электрические характеристики ЭРИ из других подсистем системы АСОНИКА.

Подсистема АСОНИКА-УМ, предназначенная для управления моделированием РТС при проектировании, позволяет интегрировать САПР, внедрённые на предприятии (Pro/ENGINEER, P-CAD, АСОНИКА, КОМПАС, AutoCAD, PSpice и др.), и управлять передачей данных между подсистемами при моделировании в процессе конструкторского проектирования РТС. Подсистема интегрируется с любой используемой на предприятии PDM-системой. В ходе проектирования подсистема позволяет сформировать комплексную электронную модель РТС в рамках математических моделей тепловых, электрических, аэродинамических, механических процессов и математической модели надёжности и качества РТС.

Реализация описанной интеграции положила начало развитию и внедрению CALS-технологий на предприятиях радиоэлектронной и приборостроительной отраслей. Практические и инновационные результаты работы состоят в следующем. Интеграция программных продуктов позволяет выполнить сквозное автоматизированное проектирование РТС на основе комплексного моделирования физических процессов. Язык интерфейса пользователя с программами максимально приближен к языку разработчика РТС. На освоение предлагаемых программ требуется сравнительно малое время. При их внедрении достигается достаточно высокая скорость решения задач моделирования и значительная экономия материальных средств за счёт сокращения количества испытаний. Повышается надёжность и качество РТС, проектируемой на основе предлагаемой интегрированной САПР.

Информационная согласованность всей системы обеспечивается на уровне электронной модели РТС, информация в которой представлена в виде совокупности информационных объектов и взаимосвязей между ними, регламентированных стандартом ISO 10303 STEP, при отсутствии дублирования информации. В этом случае существует необходимость только в интерфейсах между каждой отдельно взятой подсистемой и подсистемой АСОНИКА-УМ. Данные интерфейсы позволяют преобразовать совокупность информационных объектов электронной модели РТС, описывающих исходные данные для целевой подсистемы, в файлы проекта данной подсистемы и, наоборот, преобразовать файлы проекта исходной подсистемы в совокупность информационных объектов электронной модели РТС и взаимосвязей между ними, регламентированных стандартом ISO 10303 STEP, гарантируя однозначность представления информации в электронной модели РТС.

Данное решение информационной согласованности обеспечивает гибкость структуры системы АСОНИКА. Таким образом, при обновлении и замене существующих подсистем, а также при добавлении новых подсистем в данную структуру необходимо провести изменения интерфейсов интеграции с подсистемой АСОНИКА-УМ только подсистем, подлежащих замене либо вводимых в

состав структуры. Сложность интерфейсов определяется используемыми в качестве компонентов сквозной САПР РТС программными системами.

Целью внедрения системы АСОНИКА является повышение эффективности работы структурных подразделений предприятия, приведение их в соответствие с современными мировыми и отечественными стандартами качества, сокращение сроков проектирования и разработки наукоёмких РТС, повышение надёжности разрабатываемых РТС.

Внедрение данного программного комплекса позволяет получить значительную экономию материальных средств за счет сокращения количества испытаний при внедрении предлагаемого программного обеспечения.

Таким образом, результатом внедрения системы АСОНИКА станет переход на принципиально новый уровень информационных технологий, что позволит расширить номенклатуру выпускаемой продукции, сократить сроки выхода на рынок новых изделий, снизить брак и затраты на производство.

1. Шалумов А.С., Кофанов Ю.Н., Куликов О.Е., Травкин Д.Н., Соловьев Д.Б., Першин О.Е. Динамическое моделирование сложных радиоэлектронных систем // Динамика сложных систем. – 2011. - № 3. - С.51-59.
2. Малов А.В., Шалумов А.С. Подсистема обеспечения стойкости радиоэлектронных средств на виброизоляторах к механическим воздействиям в составе САПР АСОНИКА // Успехи современной радиоэлектроники. - 2011. - № 1. - С.50-55.
3. Урюпин И.С., Шалумов А.С., Тихомиров М.В., Першин Е.О. Разработка алгоритма расчета надежности несущих конструкций изделий радиоэлектронной аппаратуры при механических воздействиях // Динамика сложных систем. – 2012. - № 3. - С.100-105.
4. Шалумов М. А., Шалумов А. С., Шалумова Н.А. Автоматизированная подсистема моделирования тепловых процессов в радиоэлектронных средствах произвольной конструкции // Динамика сложных систем. – 2013. - № 4. - С.76-82.
5. Автоматизированная система АСОНИКА для моделирования физических процессов в радиоэлектронных средствах с учетом внешних воздействий / Под ред. А.С. Шалумова. – М.: Радиотехника, 2013. – 424 с.
6. Моделирование радиоэлектронных средств с учетом внешних тепловых, механических и других воздействий с помощью системы АСОНИКА: монография / А. С. Шалумов, В. М. Ивашко, Н. В. Малютин, Ю. Н. Кофанов, Е. Ю. Тихонова; под ред. проф. А. С. Шалумова. – Минск: Военная академия Республики Беларусь, 2014. – 372 с.

*S.A. Gavrilenko, V.V. Davydchik, I.A. Eliseev, S.I. Sevastjanov*

**THE TIME-PROBABILITY MODELS AND METHODS FOR MOTIVATION OF THE COMPOSITION OF RECEIVING COMPLEX OF COMMUNICATIONS FOR COMPACT ROBOTIC SUBMARINE OBJECT**

*Publik Share Society «Information Telecommunication Technologies», Saint Petersburg  
zavit@bk.ru*

**Abstract**

For the determination of the expediency composition of the receiving complex of communications compact guided object proposed a mathematical model of the functioning, taking into account the conditions of environment, spatial and temporal features of the use of the object and the requirements for its communication facilities. Based on the model introduced performance indicators and proposed a logical and analytical method for the determination of their values at the assumptions.

Keywords: maritime mobile robot managed object type, on-board compact complex of receiving means of communications, the time-probability model, spatial and temporal features of the use of the object, requirement for its communication facilities, performance indicators, expediency composition, logical and analytical method

## ВЕРОЯТНОСТНО-ВРЕМЕННЫЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ СОСТАВА КОМПЛЕКСА ПРИЁМНЫХ СРЕДСТВ СВЯЗИ МАЛОГАБАРИТНОГО РОБОТИЗИРОВАННОГО ПОДВОДНОГО ОБЪЕКТА

Публичное акционерное общество «Информационные телекоммуникационные технологии», Санкт-Петербург, zavit@bk.ru

### Аннотация

Для определения целесообразного состава бортового приёмного комплекса средств связи малогабаритного подвижного управляемого объекта роботизированного типа предложена математическая модель функционирования, учитывающая условия обстановки, пространственно-временные особенности движения объекта и требования к использованию средств связи. На основе модели введены показатели эффективности и предложен логико-аналитический метод определения их значений при принятых допущениях.

Ключевые слова: малогабаритный подводный объект роботизированного типа, бортовой комплекс приёмных средств связи, математическая модель функционирования, пространственно-временная модель, особенности движения объекта, требования к средствам связи, показатель эффективности, целесообразный состав, логико-аналитический метод.

### Постановка задачи и описание модели

При создании маломерных роботизированных объектов двойного назначения, к которым относятся и плавучие роботизированные комплексы морского базирования (РТК МБ), включая автономные необитаемые катера и автономные необитаемые подводные аппараты, большое внимание уделяется бортовым средствам управления и связи. Часть объёма объекта (РТК МБ), ресурса электроэнергии и лимита финансирования выделяется для средств управления и связи.

Одной из важнейших задач таких средств является обеспечение приёма сообщений от передающих радиосредств пункта управления [1-5].

Технический облик бортовых приёмных средств связи определяется, как правило, на этапе проектирования и создания РТК МБ, исходя из требований к массогабаритным характеристикам средств, их электропотреблению, условиям и режимам использования, а также к стоимости создания и срокам изготовления.

Состав комплекса управления и связи РТК МБ, обеспечивающего выполнение всей совокупности функциональных требований, формируется на базе существующих или вновь разрабатываемых технических средств, каждое из которых обеспечивает, как правило, частичное достижение требований, предъявляемых к управлению объектом.

В общей постановке задача состоит в формировании состава комплекса средств управления и связи, обеспечивающего выполнение всей совокупности требований к функциональным возможностям комплекса при выполнении ограничений на массогабариты, энергопотребление, стоимость. Решение этой задачи предполагает задание целевой функции и определение показателей эффективности, в качестве которых предлагается использовать вероятностно-временные и пространственные характеристики, обусловленные ожидаемыми состояниями РТК МБ и условиями использования бортового комплекса управления и связи.

РТК МБ может находиться в заданных районах акватории и, двигаясь на различных глубинах, принимать на свои средства связи сообщения от береговых передающих центров.

Пусть имеется конкурирующих  $N$  реализаций (вариантов) средств связи, которые могут быть использованы для создания бортового комплекса средств связи объекта. Каждое  $n$ -ое средство ( $n=1, \dots, N$ ) описывается функциональными и ресурсными характеристиками.

К функциональным могут быть отнесены вероятностно-временные ( $P_n, T_n$ ) и пространственные ( $D_n, H_n$ ) характеристики средства, содержание которых описано ниже.

К ресурсным относятся массогабаритные ( $M_n, V_n$ ), энергетические ( $W_n$ ) и стоимостные ( $C_n$ ) характеристики  $n$ -го средства, где:

$V_n$  - объём (с учётом конфигурации и размеров: длины, ширины, высоты);

$M_n$  - масса;

$W_n$  - потребляемая мощность;

$C_n$  - стоимость разработки и изготовления.

Из числа  $N$  возможных приёмных средств с известными характеристиками требуется составить (сформировать) бортовой комплекс связи объекта, отвечающий функциональным требованиям, а также массогабаритным и ресурсным ограничениям.

Дадим формализованное описание модели.

**Задача формирования состава бортового комплекса** средств связи состоит в нахождении по меньшей мере одного набора средств

$$K=(n_1, n_2, \dots, n_i, \dots, n_k), \quad (1)$$

из числа  $N$  имеемых средств ( $1 \leq i \leq N$ ,  $1 \leq n_i \leq N$ ,  $1 \leq k \leq N$ ), обеспечивающего достижение требуемых значений функциональных характеристик (вероятностных ( $P_{тр}$ ), временных ( $T_{тр}$ ) и пространственных: дальности ( $d_{тр}$ ) и глубины связи ( $h_{тр}$ ):

$$P \geq P_{тр}, T \leq T_{тр}, d \geq d_{тр}, H \geq h_{тр} \geq h \geq 0, \quad (2)$$

(где  $H$  и  $h$ - предельная и текущая глубины погружения объекта) при выполнении ограничений к совокупным ресурсным характеристикам ( $M_{max}, V_{max}, W_{max}, C_{зад}$ ) комплекса средств.

Ограничение по суммарному объёму (размерениям) средств бортового комплекса состоит в выполнении условия:

$$\sum_{n=1}^k V_n \leq V_{доп}. \quad (3)$$

Условия выполнения ограничений по массе, потребляемой мощности и по стоимости комплекса имеют вид:

$$\sum_{n=1}^k M_n \leq M_{доп}; \sum_{n=1}^k W_n \leq W_{доп}; \sum_{n=1}^k C_n \leq C_{зад}. \quad (3.1)$$

При этом, если для использования  $n$ -го средства на  $h$ -ой глубине потребуется дополнительное дооборудование РТК МБ, то это может быть учтено в общей стоимости  $n$ -ого средства ( $C_n$ ) добавлением к стоимости основной части средства стоимости дооборудования носителя для обеспечения связи на  $h$ -ой глубине:

$$C_n = C_{on}^{(1)} + \sum_{h=1}^H C_{onh}^{(2)}, \quad (4)$$

где:  $C_{on}^{(1)}$  – стоимость основной части  $n$ -го средства (учитывающая, при необходимости, стоимость выполнения НИОКР и создания опытных образцов, стоимость изготовления серийного образца и стоимости его эксплуатации);

$C_{onh}^{(2)}$  – стоимость дооборудования объекта для использования (дополнительной части) средства для  $h$ -ой глубины.

Решение данной задачи предполагает определение показателя эффективности. С этой целью подробнее рассмотрим структуру вышеназванных характеристик и установим взаимосвязь между ними с помощью математической модели функционирования комплекса, условно состоящей из двух связанных между собой логико-аналитических моделей: вероятностно-временной модели функционирования отдельных средств связи и пространственно-временной модели функционирования комплекса средств связи.

### **Модель и метод определения вероятностно-временных характеристик функционирования комплекса средств связи**

Приёму  $n$ -ым средством сообщения заданной длины (объёма) может предшествовать приведение средства в готовность (техническую и оперативную, [6]) путём выполнения ряда подготовительных действий, таких как: включение, проверка и приведение в готовность основных технических и программных элементов средства, развёртывание и подключение антенных устройств, обеспечивающих его использования на заданной глубине, а также, возможно, выполнение ряда других подготовительных действий, к основным из которых можно отнести установление энергетического контакта передающих и приёмных средств и синхронизацию процессов приёма-передачи. В свою очередь, синхронизации может предшествовать проверка связи и, возможно, запрос пароля.

Обозначим:

$t_{гопnh}$  – время необходимое для приведения  $n$ -го средства в готовность к использованию на  $h$ -ой глубине;

$P_{эnh}$  - вероятность (наличия, установления) энергетического контакта  $n$ -го средства на  $h$ -ой глубине с передающим береговым объектом за время не более  $t$ , задаваемая формулой:

$$P_{эnh}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } t \geq t_{энерг\text{ конт}} \\ 0, & \text{если } t < t_{энерг\text{ конт}} \end{cases} \quad (5)$$

где  $t_{\text{энерг}} = f(n, h)$  – время, необходимое для установления энергетического контакта  $n$ -ым средством на  $h$ -ой глубине; (здесь и ниже  $f$  – обозначение функциональной зависимости);

$P_{\text{пс}_{nh}}(t)$  – вероятность проверки связи  $n$ -го средства на  $h$ -ой глубине с передающим береговым объектом за время не более  $t$ , задаваемая формулой:

$$P_{\text{пров}_{nh}}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } t \geq t_{\text{пров}} \\ 0, & \text{если } t < t_{\text{пров}} \end{cases}, \quad (6)$$

где  $t_{\text{пров}} = f(n, h)$  – время, необходимое для проверки связи  $n$ -ым средством на  $h$ -ой глубине;

$P_{\text{синхр}_{nh}}$  – вероятность синхронизации процессов приёма-передачи сообщения (между ПРД и ПРМ)  $n$ -го средства на  $h$ -ой глубине за время не более  $t$ , определяемая по формуле:

$$P_{\text{синхр}_{nh}}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } t \geq t_{\text{синхр}} \\ 0, & \text{если } t < t_{\text{синхр}} \end{cases}, \quad (7)$$

где  $t_{\text{синхр}} = f(n, h)$  – время, необходимое для синхронизации действий приёмных и передающих средств в процессе приёма-передачи сообщения  $n$ -ым средством на  $h$ -ой глубине.

В совокупности перечисленные действия определяют время, необходимое для установления связи:

$$t_{\text{устан}_{nh}} = t_{\text{энерг}} + t_{\text{пров}} + t_{\text{синхр}}. \quad (8)$$

Если  $\bar{t}_{nh0}$  – момент наступления готовности  $n$ -го средства к началу приёма, то момент времени завершения однократного приёма сообщения будет равен

$$\bar{t}_{nh1} = \bar{t}_{nh0} + t_{\text{устан}_{nh}} + t_{1nh} = \bar{t}_{nh0} + \Delta t_{1nh}, \quad (9)$$

где:

$t_{1nh}$  – время однократного приёма сообщения заданной длины  $n$ -ым средством на  $h$ -ой глубине с заданной достоверностью;

$$\Delta t_{1nh} = t_{\text{устан}_{nh}} + t_{1nh};$$

Введём также вероятностные характеристики этих временных величин:

$P_{1nh}$  – вероятность приёма сообщения  $n$ -ым средством за время  $t_{1nh}$  на  $h$ -ой глубине;

$\bar{P}_{0nh}$  – вероятность готовности  $n$ -ого средства к приёму сообщения на  $h$ -ой глубине;

$\bar{P}_{1nh}$  – вероятность приёма сообщения  $n$ -ым средством за время  $\bar{t}_{nh1}$ .

(При этом величины  $t_{1nh}$  и  $P_{1nh}$ , как известно, [5, 6], зависят, от таких характеристик как расстояние между передатчиком и приёмником, мощность передатчика, чувствительность приёмника, направленность антенны и состояние радиотрассы).

Связь между этими вероятностями имеет вид:

$$\bar{P}_{1nh} = \bar{P}_{0nh} \cdot P_{\text{устан}_{nh}} \cdot P_{1nh} \quad (10)$$

Если  $n$ -ое средство находится в состоянии готовности и в формулах (5)-(7) выполнены условия  $t \geq t_{\text{энерг}}$ ,  $t \geq t_{\text{пров}}$ ,  $t \geq t_{\text{синхр}}$ , то  $P_{\text{устан}_{nh}} = 1$  и вероятность приёма сообщения  $n$ -ым средством за время  $t_{1nh}$  на  $h$ -ой глубине с учётом подготовительных действий в (10) составит:  $\bar{P}_{1nh} = P_{\text{устан}_{nh}} \cdot P_{1nh} = P_{1nh}$ .

Используя введённые величины, определим вероятностно-временные показатели эффективности.

Вероятность приёма (доведения) сообщения одним  $n$ -ым средством на глубине  $h$  за время не более  $t$  определим формулой:

$$P_{\text{дов}_{nh}}(t) = \begin{cases} 1 - (1 - P_{1nh})^{m_{nh}}, & \text{если } t \geq t_{1nh} \\ 0, & \text{если } t < t_{1nh} \end{cases}, \quad (11)$$

где количество (кратность) циклов приёма за время  $t$  определяется как  $m_{nh} = \text{целое}(t / t_{1nh})$ .

За показатель возможностей  $n$ -го средства примем вероятность приёма сообщения  $n$ -ым средством хотя бы на одной глубине, определяемую формулой:

$$P_{\text{дов}_n}(t) = 1 - \prod_{h=1}^H (1 - P_{\text{дов}_{nh}}(t)), \quad (12)$$

где  $n$ -ое средство на глубине  $h$  ( $h=1, \dots, H$ ) за время  $t$  выполняет  $m_{nh}$  циклов приёма.

Для комплекса из  $N$  средств вероятность приёма (доведения) на глубине  $h$  хотя бы одним средством определяется формулой:

$$P_{\text{дов}_h}(t) = 1 - \prod_{n=1}^N (1 - P_{\text{дов}_{nh}}(t)), \quad (13)$$

где каждое средство на глубине  $h$  ( $h=1, \dots, H$ ) за время  $t$  выполняет  $m_{nh}$  циклов приёма.

(В (12) и (13), для простоты записи,  $P_{\text{дов}_n}(t)$  и  $P_{\text{дов}_h}(t)$  обозначают разные величины соответственно буквам индексов).

За показатель возможностей комплекса из  $N$  средств примем вероятность приёма сообщения комплексом (доведения до комплекса) хотя бы одним средством хотя бы на одной глубине:

$$P_{\text{ДОВ}}(t) = 1 - \prod_{h=1}^H (1 - P_{\text{ДОВ}_h}(t)). \quad (14)$$

### Модель для определения показателей дальности связи комплекса средств

Дальность  $d_{nh}$  приёма сообщения  $n$ -ым средством связи в условиях конкретного района на заданной  $h$ -ой глубине зависит [7, 8], от множества факторов  $x_1, \dots, x_g$ , влияющих на соотношение сигнал/помеха  $W_c/W_{\text{п}}$  в точке приёма (при заданных чувствительности приёмника, направленности антенны, скорости объекта и других заданных характеристиках):

$$d_{nh} = f(W_c/W_{\text{п}}, v_h, x_1, \dots, x_g), \quad (15)$$

Дальность приёма сообщения  $n$ -ым средством на  $h$ -ой глубине в заданных условиях за один цикл приёма (с одной передачей) обозначим через  $d1_{nh}$ .

Если полагать, что дальность связи зависит только от глубины связи (и не зависит от количества передач), то  $d1_{nh} \equiv d_{nh} = \text{const}$  для каждого средства для каждой глубины), и на глубине  $h$  предельная дальность связи будет определяться наибольшим значением дальности средств:

$$d_h = d_{n^*h} = \max_n d1_{nh}, \quad (16)$$

где: для каждой глубины  $h=1, \dots, H$   $\max$  берётся по  $n=1, \dots, N$ ;

$n^*$  - номер средства, для которого выполнено (16).

Из (16) следует, что  $d_{h_1} \geq d_{h_2}$  при  $0 \leq h_1 \leq h_2 \leq H$ .

(То есть с увеличением глубины погружения дальность связи уменьшается (не увеличивается) по ступенчатому или кусочно-линейному типу зависимости, соответственно выбранному способу аппроксимации).

Эти зависимости являются монотонными и характеризуют предельно достижимые дальности связи («лучшими») средствами комплекса данного состава, но не учитывают возможности остальных средств комплекса, то есть не вполне отражают осуществимость (вероятность достижения) этих значений дальности.

Рассмотрим метод оценки дальности приёма комплекса средств связи фиксированного состава с учётом вероятностно-временных характеристик средств, составляющих комплекс.

### Метод оценки зависимости ожидаемой дальности связи от глубины приёма

Полагая, что каждого значения  $h$  средства упорядочены по возрастанию дальности приёма:

$$d_{n_1h} \leq \dots \leq d_{n_Nh}, \quad (17)$$

примем, что для  $n$ -го средства и конкретного значения дальности  $d$  величина вероятности доведения  $P_{\text{ДОВ}_{nh}}(t)$  зависит от  $t$  и  $d$  следующим образом (для каждого  $n$  и  $h$ ):

$$P_{\text{ДОВ}_{nh}}(t, d) = \begin{cases} P_{\text{ДОВ}_{nh}}(t), & \text{если } d_{(n-1)h} < d \leq d_{nh} \\ 0, & \text{если } d_{n_1h} \leq d \end{cases}. \quad (18)$$

Аналогичный показатель для комплекса из  $N$  средств для конкретного значения  $d$  вероятность  $P_{\text{ДОВ}_h}(t)$  доведения на глубине  $h$  хотя бы одним средством из  $n$  имеемых в комплексе определим по формуле:

$$P_{\text{ДОВ}_h}(t, d) = 1 - \prod_{n=1}^N (1 - P_{\text{ДОВ}_{nh}}(t, d)) \quad (19)$$

при  $d < d_{n=N_1h}$  и  $h=1, \dots, H$ .

При этом в  $P_{\text{ДОВ}_{nh}}(t, d)$  могут быть учтены перечисленные в (7), (8) характеристики готовности средств связи:

$$P_{\text{Гот}_{nh}}(t) = P_{\text{разв АФУ}_{nh}}(\bar{t}_1) \cdot P_{\text{Э}_{nh}}(\bar{t}_2) \cdot P_{\text{пров}_{nh}}(\bar{t}_3) \cdot P_{\text{синхр}_{nh}}(\bar{t}_4), \quad (20)$$

где:  $t = \bar{t}_1 + \bar{t}_2 + \bar{t}_3 + \bar{t}_4$ .

Для частного случая, когда эти множители не зависят от  $t$ , т.е. являются постоянными коэффициентами,  $P_{\text{Гот}_{nh}}(t)$  также не зависит от  $t$ . (В противном случае можно использовать функцию «свёртки» или допускать, что закон распределения вероятности позволяет суммировать математическое ожидание и дисперсию случайных величин от времени, [9, 10]. Если при этом надо учесть задержку времени, то можно строить модель с суперпозицией (наложением) временных величин, [10]).

Таким образом, вероятность приёма сообщения комплексом на заданном удалении  $d$  на  $h$ -ой глубине равна:

$$P_{\text{ДОВ}_h}(t, d) = 1 - \prod_{n=1}^N (1 - P_{\text{ДОВ}_{nh}}(t, d)). \quad (21)$$

Для  $h_1 \leq h_2$  имеем  $0 \leq P_{\text{ДОВ}_{h_2}}(t) \leq P_{\text{ДОВ}_{h_1}}(t) \leq 1$ .

Совокупность  $\vec{P}(t, d) = \{P_{\text{ДОВ}_{h=1}}(t, d), \dots, P_{\text{ДОВ}_{h=H}}(t, d)\}$  характеризует возможности комплекса связи на различных глубинах для удаления  $d$ .

Предпочтительным из двух комплексов  $K^{(1)}=(n_1^{(1)}, n_2^{(1)}, \dots, n_i^{(1)}, \dots, n_k^{(1)})$ ,  $K^{(2)}=(n_1^{(2)}, n_2^{(2)}, \dots, n_i^{(2)}, \dots, n_k^{(2)})$ , может считаться тот, у которого каждая компонента  $P_{\text{дов}_h}(t, d)$  в (21) принимает большее значение:

$$\vec{P}^{(1)}(t, d) \geq \vec{P}^{(2)}(t, d) \text{ для всех } t \geq 0. \quad (22)$$

В качестве менее строгого признака предпочтительности комплекса можно принять превышения суммы его компонент  $P_{\text{дов}_h}(t, d)$ :

$$P^{(1)}(H) \geq P^{(2)}(H). \quad (23)$$

где:  $P^{(i)}(H) = \sum_h^H P_{\text{дов}_h}^{(i)}(t, d)$ ,  $i=1; 2$ .

При этом среди комплексов  $K^{(i)}$ , удовлетворяющих последнему признаку, лучшим можно считать тот  $K^{(i^*)}$ , у которого неравенство (23) выполнено для заданной части интервалов глубин  $\Delta h = \{h_1, h_2, \dots\}$ :

$$P^{(i^*)}(\Delta h) = \max_{1 \leq i \leq I} P^{(i)}(\Delta h), \quad (24)$$

где  $I$  – возможное количество комплексов.

Наконец, обобщающим показателем эффективности комплекса может служить итоговая вероятность приёма сообщения комплексом на заданном удалении  $d$  хотя бы на одной глубине  $h$ ):

$$P_{\text{дов}}(t, d) = 1 - \prod_{h=1}^H (1 - P_{\text{дов}_h}(t, d)). \quad (25)$$

Из (21)-(25) следует, что для фиксированной глубины погружения, с одной стороны, возможно, происходит уменьшение вероятности доведения с увеличением длины трасс связи, вследствие сокращения числа используемых при этом средств связи, и, с другой стороны, - приращение вероятности доведения при увеличении времени связи.

### Конкретизация постановки задачи и метод её решения

В зависимости от целей исследования возможны различные варианты постановки рассматриваемой задачи, в том числе:

А) по показателю вероятность доведения (приёма) сообщения за время не более требуемого (заданного):

1) найти состав комплекса, обеспечивающего наибольшую вероятность доведения сообщения за время не более требуемого (заданного) в заданной географической точке акватории (на заданной глубине и заданной дальности);

2) найти состав комплекса, обеспечивающего наибольшую вероятность доведения сообщения за время не более требуемого (заданного) на глубине не менее заданной, на заданную дальность;

3) найти состав комплекса, обеспечивающего наибольшую вероятность доведения сообщения за время не более требуемого (заданного) на дальность, не менее заданной, на заданной глубине;

Б) по показателю дальность приёма (доведения) сообщения:

1) найти состав комплекса, обеспечивающего наибольшую дальность (расстояние) связи на заданной глубине, при удовлетворении требований к значениям ВВХ доведения сообщения и ресурсным характеристикам;

2) найти состав комплекса, обеспечивающего наибольшую глубину связи на заданном расстоянии, при удовлетворении требований к значениям ВВХ доведения сообщения и ресурсным характеристикам.

Общая схема решения задачи предполагает выполнение следующих операций:

1. Из имеющегося перечня средств (каналов) связи формируются возможные варианты состава комплекса.

2. Из дальнейшего рассмотрения исключаются варианты, не удовлетворяющие требованиям по МГХ и электропотреблению (при этом ограниченность количества вариантов упрощает процедуру выбора).

3. В зависимости от располагаемой исследователем информацией, в соответствии с принятой постановкой задачи выбирается (формируется) показатель эффективности и конкретизируются критерии выбора вариантов.

Например, выбираются варианты состава, обеспечивающие наибольшую (требуемую) дальность (или глубину) связи, или варианты состава, обеспечивающие наибольшую вероятность доведения сообщения для заданной (фиксированной) дальности.

4. Оценивается стоимость вариантов комплекса и в дальнейшем не рассматриваются варианты, не удовлетворяющие требованиям по стоимости.

5. По вышеприведённым формулам оценивается эффективность вариантов состава и выбираются варианты, удовлетворяющие требованиям использования по назначению в возможных условиях обстановки и ситуациях использования.

При этом, однако, возможны конкретные требования Заказчика по значениям исходных данных и некоторым ограничениям, при которых задача может иметь несколько решений или не иметь ни одного. В этом случае целесообразно проведение повторных расчётов с итерационным уточнением значений исходных данных.

### **Выводы**

Предложенный подход к моделированию процесса доведения сообщения до РТК МБ является достаточно общим и может быть использован для широкой номенклатуры средств связи, а метод решения задачи доступен для практической реализации. В результате выполнения предложенных действий может быть найдено оптимальное или целесообразное решение задачи.

1. Катанович А.А., Тамодин Н.В. Системы связи ВМФ.- СПб.: Судостроение, 2012, 256 с.
2. Агеев М.Д. Автономные подводные роботы. М.: Наука, 2005. – 398 с.
3. Николашин Ю.Л., Мирошников В.И., Будко П.А., Жуков Г.А. Обеспечение устойчивого обмена данными с автономными необитаемыми подводными аппаратами.//Морская радиоэлектроника. 2016, № 1, с. 44-49.
4. Мартынова Л.А., Машошин А.И., Пашкевич И.В., Соколов А.И. Система управления – наиболее сложная часть автономных необитаемых подводных аппаратов. Морская радиоэлектроника, №4(54), 2015, с. 27-33.
5. Мартынова Л.А., Машошин А.И. Особенности оценки эффективности АНПА в нештатных ситуациях. Труды МНТК «Экстремальная кибернетика», 24-26.11.2016 г., с.86-91.
6. ГОСТ 27.002-89 Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения.
7. Черенкова Е.Л., Чернышев О. В. Распространение радиоволн. — М.: Радио и связь, 1984. — 272 с.
8. Сомов А.М. Распространение радиоволн / А. М. Сомов, В. В. Старостин. — М.: Гелиос АРВ, 2010. — 264 с.
9. Вентцель Е.С. Исследование операций. М., Советское радио, 1972, - 552 с.
10. Абезгауз Г.Г. и др. Справочник по вероятностным расчётам. М., Воениздат, 1970.

*Д.Н. Степанов, Е.Ю. Смирнова*

**МЕТОД КОРРЕКЦИИ ОЦЕНКИ ПОЛОЖЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА С  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИЗУАЛЬНОЙ ЛОКАЦИИ ЕСТЕСТВЕННЫХ ОРИЕНТИРОВ**

*ЦНИИ РТК, г. Санкт-Петербург  
E-mail: dnstepanov@rtc.ru*

**Аннотация**

В статье представлен подход к использованию визуальной локации известных ориентиров для повышения точности навигации беспилотного транспортного средства (БТС). Подход основывается на анализе изображений от одной или нескольких телевизионных камер БТС, и применении фильтра Калмана для коррекции навигационной оценки по визуальной локации. Ключевыми достоинствами является возможность коррекции положения и ориентации БТС по любому количеству ориентиров (начиная с одного), а также возможность использования произвольного количества камер. Проведенные экспериментальные исследования показали, что метод позволяет достичь погрешностей по смещению в плоскости дороги порядка 10 см и менее  $1^\circ$  по углу ориентации БТС.

Ключевые слова: мобильный робот, автономное транспортное средство, визуальная навигация, визуальная локация, техническое зрение, фильтр Калмана, комплексирование

**Введение**

Задача определения положения беспилотного автомобиля при движении по дорогам общего пользования в настоящее время чаще всего решается с применением комплекса дорогостоящих многолучевых лазерных дальномеров (лидаров). Активное развитие систем технического зрения позволяет создавать значительно менее дорогие и громоздкие системы, базирующиеся на анализе изображений от телевизионных камер МР. В ряде случаев такие системы по-прежнему ориентируются на применение относительно дешевых однолучевых лидаров небольшого радиуса действия для контроля положения транспортного средства на проезжей части. Однако существуют ситуации, когда такой дальномер использован быть не может – например, при проезде перекрестков он не позволяет определить края проезжей части и дорожной разметки. В таких ситуациях МР приходится полагаться только на использование GPS (ГЛОНАСС) и внутренних сенсоров – одометров и БИНС [5] Это ограничивает точность прохождения перекрестков, приводит к резкому маневрированию при выезде с перекрестка (когда лидар снова может быть применен для определения полосы движения) и потенциально может приводить к столкновениям с дорожной инфраструктурой.

**Обзор существующих решений**

Система технического зрения позволяет парировать указанные недостатки и в целом повышать точность навигации. Ряд известных публикаций предлагает использовать для визуальной локации маркеры специального типа – пассивные или активные [3]. Несмотря на очевидные преимущества специально разработанных маркеров – их надежное обнаружение при относительно небольших вычислительных затратах, размещение таких маркеров обычно затруднительно как в помещениях, где работают люди (например, из соображений эргономики), так и в условиях открытой местности. Поэтому актуальной является задача использования для навигации «естественных» визуальных ориентиров, которые уже существуют в рабочей зоне МР.

Известными подходами применения СТЗ для навигации без специальных маркеров являются визуальный SLAM [12] и визуальная одометрия [1], однако они не позволяют достигать необходимых точностей, особенно при маневрировании на месте, когда движение камер МР является в значительной степени вращательным. При наличии карты визуальных ориентиров возможно применение СТЗ для определения направлений на такие ориентиры в каждый момент времени. Существующие решения предлагают решение частных задач при ограничении на минимальное необходимое количество ориентиров. Так, в [11] представлено решение задачи определения только ориентации МР (1 координата) с использованием 3 и более ориентиров.

Предлагаемый подход основан на применении расширенного фильтра Калмана для эффективного комплексирования данных «традиционной» навигационной системы и визуальной локации произвольного количества ориентиров. При этом прогноз положения МР осуществляется с использованием одометрии («традиционной» навигационной системы МР в общем случае), а информация, получаемая при наблюдении ориентиров, используется для коррекции оценки положения.

Основные подходы к проблеме обнаружения произвольных ориентиров изложены в публикациях [16, 10, 13, 6]. Одним из лучших по производительности и качеству обнаружения объектов алгоритмов по данным разных исследований на данный момент является каскадный классификатор, основанный на принципах, заложенных в [16]. Актуальной альтернативой являются также нейронные сети глубокого обучения [8], однако для их эффективного обучения необходимо использовать очень большие наборы исходных данных (образцов объектов). Наши экспериментальные исследования [7] показывают, что при ограниченной обучающей выборке (до нескольких тысяч образцов на класс) каскадные классификаторы имеют преимущество перед нейронными сетями. Нейронные сети эффективно использовать для широко распространенных ориентиров, таких как дорожные знаки, светофоры и т.п.

### Модель движения мобильного робота

В качестве наиболее близкой модели движения используемого транспортного средства выбрана модель с поворотными передними колесами (Ackermann Steering Model) [15], показанная на рисунке 1.

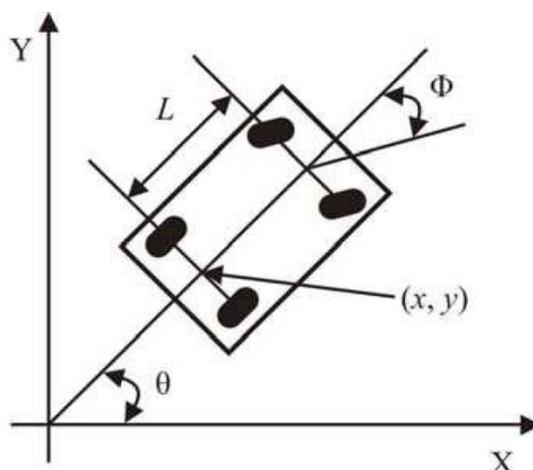


Рисунок 1– Модель транспортного средства с поворотными колесами

Кинематические уравнения движения определяются формулами:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= V \cos \theta, \\ \dot{y} &= V \sin \theta, \\ \dot{\theta} &= \frac{V \tan \Phi}{L}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $X = (x, y, \theta)$  – координаты транспортного средства,  $V$  – скорость движения,  $L$  – расстояние между задней и передней осями,  $\Phi$  – угол поворота колес (steering angle).

Записывая уравнения в приращениях относительно временного шага  $\Delta t$ , получим изменение вектора состояния при переходе от шага  $k$  к шагу  $k+1$  (нелинейная модель движения):

$$X_k = \begin{bmatrix} x_{k+1} \\ y_{k+1} \\ \theta_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_k + \Delta t V \cos \theta_k \\ y_k + \Delta t V \sin \theta_k \\ \theta_k + \frac{\Delta t V \tan \Phi_k}{L} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Вектор управления имеет вид:

$$u_k = \begin{bmatrix} V_k \\ \Phi_k \end{bmatrix} + w_k, \quad (3)$$

$$w_k = N\left(0, \begin{bmatrix} \sigma_V^2 & 0 \\ 0 & \sigma_\Phi^2 \end{bmatrix}\right),$$

где  $V_k$  – скорость движения,  $\Phi_k$  – угол поворота колёс,  $w_k$  – ошибка обработки управления (нормальное двумерное распределение с нулевым средним).

Поскольку экспериментальное транспортное средство не оснащено датчиком скорости, в качестве оценки  $V_k$  мы используем среднее изменение показаний двух одометров за время  $\Delta t$  :

$$V_k = \frac{2\pi A_k r_{wheel}}{N \Delta t}, \quad (4)$$

где  $A_k$  – среднее изменение показаний двух одометров за время  $\Delta t$ ,  $r_{wheel}$  – радиус колеса,  $N$  – число отсчётов одометра на один полный оборот колеса.

Для определения угла поворота колёс  $\Phi_k$  используются данные датчика положения линейного актуатора и эмпирическую функцию пересчета этих данных в угол поворота.

### Формулировка расширенного фильтра Калмана для визуальной локации

Поскольку модель движения (и наблюдений в случае использования коррекции по направлениям на ориентиры) является нелинейной, для прогноза и коррекции положения необходимо использовать обобщенный (расширенный) фильтр Калмана – Extended Kalman Filter [9].

Задание начального состояния ЕКФ выполняем следующим образом. Положение транспортного средства в начальный момент времени описывается, как:

$$X_0 = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ \theta_0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Реальное положение известно с ошибкой. Достоверность оценки начального положения описывается начальным состоянием ковариационной матрицы ошибок  $P$ :

$$P_0 = \begin{bmatrix} \sigma_{x_0}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{y_0}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\theta_0}^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Шаг прогноза (time update) расширенного фильтра Калмана формулируется как:

$$\hat{X}_k^- = f(\hat{X}_{k-1}^-, u_{k-1})$$

$$P_k^- = F_k P_{k-1} F_k^T + W_k Q_{k-1} W_k^T, \quad (7)$$

где  $\hat{X}_{k-1}^-$  – вектор состояния в момент времени  $k-1$ ,  $\hat{X}_k^-$  – вектор состояния в момент времени  $k$ ,  $u_{k-1}$  – вектор управления,  $f$  – функция движения,  $P_k^-$  – ковариационная матрица ошибок после прогноза,  $P_{k-1}$  – ковариационная матрица ошибок до прогноза,  $W_k$  – якобиан частных производных функции  $f$  по отношению к вектору управления,  $F_k$  – якобиан  $f$  по отношению к вектору состояния.

В рассматриваемом случае:

- матрица ковариаций ошибок управления

$$Q_k = Q = \begin{bmatrix} \sigma_V^2 & 0 \\ 0 & \sigma_\Phi^2 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

- якобиан по отношению к вектору состояния

$$F_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -V_k \Delta t \cos \theta_k \\ 0 & 1 & V_k \Delta t \sin \theta_k \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

- якобиан по отношению к вектору управления

$$W_k = \begin{bmatrix} \Delta t \cos \theta_k & 0 \\ \Delta t \sin \theta_k & 0 \\ \frac{\Delta t \tan \Phi_k}{L} & \frac{\Delta t V_k \sec^2 \Phi_k}{L} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Наблюдения (угловые координаты визуальных ориентиров) применяются на шаге коррекции ЕКФ (measurement update), который выполняется асинхронно с шагом прогноза, в соответствии с частотой обработки кадров. Коррекция применяется к моменту времени, когда был получен кадр с обнаруженным ориентиром.

В общем виде функция наблюдений записывается в виде:

$$z_k = h(x_k, v_k). \quad (11)$$

Здесь  $v_k$  – вектор ошибки наблюдений, имеющий нормальное гауссово распределение с матрицей ковариаций  $R_k$ .

В случае непосредственной локации  $m$  визуальных ориентиров с угловыми координатами  $\alpha_i, i=1..m$  имеем:

$$z_k = \alpha_i = \frac{yb_i - y_k}{xb_i - x_k} - \theta_k, \quad (12)$$

где  $(xb_i, yb_i)$  – координаты ориентира  $i=1..m$ .

Шаг коррекции в такой формулировке выполняется последовательно для всех  $m$  ориентиров, угловые координаты которых определены для кадра, полученного в момент времени  $k$ .

Коррекция оценки вектора состояния из априорной оценки в апостериорную  $\hat{x}_k^- \rightarrow \hat{x}_k^+$  выполняется в соответствии с формулами:

$$\begin{aligned} \hat{x}_k^+ &= \hat{x}_k^- + K_k (z_k - h(\hat{x}_k^-)) \\ K_k &= P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R_k)^{-1} \\ P_k^+ &= (I - K_k H_k) P_k^- \end{aligned} \quad (15)$$

Здесь  $K_k$  – коэффициент обратной связи (Kalman Gain),  $h$  – функция наблюдений, вычисленная для априорной оценки положения,  $\hat{x}_k^-$ ,  $P_k^-$  – априорное значение ковариационной матрицы ошибок (после шага прогноза),  $P_k^+$  – апостериорное значение ковариационной матрицы ошибок,  $I$  – единичная матрица,  $H_k$  – якобиан частных производных функции наблюдений  $h$ , вычисленный по отношению к вектору состояний  $X$ ,  $R_k$  – матрица ковариаций наблюдений.

В случае непосредственного визирования ориентиров получим:

Соответствующий якобиан в частных производных имеет вид:

$$H_k = \frac{\begin{bmatrix} y_b - L \sin \theta - T \cos \theta - y \\ (x_b - L \cos \theta + T \sin \theta - x)^2 \frac{(y_b - L \sin \theta - T \cos \theta - y)^2}{(x_b - L \cos \theta + T \sin \theta - x)^2} + 1 \end{bmatrix}}{\frac{1}{(x_b - L \cos \theta + T \sin \theta - x) \frac{(y_b - L \sin \theta - T \cos \theta - y)^2}{(x_b - L \cos \theta + T \sin \theta - x)^2} + 1}},$$

$$\frac{\frac{T \sin \theta - L \cos \theta}{x_b - L \cos \theta + T \sin \theta - x} - (L \sin \theta + T \cos \theta) \frac{y_b - L \sin \theta - T \cos \theta - y}{(x_b - L \cos \theta + T \sin \theta - x)^2} - 1}{\frac{(y_b - L \sin \theta - T \cos \theta - y)^2}{(x_b - L \cos \theta + T \sin \theta - x)^2} + 1}},$$

$R_k = [\sigma_\alpha^2]$  - дисперсия угла визирования ориентира.

Основными параметрами описанного фильтра Калмана являются:

- достоверность начальной оценки положения – матрица ковариаций оценки начального положения

$$P_0 = \begin{bmatrix} \sigma_{x_0}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{y_0}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\theta_0}^2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

- достоверность прогноза (управления) – матрица ковариаций управления

$$Q = \begin{bmatrix} \sigma_V^2 & 0 \\ 0 & \sigma_\Phi^2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

- достоверность измерения направления на ориентир – дисперсия оценки углового положения ориентира

$$R_k = [\sigma_\alpha^2] \quad (18)$$

- достоверность определения угла ориентации робота – дисперсия оценки угла ориентации

$$R_k = [\sigma_\tau^2] \quad (19)$$

- достоверность определения положения робота – ковариационная матрица оценки положения

$$R_k = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & 0 \\ 0 & \sigma_y^2 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

Помимо этого, необходимо учитывать наличие ошибки в построении карты, что на уровне модели представляется в виде стандартного отклонения координат маркера на плоскости  $\sigma_{\text{map}}$ . Эта величина не участвует в вычислениях фильтра Калмана и используется только для моделирования.

### Экспериментальные исследования

Для отработки представленного метода разработана компьютерная модель с использованием пакета MATLAB. Ниже представлены моделирования проездов без коррекции (рис.2), с коррекций по одному (рис.3), двум (рис.4) и трем ориентирам (рис.5).

Моделирование показало эффективность коррекции даже по одному ориентиру. При этом важно осуществлять коррекцию с достаточной частотой, поскольку применение линеаризации в алгоритме расширенного фильтра Калмана предполагает малые отклонения от реального положения. При больших отклонениях фильтр может давать оценку, значительно отличающуюся от оптимальной (из-за ошибок линеаризации).

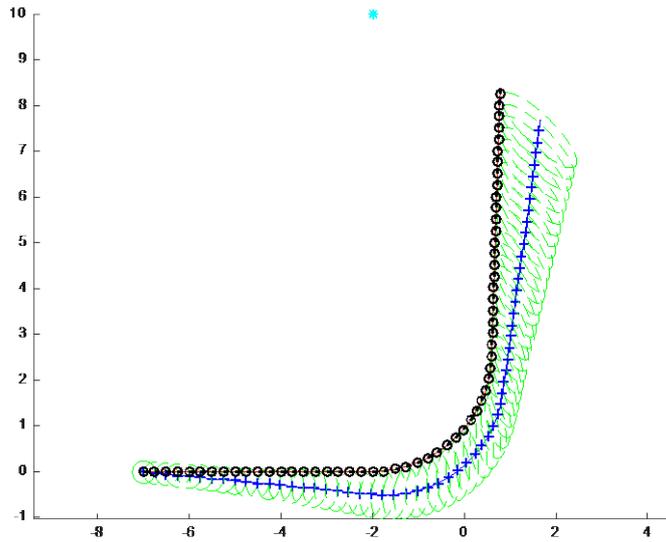


Рисунок 2 – Моделирование проезда без коррекции

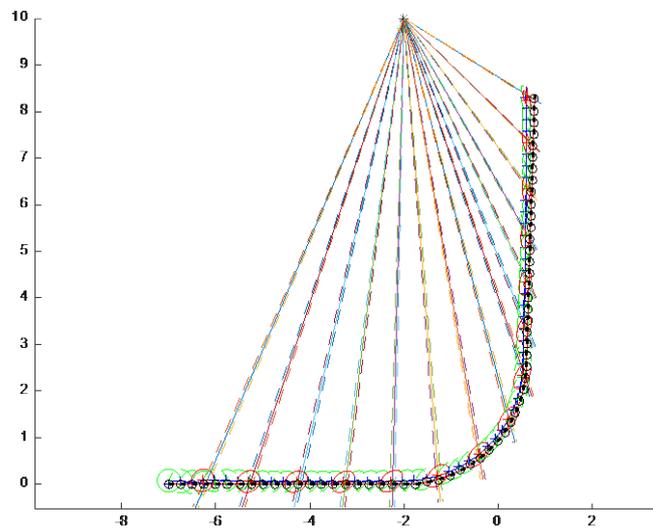


Рисунок 3 (а) – Моделирование проезда с коррекцией по одному ориентиру

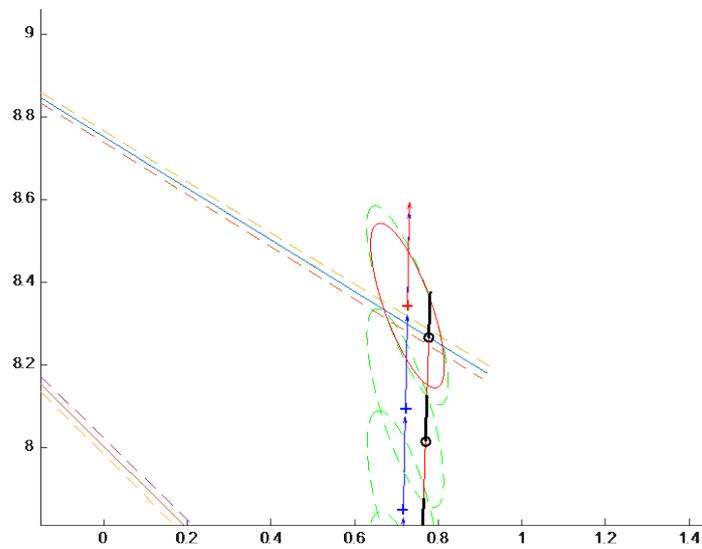


Рисунок 3 (б) – Моделирование проезда с коррекцией по одному ориентиру

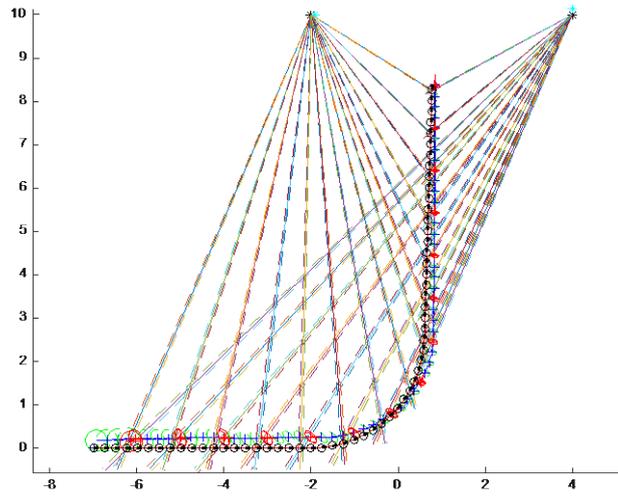


Рисунок 4 (а) – Моделирование проезда с коррекцией по двум ориентирам

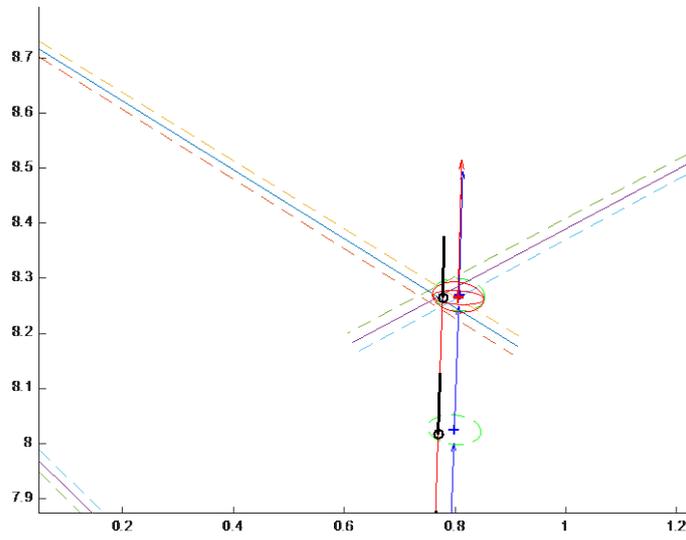


Рисунок 4 (б) – Моделирование проезда с коррекцией по двум ориентирам

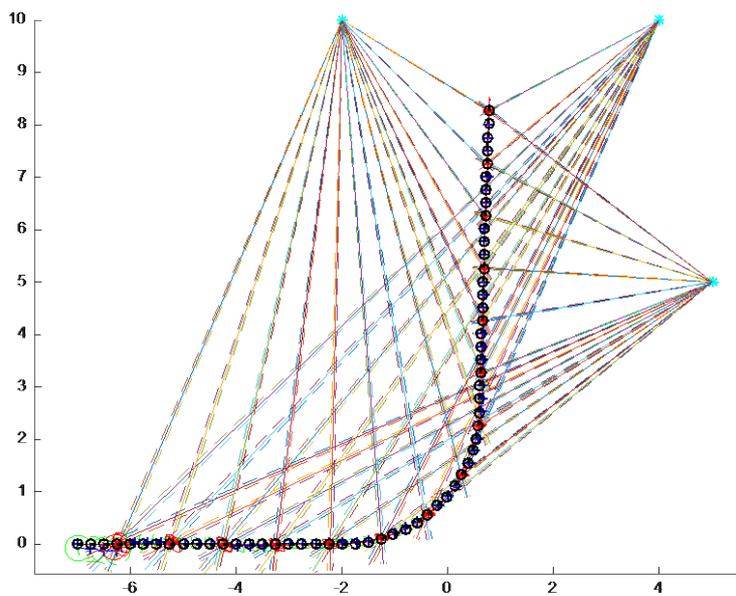


Рисунок 5 (а) – Моделирование проезда с коррекцией по трем ориентирам

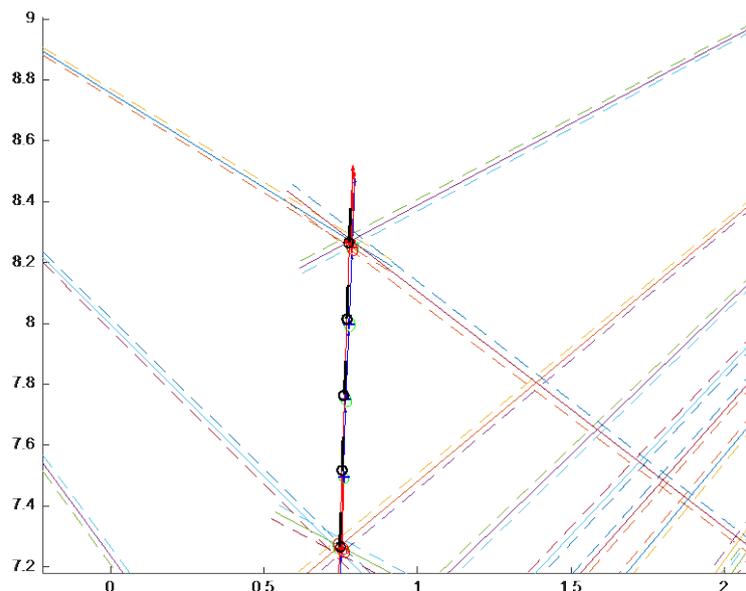


Рисунок 5 (б) – Моделирование проезда с коррекцией по трем ориентирам

Экспериментальные исследования проводились на тестовом полигоне ЦНИИ РТК с использованием автономного транспортного средства с поворотными колесами. МР оснащен бортовым вычислителем на базе NVidia Jetson TX1 и двумя телевизионными камерами с объективами типа «рыбий глаз» для обеспечения локации ориентиров в максимально широком угле. Для определения фактического положения робота в контрольных точках использовались лазерные дальномеры и измерительный манипулятор FARO Arm.

Примеры изображений визуальных ориентиров, полученных от камер МР представлены на рисунке 6.

Экспериментальные исследования показали, что при отсутствии коррекции транспортное средство осуществляет навигацию с погрешностью порядка 50 см в конечной точке контрольной траектории (аналогичной проезду перекрестка с поворотом). Применение визуальной коррекции позволяет достичь погрешности не более 10 см в том же положении МР.

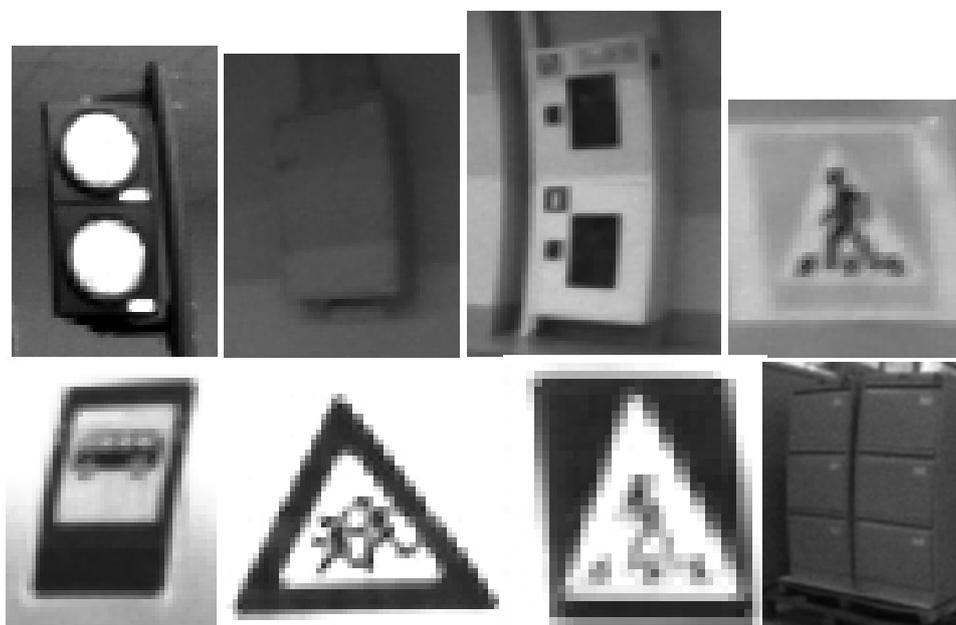


Рисунок 6 – Примеры изображений визуальных ориентиров

### Заключение

Ключевым достоинством представленного подхода является возможность коррекции по любому количеству ориентиров (начиная с одного), а также использования как одной, так и множества телевизионных камер. Однократное наблюдение ориентира с известными координатами обеспечивает

уменьшение ошибки навигации в направлении, перпендикулярном линии визирования ориентира. Поскольку каждый ориентир обычно наблюдается в течение некоторого времени, постепенно может быть списана ошибка по всем координатам. Проведенные экспериментальные исследования показали, что метод позволяет достичь точностей порядка 10 см при проезде перекрестков различной конфигурации. Предложенный подход является универсальным и может быть применен для коррекции по известным визуальным ориентирам в различных случаях, например, при определении относительного положения автономных спасательных средств морского базирования [2], космических аппаратов [14] или при выполнении стыковки автономных необитаемых подводных аппаратов с носителем [4].

1. *Десятериков, Е. А., Михайлов Б.Б.* Использование данных визуального одометра для автономного возвращения мобильного робота в среде без фиксированных точек отсчета // Сб. трудов НТК «Экстремальная робототехника 2015».
2. *Васильев И.А., Смирнова Е.Ю., Степанов Д.Н.* Комплекс интеллектуальной навигации амфибийного спасательного средства // Робототехника и техническая кибернетика. 2015. № 2 (7). С. 30-33.
3. *Тюкин А.Л., Лебедев И.М., Приоров А.Л.* Анализ телевизионного изображения для работы системы позиционирования мобильного робота в помещении по маякам с цветовой кодировкой // Тезисы научно-технической конференции «Техническое зрение в системах управления – 2015». М., 2015. С. 77-78.
4. *Степанов Д.Н., Курпась Н.А., Половко С.А.* Алгоритм определения взаимного положения подводных аппаратов с использованием телевизионной системы и специальных световых маркеров // Интеллектуальные системы, управление и мехатроника - 2016 материалы Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. 2016. С. 427-431.
5. *Черноножкин В.А., Половко С.А.* Система локальной навигации для наземных мобильных роботов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2008. №57 С.13-22.
6. *Yoav Freund, Robert E. Schapire.* A Short Introduction to Boosting // International joint conference on Artificial intelligence. - 1999. - Vol. 2. - P. 1401-1406.
7. *Fomin, D. Gromoshinskii, and D. Stepanov,* “Visual features detection based on deep neural network in autonomous driving tasks,” // 26 международная конференция GraphiCon2016, Нижний Новгород, 2016. С. 430–434.
8. *Girshick R.* Fast R-CNN // The IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). 2015. pp. 1440–1448.
9. *Julier S. J., Uhlmann J. K.* Unscented filtering and nonlinear estimation // Proceedings of the IEEE. – 2004. – Т. 92. – №. 3. – С. 401-422.
10. *Z. Kalal, K. Mikolajczyk, J. Matas.* Tracking-learning-detection // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2012. – Vol. 34. – P. 1409-1422.
11. *Anton Korsakov, Ivan Fomin, Dmitry Gromoshinsky, Aleksandr Bakhshiev, Dmitrii Stepanov, and Ekaterina Smirnova.* Determination of an Unmanned Mobile Object Orientation by Natural Landmarks // Supplementary Proceedings of the Fifth International Conference on Analysis of Images, Social Networks and Texts, Yekaterinburg, Russia, 2015, vol. 1710, pp. 91–101.
12. *Raúl Mur-Artal, J. M. M. Montiel and Juan D. Tardós.* ORB-SLAM: A Versatile and Accurate Monocular SLAM System // IEEE Transactions on Robotics, vol. 31, no. 5, pp. 1147-1163, 2015.
13. *Shengcai Liao, Xiangxin Zhu, Zhen Lei, Lun Zhang, Stan Z. Li.* Learning Multiscale Block Local Binary Patterns for Face Recognition // International conference on Advances in Biometrics. - 2007. - P. 828-837.
14. *D. Stepanov, A. Bakhshiev, D. Gromoshinskii, N. Kirpan, and F. Gundelakh.* Determination of the Relative Position of Space Vehicles by Detection and Tracking of Natural Visual Features with the Existing TV-Cameras” // Analysis of Images, Social Networks and Texts, vol. 542, M. Y. Khachay, N. Konstantinova, A. Panchenko, D. I. Ignatov, and V. G. Labunets, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2015, pp. 431–442.
15. *Suliman C., Cruceru C., Moldoveanu F.* Mobile robot position estimation using the Kalman filter // Scientific Bulletin of the "Petru Maior" University of Targu Mures. – 2009. – Т. 6. – С. 75.
16. *P. Viola, M. J. Jones.* Robust Real-Time Face Detection // International Journal of Computer Vision. - 2004. - Vol. 57. - P. 137-154.

## **АЛГОРИТМЫ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА СИГНАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ В ДОРОЖНОЙ СЦЕНЕ**

*Институт Прикладной Математики им. Келдыша РАН, Москва, kikip\_46@mail.ru*

### **Аннотация**

В работе рассмотрена задача обнаружения сигнальных объектов на изображениях дорожных сцен и предложены алгоритмы ее решения на основе метода геометризованных гистограмм, разработанного автором. Описываются принципы программного комплекса, реализованного на основе предложенных алгоритмов. Рассматриваются применения к обнаружению зон габаритов и сигналов торможения на соседних автомобилях при движении робота-автомобиля по дороге. Намечаются применения разработанных методов к обнаружению сигнальных огней вертолетов.

Ключевые слова: сегментация изображений, системы пониманий изображений, анализ видеопоследовательностей, анализ дорожных сцен, навигация автономных роботов.

### **Введение**

В последнее время ведутся большие работы для создания роботов-автомобилей для движения по дорогам общего пользования. Опытные образцы автомобилей-роботов имеются у многих ведущих фирм-производителей автотранспорта. В частности, продвинутые образцы автомобилей-роботов имеются у Tesla, Daimler, BMW, Google и других компаний. Google-vehicle регулярно ездит по дорогам, и отчеты о его поездках можно найти на сайте [1].

В связи с продвижением разработок в этой области возникают многочисленные задачи для компьютерного зрения. Однако задача построения полностью автономного робота-автомобиля еще не решена до конца. К сожалению, это подтверждают первые аварии и даже жертвы среди испытателей автономных автомобилей-роботов (гибель испытателя фирмы Tesla). Каждый водитель понимает, что очень важно знать намерения впередиидущих автомобилей, которые водитель должен выражать с помощью сигналов поворота и торможения. Также очень важным является задача нахождения светофоров и понимания их состояния. Среди задач такого же круга можно указать задачу нахождения сигнальных огней летательных аппаратов. Общим в этих задачах является нахождение относительно яркого, небольшого по размерам (линейные размеры могут быть равны всего нескольким пикселям), окрашенного объекта определенной формы (габариты, сигнал светофора), находящего в определенном месте (на дороге, в ее окрестности, или в небе), а также сложный цветовой состав разыскиваемых объектов. Во всех рассмотренных случаях цвет сильно плавает по оттенку, насыщению и яркости. Например, на границе зона сигнала торможения может быть темной и красной в широком диапазоне оттенка и насыщения (зависит от загрязнения и влажности, а также освещения), а в центре, из-за влияния лампы, цвет может уходить в оранжевую и даже желтую область и выцветать.

В работе предлагается подход, основанный на методе геометризованных гистограмм для поиска небольших сигнальных огней с плавающими цветовыми параметрами. Данный подход разработан на основе новых методов описания, сегментации, и понимания цветных изображений реального времени, которые позволяют вести обработку видео со скоростью 20fps на существующих персональных компьютерах без использования специальных вычислительных средств [2–4]. Заметим, что основное ядро программного комплекса, реализующего метод геометризованных гистограмм, одно и то же для решения разных задач, поиска как больших объектов (дорога, обочина, другие участники движения), так и малых (сигнальные огни автомобилей, сигналы светофоров, элементы дорожной разметки, окрашенные конуса указания строительных работ). Метод геометризованных гистограмм позволяет приготовить представление информации об изображении в компактной форме, которая содержит всё для решения указанных задач при минимальном обращении к исходному массиву изображения и обеспечивает поиск объектов интереса в реальном времени. Это существенно удешевляет разработку и эксплуатацию систем зрительного обеспечения и управления роботов.

В работе также приводятся результаты экспериментов с реальными изображениями дорожных сцен, полученные при применении комплекса программ при поиске сигнальных огней и габаритов впередиидущего транспорта. Определяются дальнейшие задачи для применения разработанных методов.

Работа частично поддержана грантами РФФИ 16-08-00880 и 16-07-01264а

## 1. Новый метод содержательного описания цветных изображений: выделение ключевых объектов в дорожных сценах

Предлагаемые алгоритмы понимания дорожных сцен основаны на методе геометризованных гистограмм, разработанном в [2--4]. С помощью техники, разработанной в [2--4], каждому цветному изображению ставится в соответствие граф цветовых сгустков  $STG$ . Для построения  $STG$  изображение разбивается на полосы одинаковой ширины, параллельные горизонтальной или вертикальной оси плоскости изображения  $O_s$ . Каждая полоса описывается множеством цветовых сгустков. Каждый цветовой сгусток  $b$  характеризуется следующими параметрами:

1. интервал геометрической локализации  $[beg_b, end_b]$  – начало и конец  $b$  на оси  $O_s$ , который характеризует расположение цветового сгустка в полосе;
2.  $\Delta_H^b = [H_{min}^b, H_{max}^b]$  и  $H_{mean}^b$  – диапазон и среднее значение цветового оттенка  $b$ ;
3.  $\Delta_S^b = [S_{min}^b, S_{max}^b]$  и  $S_{mean}^b$  – диапазон и среднее значение цветового насыщения данного сгустка;
4.  $\Delta_I^b = [I_{min}^b, I_{max}^b]$  и  $I_{mean}^b$  – диапазон и среднее значения полутоновой компоненты;
5. мощность сгустка  $Card^b$  (это приблизительно число точек полосы, координата которых вдоль полосы ограничена значениями концов интервала геометрической локализации  $[beg_b, end_b]$ , с цветовыми характеристиками, принадлежащими диапазонам  $\Delta_H^b$ ,  $\Delta_S^b$  и  $\Delta_I^b$ ).

Неформально, каждый сгусток дает описание некоторой части реального объекта в полосе, его проекцию на ось  $O_s$  и описание значений численных цветовых характеристик этой части объекта.  $STG$  можно интерпретировать геометрически с помощью наложения отрезков его сгустков ( $[beg_b, end_b]$ ) на центральную линию соответствующей полосы и окрашивания этих отрезков в цвет, определяемый  $H_{mean}^b$ ,  $S_{mean}^b$ ,  $I_{mean}^b$ . Описание изображений с помощью цветовых сгустков сжимает информацию об изображении с миллионов пикселей до нескольких сотен сгустков. Для каждой видеопоследовательности изображений реального мира, можно построить последовательность изображений, составленных из цветовых сгустков, наложенных на плоскость изображения. Пример видеопоследовательности сгустков для видеопоследовательности, снятой на оживленной улице, может быть найден в [5]. Рисунок 1 показывает цветное изображение дорожной сцены с нанесенными в автоматическом режиме границами растительности (процесс выделения зеленой обочины дороги описан в [6, 8]) и изображение цветовых сгустков, наложенное на полутоновое изображение, соответствующее данному цветному.

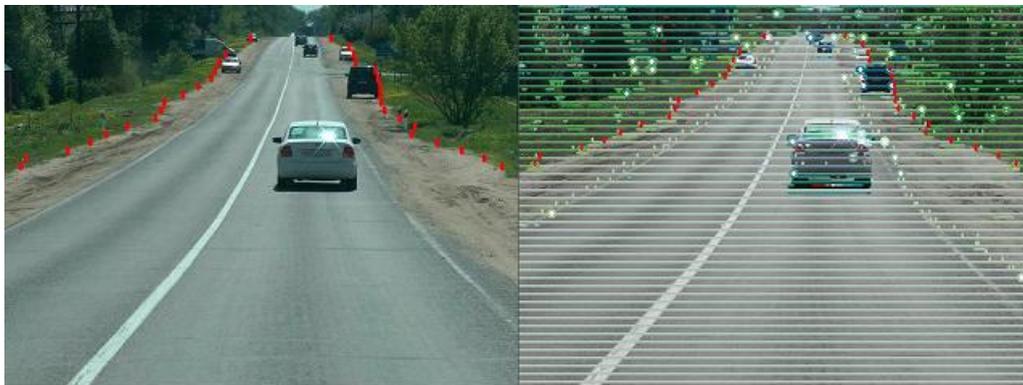


Рисунок 1 – Цветовые сгустки дорожной сцены с выделенной границей зелени

Многие задачи по поиску ориентиров и объектов в кадре, можно переформулировать строго как задачи поиска некоторых абстрактных объектов на графе цветовых сгустков.

Для этих целей в [3] введены понятия левых и правых контрастных кривых на  $STG$  и определен двудольный граф левых и правых контрастных кривых  $LRG$ . Если изображение разбито на горизонтальные полосы, то, неформально, левая или правая контрастная кривая есть цепочка цветовых сгустков в соседних полосах с подобными цветовыми характеристиками. При этом левые или правые концы цветовых сгустков меняются от полосы к полосе “непрерывно”, и соседние в той же полосе слева или справа цветовые сгустки имеют контрастные цветовые характеристики. Эта цепочка строится снизу вверх, переходя из полосы в полосу.

Рисунок 2 показывает примеры цепочек сгустков, которые образуют левые и правые контрастные кривые.



Рисунок 2 – Левые и правые контрастные кривые на  $STG$ , соответствующие реальным объектам

Левая и правая контрастная кривая соединены ребром в  $LRG$ , если часть сгустков, их образующих, можно соединить цепочками других цветовых сгустков в одной и той же полосе без контрастных переходов. В частности, если последовательность левых и правых концов цепочки сгустков дают левую и правую контрастную кривую одновременно, то связная компонента на  $LRG$  состоит только из них самих. Связные компоненты в  $LRG$  определяют контура на изображении, которые являются границами областей и снабжены информацией о цветовых параметрах этих областей.

Рисунок 1 (правая часть) показывает цветовые сгустки, наложенные на средние линии полос на черно-белом изображении, соответствующем цветному изображению левой части этого рисунка. Набор левых и правых контрастных кривых из связной компоненты определяет форму полученной области. На множестве цветовых сгустков (вершинах  $LRG$ ) определены частичные функции  $BelL$  и  $BelR$ , которые ставят в соответствие цветовым сгусткам левые или правые контрастные кривые, которые проходят через этот цветовой сгусток,

$BelL(BelR): STG \rightarrow LRG$ .

Функции принадлежности  $BelL$  и  $BelR$  для цветовых сгустков имеют не более одного значения в каждом цветовом сгустке. Иными словами, левые (правые) контрастные кривые не пересекаются внутри своего класса. В каждой полосе удастся выделить основные цветовые сгустки, которые являются доминирующими в своем участке полосы (имеющими наибольшую плотность). На множестве доминирующих цветовых сгустков удастся задать структуру полной упорядоченности (перенумеровать доминирующие цветовые сгустки от 0 до некоторого  $k$ ). Рисунок 3 показывает упорядоченное множество цветовых сгустков в полосе. Заметим, что на данном рисунке области габаритов и тормозных сигналов соответствуют доминирующие цветовые сгустки. Доминирующие цветовые сгустки размещены на средней линии полосы. Второстепенные сгустки (уступающие доминирующим сгусткам по плотности) расположены слегка ниже средней линии. Эти сгустки могут быть также важными при решении задачи поиска сигнальных объектов, так как при достаточно большом расстоянии до впереди идущего автомобиля доминирующими становятся части корпуса автомобиля или, когда мы имеем дело с летательным аппаратом, то части его корпуса. Поэтому необходимо также учесть такие сгустки, приписав их списки к их соответствующему доминирующему сгустку. Для этого используется соответствующая структура, с помощью которой осуществляется поиск данных второстепенных сгустков.



Рисунок 3 – Базисы из доминирующих цветовых сгустков и цветовые сгустки габаритов

Построенное упорядочивание (сгустки перенумерованы с сохранением отношения соседства) позволяет построить граф соседства  $ADG$  (adjacency graph) для найденных контрастных объектов в  $STG$ .

Отмечено [7], что граф соседства играет важную роль в сегментации изображений, так как он позволяет преодолевать нестабильность результатов сегментации, возникающей от зависимости их от освещения, точки зрения и т.д. Однако, построение графа смежности на пиксельном уровне встречает серьезные трудности ввиду различных помех на границах областей. Существенными также являются комбинаторные сложности при работе с областями [7].

При подходе, основанном на методе геометризованных гистограмм, мы работаем уже с интегральными описаниями множеств, которые позволяют избежать сложностей на границах. Разбиение изображения на тонкие полосы и упорядоченное движение вдоль полос позволяют в значительной степени избежать комбинаторных проблем. Более того, пользуясь линейным упорядочиванием вдоль полос, удастся определить кратные графы  $ADG_i$  смежности, двигаясь по линейно упорядоченным последовательностям доминирующих сгустков в каждой полосе. Пусть задан некоторый цветовой сгусток, принадлежащий левой контрастной кривой. Двигаясь влево от этого сгустка по линейно упорядоченной последовательности базисных сгустков, находя правые и левые контрастные кривые, проходящие через базисные сгустки, получаем последовательность соседних левых и правых контрастных кривых, образуя связи графа  $ADG_i$ . На изображении рисунка 3, двигаясь от цветового сгустка зеленой обочины, мы последовательно проходим сгустки земляной обочины, дороги, первого габарита, тела автомобиля, второго габарита, второго сгустка дороги, второй земляной обочины и второй зеленой обочины. Граф  $ADG_i$  позволяет собирать сложные реальные объекты, которые состоят из разнородных частей. В этом графе устанавливаются отношения не только между объектами, которые непосредственно граничат друг с другом, но и между объектами изображения, разделенными заслонениями от других объектов. Например, с помощью графа  $ADG_i$  можно восстанавливать связи между частями дороги, связь между которыми прервана заслонениями от других транспортных средств, участвующих в движении. Таким же образом устанавливается связь между частями левой и правой обочин, лежащими друг напротив друга. Также это упорядочивание используется для установления соответствия между левым и правым габаритами автомобиля.

Новым результатом, связанным с детальным построением и применением графа  $ADG$  посвящена работа автора, находящаяся в печати [8].

Разработанная техника позволяет выделять контрастные объекты на изображении, оценивать их форму и цветовые характеристики, и отслеживать их движение в видеопоследовательностях. Эта же техника позволяет формально определить образы реальных объектов на  $STG$ . Так как задачи поиска образов объектов решаются без обращения к массивам изображений, удастся достичь скорости их поиска порядка 20 fps на современном персональном компьютере с процессором типа Intel i3–i7 для размера кадра 640x480. Заметим, что, как проверено на многочисленных экспериментах с различными форматами (вплоть до 1600x1200), программа уверенно работает с изображениями большой размерности, и время обработки линейно зависит от размерности (находится в прямой пропорциональной зависимости от числа пикселей на изображении). Например, при переходе от изображений форма 800x600 (порядка 65 мс на I3 2 Ghz) к формату 1600x1200 оно увеличивается в 4 раза. Изображения высокого разрешения необходимы для нахождения автомобилей на дороге, находящихся на достаточно большом расстоянии, анализа состояния их сигнальных огней, образ которых на изображении имеет малые линейные размеры. Заметим, что метод геометризованных гистограмм дает возможность отыскивать связанные цветовые распределения точек (цветовые сгустки) с линейными размерами от 3-4 пикселей, которые связаны с сигнальными объектами на изображениях. При этом нет необходимости в ограничительном задании цветовых диапазонов, так как ведется одновременный анализ цвета, локализации и геометрических параметров и допускается, что цветовые параметры могут меняться в широких диапазонах.

## **2. Задачи по поиску сигнальных объектов на дорожной сцене на базе метода геометризованных гистограмм**

Опишем кратко алгоритмы нахождения сигнальных объектов. В случае, когда сигнальный объект находится на относительно небольшом расстоянии и выбрано достаточное количество полос разбиения изображения (обычно, ширина полосы порядка 10 пикселей), он может быть обнаружен среди базисных сгустков в некоторой полосе для изображения сравнительно небольшой размерности (типа 640x480). Например, это имеет место для впередиидущего автомобиля с Рис. 1 (см. Рис. 3). В данном случае, зоны сигналов габаритов и торможения дают два базисных сгустка. Однако, при достаточном удалении от впередиидущего автомобиля, зоны сигналов габаритов и торможения могут давать второстепенные

цветовые сгустки, рассыпаться на несколько сгустков в разных, но близких цветовых диапазонах или вообще не давать цветовых сгустков. Причина состоит в том, что цветовые сгустки строятся из некоторых первоначальных объектов в данной полосе, мощность которых (число пикселей) превышает некоторый заранее выбранный порог.

При построении цветовых сгустков совершенно не учитываются и не предполагаются заранее известными специфические цветовые и яркостные характеристики первоначальных объектов. Это делает процедуру построения цветовых сгустков универсальной, не зависящей от задачи и конкретного типа изображения. Что позволяет анализировать изображения с неизвестной моделью (это важно при движении на крутых поворотах, когда камера может терять изображение дороги). Чтобы решать задачу поиска малых сигнальных объектов на больших расстояниях, необходимо сделать два дополнительных шага:

1. переход на изображение более высокого разрешения,
2. конструирование дополнительных цветовых сгустков, удовлетворяющих некоторым условиям на цветовые-яркостные параметры без условия ограничений на мощность.

Опишем коротко процедуру построения дополнительных цветовых сгустков. Все поясняющие детали могут быть найдены в [2-4]. Для представления исходного изображения в виде графа цветовых сгустков, на исходном изображении, вместо координат  $(R, G, B)$ , вводится система координат  $(G/(G + B), R/(R + G), I)$ . Рассматривается функция  $G/(G + B)$ , и в каждой полосе строится проекция ее множеств уровня на ось  $Ox$ . Дополнительно эти множества уровня разбиваются на подмножества, принадлежащие разным цветовым диапазонам (красному, желтому, зеленому, и т.д.). Это необходимо сделать, так как только две функции  $G/(G + B)$ ,  $R/(R + G)$  полностью определяют цвет, а  $G/(G + B)$  не дает нужного разделения цветов. Так как мы имеем дело с дискретным случаем, то получившаяся проекция усеченных множеств уровня состоит из конечного числа отрезков. С учетом дополнительного учета значений  $R/(R + G)$  строится различающая функция  $\Psi$  на базе  $G/(G + B)$  с 137 значениями. Для каждого значения получаем наборы отрезков на оси  $Ox$ . Каждый отрезок есть проекция некоторого подмножества в полосе с определенными цветовыми характеристиками. Каждому отрезку  $c$  предписываются диапазоны и средние значения  $\Delta_H^c = [H_{min}^c, H_{max}^c]$  и  $H_{mean}^c$  – диапазон и среднее значение цветового оттенка  $c$ ;  $\Delta_S^c = [S_{min}^c, S_{max}^c]$  и  $S_{mean}^c$  – диапазон и среднее значение цветового насыщения  $c$ ;  $\Delta_I^c = [I_{min}^c, I_{max}^c]$  и  $I_{mean}^c$  – диапазон и среднее значения полутоновой компоненты; мощность отрезка  $Card^c$ .

Далее отрезки  $c$  по некоторым правилам объединяются в цветовые сгустки. Рисунок 4 (левая часть) демонстрирует описание с помощью отрезков  $c$  распределение значений введенной различающей функции  $\Psi$  в полосе 29 изображения Рис. 1. По оси  $ox$  откладываются номера пикселей вдоль горизонтальной оси изображения. По оси  $oy$  откладываются значения различающей функции  $\Psi$ . Для каждого значения  $\Psi$  показана система отрезков, получающаяся проектирование точек полосы, в которых принимается данное значение, на ось  $Ox$  (в данном случае горизонтальная ось изображения). В правой части Рис. 4, показан набор отрезков  $c$ , описывающих распределение значения  $\Psi$ , которые объединяются в цветовой сгусток, соответствующий правому габариту ближнего автомобиля Рис. 1. В данном случае цветовой сгусток собран из нескольких отрезков распределения, что показывает вариацию цвета зоны габаритов и торможения.

Рисунок 3 в левой части показывает, что на изображении формата 640x480 обе зоны габаритов у ближнего автомобиля выделяются базисными цветовыми сгустками. В правой части рисунка виден только левый габарит удаленного автомобиля, и он выделяется второстепенным цветовым сгустком. Заметим, что в обоих случаях на автомобилях не включено освещение (второй автомобиль вообще просто стоит на обочине). У второго автомобиля зона габаритов имеет ширину всего 3 пикселя. Выделение зоны габарита на данном месте изображения говорит о высокой чувствительности метода.

Рисунок 4 показывает, что правому габариту соответствует целый спектр оттенков красного (цифры внизу дают средние значения и диапазоны основных цветовых характеристик). Здесь, латинское "A" перед H (hue), S (saturation), G (grayscale intensity) означает "среднее" а "L" и "U" означают верхние и нижние диапазоны соответствующих характеристик, "beg" и "end" определяют ширину габарита равную 10 пикселям.

После того, как новые цветовые сгустки будут найдены, необходимо выполнить тест на правдоподобность гипотезы того, что нами найдены соответствующие объекты. То есть необходимо построить некоторую систему рассуждений, которая путем проверки выполнения некоторых условий заключит, что программа нашла необходимый объект. Для поиска сигнальных объектов автомобилей на дороге (габаритов, индикаторов торможения, поворота), данный тест на правдоподобность использует

сегментацию изображения формата порядка 640x480 для выделения обочины, дороги и возможного расположения соседнего автомобиля на дороге [6, 8].

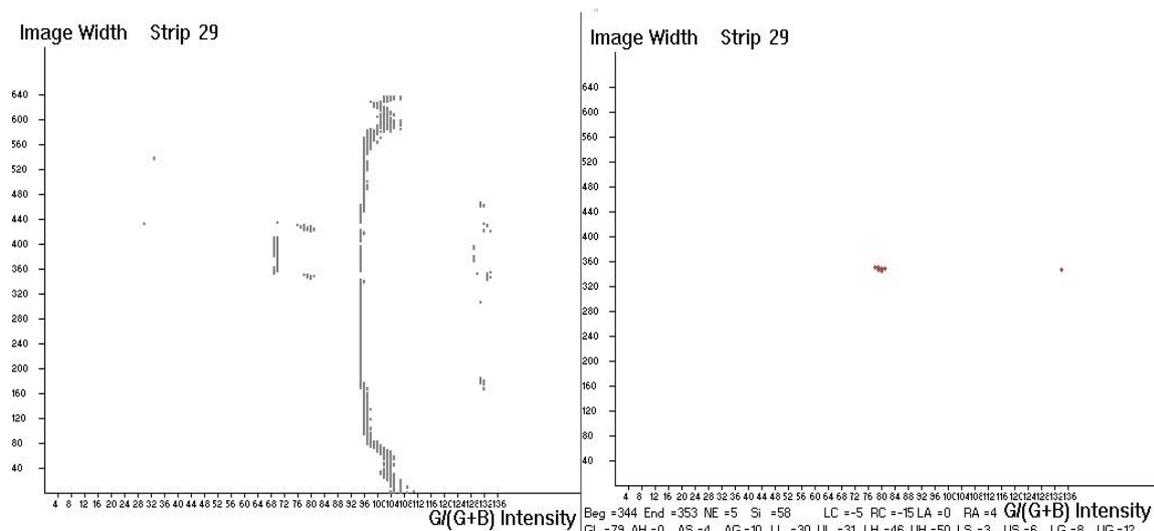


Рисунок 4 – Описание цветового распределения в полосе и часть этого описания, соответствующая цветовому сгустку правого габарита ближнего автомобиля

Далее проверяется, что имеется объект, который вероятно является автомобилем, ищутся возможные сигнальные объекты, проверяется наличие пар этих объектов (если должны быть пары). Вначале проверка идет на уровне цветовых сгустков на изображении формата, на котором выполнена сегментация и поиск глобальных объектов. Если не удастся полностью реализовать поиск на уровне стандартных цветовых сгустков, переходим к собиранию отрезков распределения значений  $\Psi$ . Если нет полного успеха, то осуществляется переход к изображению высокого разрешения в окрестности выделенного глобального объекта, и процедуры поиска повторяются на высоком разрешении. Поиск соответствия габаритов, выполняется с помощью движения по упорядоченной последовательности цветовых сгустков в полосе.

В настоящее время проводится работа по применению разработанной техники к обнаружению сигнальных огней вертолетов. Специфика задачи состоит в том, что на небе при солнце, закрытом тучами, в промежутках между ними могут появиться похожие объекты, а размеры сигнального огня таковы, что он может быть найден только на изображениях высокого разрешения. Также необходимо разработать методы обнаружения вертолета на изображениях формата порядка 640x480 (чтобы обеспечить работу в реальном времени на стандартной вычислительной технике) для исключения помех на небе, связанных с освещением и наличием туч на небе. Рисунок 5 показывает обнаружение сигнального огня на изображении формата 1600x1200 и результаты сегментации изображения формата 800x600 с выделением частей вертолета.



Рисунок 5 – Выделение сигнального огня вертолета на изображении высокого разрешения и сегментация частей вертолета

Цветовой сгусток сигнального огня нанесен на черно-белое изображение, соответствующее цветному изображению вертолета. Части вертолета нанесены на исходное изображение. Для нахождения сигнального огня изображение формата 1600x1200 было разбито на 60 полос. На изображении формата 800x600 сигнальный огонь не удастся отыскать. Линейные размеры сигнального огня на изображении высокого разрешения меньше 10 пикселей. Дополнительными особенностями

задачи являются очень широкий диапазон цветовых составляющих сигнального огня, смещение красного цвета в оранжевый, и сильная вариация по насыщенности и яркости (влияние горячей лампочки фонаря). Также цветовой состав сигнального огня может сильно меняться в пределах одной видеопоследовательности в зависимости от ракурса, под которым виден вертолет и изменения окружающей освещенности. Для получения полных результатов, включая тестирование достоверности полученных результатов, необходимо разработать систему рассуждений для выделения и распознавания корпуса вертолета и поиска места ожидаемого нахождения сигнального огня. В работе [8] для этих целей разработана техника для оценивания формы ломаных линий, задаваемых граничными точками левых и правых ростков контрастных объектов. Существенной особенностью этой техники является возможность применять ее при наличии ошибок сегментации, искажающих форму, задаваемую границей ростка. Данная техника позволяет искать прямолинейные участки (как это нужно для нахождения границ дороги и обочины) и выпуклые (вогнутые) участки, как это нужно для нахождения частей летательных аппаратов.

### **3. Программная реализация и экспериментальные результаты**

Для выделения сигнальных объектов написана программа поиска цветовых сгустков на изображении дорожной сцены, которые могут соответствовать сигнальным объектам. Программа содержит некоторую систему понимания сцены, основанную на системе рассуждений. Работа программы основана на базисном описании сцены, полученном с помощью метода геометризованных гистограмм. Проводится экспериментальная проверка и программа отрабатывается на реальных видеопоследовательностях, снятых при движении автомобиля. Программа написана на C++ и работает в операционной системе Windows. Для визуализации результатов используются возможности библиотеки MFC. Готовится версия для операционной системы Linux. Отрабатывается система визуализации результатов работы программы на видеопоследовательностях в этой операционной системе.

### **4. Выводы и новые разработки**

На основе новой техники по описанию и сегментации цветных изображений, основанной на методе геометризованных гистограмм, разработаны программы для обнаружения сигнальных объектов на изображениях. В качестве таких сигнальных объектов рассматривались сигнальные зоны соседних автомобилей, движущихся по дороге (габариты, сигналы торможения, поворота). Программы проверены на изображениях из состава реальных видеопоследовательностей, снятых при движении по дороге.

Проводится отладка программ при работе на видеопоследовательностях. Подготавливается включение разработанных программ в состав СТЗ робота “Авто Нива” для автономного движения по дорогам.

Проводится доработка программ с тем, чтобы обнаруживать сигнальные огни летательных аппаратов (вертолетов, квадрокоптеров). Рассматривается также применение разработанных методов к выделению и анализу сигналов светодорожек.

1. <https://www.google.com/selfdrivingcar/>.
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. [http://video.mail.ru/mail/kikip\\_46/\\_myvideo/](http://video.mail.ru/mail/kikip_46/_myvideo/).
6. К.И. Кий, Система комплексного анализа дорожной сцены для навигации автономного робота на дороге, Труды международной научно-технической конференции ”Экстремальная робототехника ER-2016” Санкт-Петербург, ЦНИИ робототехники и технической кибернетики, стр. 180-184, 23-24 ноября 2016.
7. V. Hedau, H. Arora, and N. Ahuja, Matching images under unstable segmentation results. in *Proceedings of Int. IEEE Conf. on Comp. Vis. CVPR’2008*, Anchorage, USA, 2008, pp. 1614–1628.
8. K.I. Kiy, Adjacency graphs for contrast objects – global scene understanding, and their application in robot navigation. *Pattern Recognition and Image Analysis*, in press.

## **ADAPTIVE ALGORITHM FOR PROCESSING UNDERWATER AND OVERWATER IMAGES UNDER INFLUENCE OF INTERFERENCE FACTORS**

*«Izhevskiy Radiozavod», Izhevsk  
kirillov.lab@mail.ru, kost\_vk@mail.ru*

### Abstract

Considered a software algorithm eliminate underwater, as well as surface distortion and improve image quality. This approach does not require prior calibration, working equally well with images obtained at depths of 1.5 to 6000 meters. The technique of processing of underwater and surface images by the action of interfering factors in the form of fog, rain snow etc. Experimental study the proposed algorithm improve the quality of the underwater video was carried out on color 8-bit the video size of 480x360 pixels, with a frequency of 25 frames per second, obtained at depths of from 30 to 150 m. the Subjective assessment of quality according to GOST 26320-84 showed that the developed processing algorithm allows to increase the quality of underwater video images from 3 to 5 points (on a scale). Testing has shown that the proposed algorithm of preprocessing allows to increase the visual range in 3...4 times and it works with the video stream in real time transmission speeds up to 1.5 Mbps.

Keywords: Underwater image, surface image, underwater video, improved image quality, difficult shooting conditions.

The expediency of pretreatment of underwater images is caused by a significant weakening of light in the water environment, which reduces the range of visibility to 20 meters in clean water and up to 5 meters in a cloudy one. The attenuation is explained by the absorption and dispersion, both in the water itself, and dissolved in it by organic substances and small suspended particles.

It should be separately noted that similar distortions are present on the surface images, which are caused by such disturbing factors as fog, rain, snow, water ingress on the lenses of the photographic device, etc.

In modern systems for processing underwater and surface video images, additional hardware is used to combat specific distortions, in particular laser illumination, the use of polarizing lenses, external illumination of the subject, and others [1 ... 3].

Such approaches lead to an increase in mass-size indicators, increased power consumption and an increase in the cost of equipment for underwater video shooting in real time.

The method of program preprocessing of underwater and surface images, carried out with the purpose of improving the quality in the presence of interfering factors, is based on a non-uniform correction of color and illumination [4]. In the known papers [1,3,5] quite a lot of ways of combating the above-described effects in underwater images are described, but almost all of them are fully or partially hardware, in particular, methods such as laser image illumination, the use of polarizing lenses, external illumination Object of shooting and others.

Unlike the known methods, in this paper we offer a completely software algorithm for eliminating underwater, as well as surface distortions and improving image quality [7, 9]. This approach does not require preliminary calibration, working equally effectively with images obtained at depths of 1.5 to 6000 meters. Based on the previously developed model of distortion of underwater and surface images under the action of interfering factors in the form of fog, rain of snow, etc., [10] developed a method for their processing, in which it is proposed to carry out processing in a strictly defined order [7, 9]:

Experimental studies of the proposed algorithm for improving the quality of underwater video data were carried out on color 8-bit video images with a size of 480x360 pixels, at a frequency of 25 frames per second, obtained at depths from 30 to 150 m. In addition, for the analysis of underwater images, the McGlymeri model was used [3] for Gaussian noise as an additive component, as well as the narrowing of the color range by the histogram method [6]. During the simulation, the optimal filtration parameters for the underwater and above-water environments were selected, the rigid specification of which allowed the predetermined calculation of the required filter coefficients, which greatly increased the speed of the algorithm.

This algorithm was tested on a modern PC with a processor frequency of 3.3 GHz, which provided real-time operation. Figure 2 shows the results of the proposed algorithm for improving the quality of underwater video images.

Subjective quality assessment according to GOST 26320-84 showed that the developed processing algorithm allows to increase the quality of underwater video images from 3 to 5 points (on a five-point scale).

In addition, the testing showed that the proposed preprocessing algorithm allows to increase the range of visibility by 3 ... 4 times and at the same time it works with the video stream in real time mode at the transmission speed up to 1.5 Mb / s.

An additional advantage for using on board is the automatic adjustment of the processing algorithm, taking into account the current characteristics of underwater or above-water video data, which allows obtaining a stable predictable result at the output under various conditions of underwater or above-water survey, and also in conditions of unknown or insufficiently defined underwater environment.

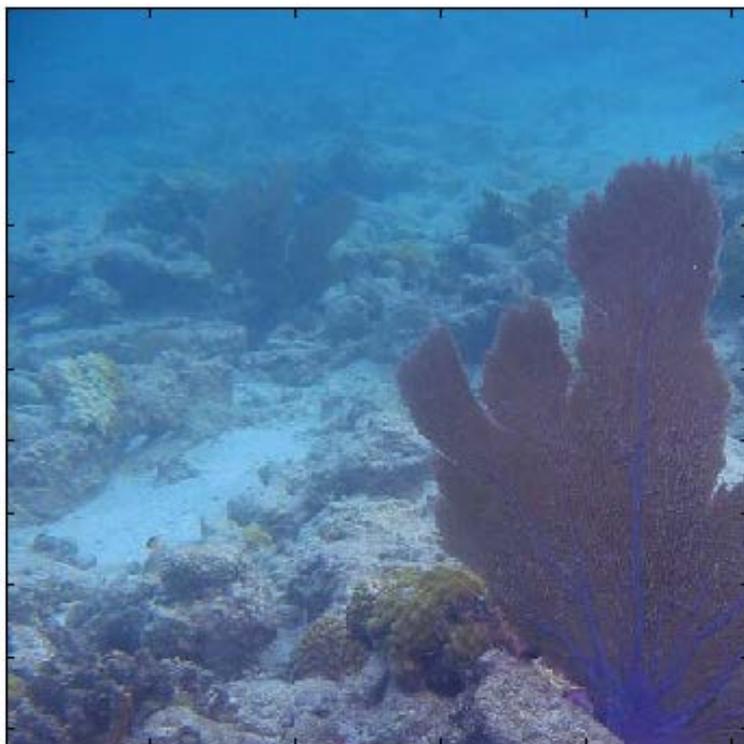


Figure 1 – The original image



Figure 2 – Processed image

Separately, it should be noted that the developed algorithm facilitates further allocation of the contours of objects on video images, reduces the influence of noise and specific underwater distortions, and also expands the space of classification features (optimal redistribution of the intensity of color channels and separate filtering and nonlinear processing of the brightness channel), which should significantly improve the algorithms Detection and tracking of underwater and above-water objects, as well as to increase the characteristics of search and detection methods Atypical objects in conditions of unknown or insufficiently defined underwater environment. In addition, it is possible to use additional combination of video and infrared data for surface shooting and to integrate video data and sonar data, which allows to improve the quality and informativeness of video shooting.

1. R. Garcia, T. Nicosevici and X. Cufi, «On the way to solve lighting problems in underwater imaging», IEEE OCEAN 02, 1018-1024, October 2002.
2. Z. Liu, Y. Yu, K. Zhang and H. Huang, «Underwater image transmission and blurred image restoration», SPIE Journal of optical Engineering, 40(6):1125–1131, June 2001.
3. B. L. McGlamery, «A computer model for underwater camera system», Proc. SPIE 208: 221-231 (1979).
4. E. H. Adelson. «Lightness perception and lightness illusions», The New Cognitive Neurisciences (MIT, Cambridge): 201-247, 2000.
5. D. N. Sidorov and ANil C. Kokaram, «Suppression of moir´e patterns via spectral analysis», «Proceedings of SPIE in Visual Communications and Image Processing», 475-493, January 2002.
6. Gonsales R. Vuds R. Cifrovaya obrabotka izobrazhenij. M.: Tekhnosfera, 2005. - 1072 s.
7. Kostkin I.V., Pushkin V.A., Locmanov A.A., Korsukov I.D. Algoritm uluchsheniya kachestva podvodnyh izobrazhenij // Vestnik RGRTU 2012 (vypusk 40) №2 S.40-47.
8. A. Farras Abdelmour, Ivan W. Selesnick, «Symmetric Nearly Orthogonal, and Orthogonal Nearly Symmetric Wavelets», Research Report: 331-374? February: 2003
9. Kostkin I.V., Pushkin V.A. Metod uluchsheniya vizual'nogo kachestva podvodnyh izobrazhenij bez ispol'zovaniya dopolnitel'nyh sredstv podsvetki // European Science and Technology Materials of the International Research and Practice Conference January 31st, 2012. – S.84-88
10. Kirillov S.N., Kostkin I.V., Dmitriev V.T Opticheskij kanal peredachi videoizobrazhenij s podvodnyh mobil'nyh robotov dlya raznyh tipov voln i klimaticheskikh zon // Morskije informacionno-upravlyayushchie sistemy 2014 № 3 (6) S. 44-51
11. P. Perona and J.Malik, «Scale space and edge detection using anisotropic diffusion», IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 629-639, July 1990.
12. Catipovic J., «Performance Limitation in Underwater Acoustic Telemetry», IEEE J. Oceanic Eng., 15, pp. 205 – 216, July 1990.
13. Ahlen, J. «Color correction of underwater images using spectral data», Thesis, Uppsala University, Centre for Image Analysis: 114 – 123 2005.

*С.Н. Кириллов, И.В. Косткин*

## **АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ПРЕДОБРАБОТКИ ПОДВОДНЫХ И НАДВОДНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ ДЕЙСТВИИ МЕШАЮЩИХ ФАКТОРОВ**

*ООО «Ижевский радиозавод», Ижевск  
kirillov.lab@mail.ru, kost\_vk@mail.ru*

### **Аннотация**

Рассмотрен полностью программный алгоритм устранения подводных, а также надводных искажений и улучшения качества изображений. Указанный подход не требует предварительной калибровки, работая одинаково эффективно с изображениями, полученными на глубинах от 1,5 до 6000 метров. Разработана методика обработки подводных и надводных изображений при действии мешающих факторов в виде тумана, дождя снега и т.д. Экспериментальные исследования предложенного алгоритма улучшения качества подводных видеоданных проводились на цветных 8-ми битных видеоизображениях размером 480x360 пикселей, с частотой 25 кадров в секунду, полученных на глубинах от 30 до 150 м. Субъективная оценка качества по ГОСТ 26320-84 показала, что разработанный алгоритм обработки позволяет увеличить качество подводных видеоизображений с 3 до 5 баллов (по пятибалльной шкале). Тестирование показало, что предложенный алгоритм предобработки

позволяет увеличивать дальность видимости в 3...4 раза и при этом работает с видеопотоком в режиме реального времени на скорости передачи до 1,5 Мбит/с

Ключевые слова: Подводные изображения, надводные изображения, подводные видеоданные, улучшение качества изображений, сложные условия съемки

Целесообразность предобработки подводных изображений вызвана значительным ослаблением света в водной среде, что уменьшает дальность видимости до 20 метров в чистой воде и до 5 метров в мутной. Ослабление объясняется поглощением и рассеиванием, как в самой воде, так и растворенными в ней органическими веществами и малыми взвешенными частицами.

Необходимо отдельно отметить, что похожие искажения присутствуют на надводных изображениях, которые вызваны такими мешающими факторами как туман, дождь, снег, попадание воды на линзы фоторегистрирующего устройства и др.

В современных системах обработки подводных и надводных видеоизображений для борьбы со специфическими искажениями используются дополнительные аппаратные средства, в частности лазерная подсветка, применение поляризационных линз, внешняя подсветка объекта съемки и другие [1...3].

Подобные подходы приводят к увеличению массогабаритных показателей, повышенному энергопотреблению и росту стоимости аппаратуры для подводной видеосъемки в реальном масштабе времени.

Метод программной предобработки подводных и надводных изображений, проводимой с целью улучшения качества при действии мешающих факторов, основан на неоднородной коррекции цвета и освещения [4]. В известных работах [1,3,5] описано довольно много способов борьбы с вышеописанными эффектами в подводных изображениях, но почти все они целиком или частично являются аппаратными, в частности, применяются такие методы, как лазерная подсветка изображения, использование поляризационных линз, внешняя подсветка объекта съемки и другие.

В отличие от известных методов в данной работе предлагается полностью программный алгоритм устранения подводных, а также надводных искажений и улучшения качества изображений [7, 9]. Данный подход не требует предварительной калибровки, работая одинаково эффективно с изображениями, полученными на глубинах от 1,5 до 6000 метров. Исходя из предварительно разработанной модели искажения подводных и надводных изображений при действии мешающих факторов в виде тумана, дождя снега и т.д., [10] разработана методика их обработки, в которой предложено проводить обработку в строго определенном порядке [7, 9]:

Экспериментальные исследования предложенного алгоритма улучшения качества подводных видеоданных проводились на цветных 8-ми битных видеоизображениях размером 480x360 пикселей, с частотой 25 кадров в секунду, полученных на глубинах от 30 до 150 м. Кроме того, для анализа подводных изображений была использована модель «Макглаймери» [3] при гауссовском шуме как аддитивной составляющей, а также сужение цветового диапазона гистограммным методом [6]. В ходе имитационного моделирования были подобраны оптимальные для подводной и надводной среды параметры фильтрации, жесткое задание которых позволило заранее рассчитать необходимые коэффициенты фильтров, что значительно увеличило скорость работы алгоритма.

Данный алгоритм был протестирован на современном ПК с частотой процессора 3,3 ГГц, что обеспечило работу в реальном масштабе времени. На рисунке 2 представлены результаты работы предложенного алгоритма улучшения качества подводных видеоизображений.

Субъективная оценка качества по ГОСТ 26320-84 показала, что разработанный алгоритм обработки позволяет увеличить качество подводных видеоизображений с 3 до 5 баллов (по пятибалльной шкале).

Кроме того, тестирование показало, что предложенный алгоритм предобработки позволяет увеличивать дальность видимости в 3...4 раза и при этом работает с видеопотоком в режиме реального времени на скорости передачи до 1,5 Мбит/с.

Дополнительным плюсом для применения на борту является автоматическая настройка алгоритма обработки с учетом текущих характеристик подводных или надводных видеоданных, что позволяет получать на выходе стабильный предсказуемый результат при различных условиях подводной или надводной съемки, а также в условиях неизвестной или недостаточно определенной подводной среды.

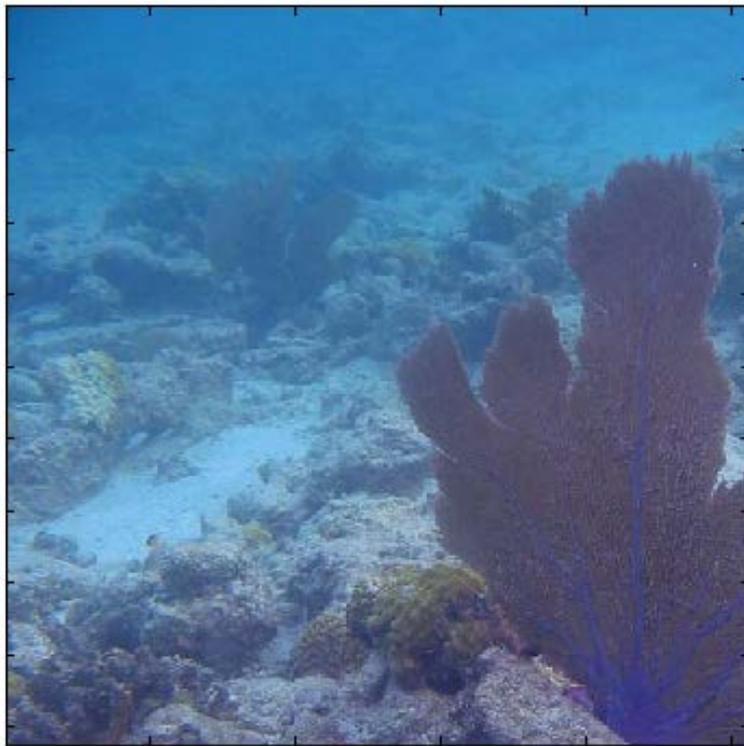


Рисунок 1 – Оригинальное изображение



Рисунок 2 – Обработанное изображение

Отдельно необходимо отметить, что разработанный алгоритм облегчает дальнейшее выделение контуров объектов на видеоизображениях, уменьшает влияние шумов и специфических подводных искажений, а также расширяет пространство признаков классификации (оптимальное перераспределение интенсивности цветových каналов и отдельная фильтрация и нелинейная обработка канала яркости), что должно значительно улучшить алгоритмы обнаружения и сопровождения подводных и надводных объектов, а также повысить характеристики методов поиска и обнаружения нетипичных объектов в условиях неизвестной или недостаточно определенной подводной среды. Кроме того, возможно дополнительное использование комплексирования видео и инфракрасных данных для

надводной съемки и комплексирование видео данных и гидролокационных данных, что позволяет повысить качество и информативность видео съемки.

1. R. Garcia, T. Nicosevici and X. Cufi, «On the way to solve lighting problems in underwater imaging», IEEE OCEAN 02, 1018-1024, October 2002.
2. Z. Liu, Y. Yu, K. Zhang and H. Huang, «Underwater image transmission and blurred image restoration», SPIE Journal of optical Engineering, 40(6):1125–1131, June 2001.
3. B. L. McGlamery, «A computer model for underwater camera system», Proc. SPIE 208: 221-231 (1979).
4. E. H. Adelson. «Lightness perception and lightness illusions», The New Cognitive Neurisciences (MIT, Cambridge): 201-247, 2000.
5. D. N. Sidorov and ANil C. Kokaram, «Suppression of moir´e patterns via spectral analysis», «Proceedings of SPIE in Visual Communications and Image Processing», 475-493, January 2002.
6. Гонсалес Р. Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. - 1072 с.
7. Косткин И.В., Пушкин В.А., Лоцманов А.А., Корсуков И.Д. Алгоритм улучшения качества подводных изображений // Вестник РГРТУ 2012 (выпуск 40) №2 С.40-47.
8. A. Farras Abdelmour, Ivan W. Selesnick, «Symmetric Nearly Orthogonal, and Orthogonal Nearly Symmetric Wavelets», Research Report: 331-374? February: 2003
9. Косткин И.В., Пушкин В.А. Метод улучшения визуального качества подводных изображений без использования дополнительных средств подсветки // European Science and Technology Materials of the International Research and Practice Conference January 31st, 2012. – С.84-88
10. Кириллов С.Н., Косткин И.В., Дмитриев В.Т Оптический канал передачи видеоизображений с подводных мобильных роботов для разных типов волн и климатических зон // Морские информационно-управляющие системы 2014 № 3 (6) С. 44-51
11. P. Perona and J.Malik, «Scale space and edge detection using anisotropic diffusion», IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 629-639, July 1990.
12. Catipovic J., «Performance Limitation in Underwater Acoustic Telemetry», IEEE J. Oceanic Eng., 15, pp. 205 – 216, July 1990.
13. Ahlen, J. «Color correction of underwater images using spectral data», Thesis, Uppsala University, Centre for Image Analysis: 114 – 123 2005.

*А.Г. Лесков, Е.В. Селиверстова*

## **АЛГОРИТМ ПЛАНИРОВАНИЯ И ВЫБОРА СПОСОБА ЗАХВАТА ДЕФОРМИРУЕМОГО ОБЪЕКТА**

*МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва  
agleskov@rambler.ru, feoktistovaev@mail.ru*

### **Аннотация**

Рассмотрен алгоритм выбора способа захвата деформируемого объекта с учетом минимизации контактных сил. Отличительные особенности алгоритма – учет изменение формы поверхности объекта и смещение его центра масс, вызванные деформацией объекта в процессе захвата и выполнения манипуляционной задачи и проверка на достижимость желаемого положения объекта на этапе планирования захвата.

Ключевые слова: симулятор захвата, планирование захвата, деформируемый объект, контактные силы, выбор способа захвата, достижимость, устойчивость

Главное достоинство робототехнических систем – возможность выполнения задач ловкого манипулирования с объектами при достаточном удалении человека от операционной зоны. Особенно актуальными являются вопросы роботизации операций при работе с взрывоопасными объектами, представляющими угрозу для жизни и здоровья человека.

На данный момент роботизированные операции с взрывоопасными объектами реализуются за счет применения методов удаленного управления при постоянном нахождении оператора в контуре управления роботом. Однако такой способ имеет существенные недостатки. Главные из них – неработоспособность при потере связи между роботом и пультом управления и увеличение сложности управления при наличии задержки сигнала, что может привести к разрушению объекта манипулирования (ОМ) или его выпадению из захватного устройства (ЗУ) и, как следствие, взрыву.

Альтернативой роботам, управление которых осуществляется удаленно человеком, являются автономные системы, оснащенные элементами искусственного интеллекта. Такие роботы лишены перечисленных недостатков и способны выполнять манипуляционные задачи в автоматическом режиме. Однако к настоящему времени не удается найти примеров полностью автономных систем, способных выполнять сложные операции с любыми ОМ. Поэтому задачу автономизации принято решать поэтапно, включая в рассмотрение отдельные фазы операции.

К простейшим манипуляционным задачам относится захват ОМ, который является начальным этапом большинства операций. Захват ОМ является проблемой его иммобилизации внутри ЗУ робота. Решение этой проблемы дает возможность удерживать ОМ в присутствии внешних возмущений.

В общем случае один и тот же ОМ можно захватить различными способами, по-разному располагая звенья ЗУ относительно поверхности ОМ. От выбора способа захвата зависит возможность реализации манипуляционной задачи и выполнения операции в целом. Выбор способа захвата осуществляется на этапе планирования. Решение задачи планирования захвата и последующего манипулирования требуют анализа результатов моделирования ОМ и ЗУ в процессе выполнения операции.

На данный момент задача автоматического захвата решена для жестких ОМ. Захват жестких ОМ интенсивно изучается уже более 30 лет. Созданы теория, описывающая кинематику и динамику захвата, алгоритмы планирования захвата и способы анализа его свойств. На их основе разработаны симуляторы захвата жестких ОМ – GraspIt! [1] и OpenRAVE [2], которые часто используются в современных робототехнических системах.

Существенным недостатком таких симуляторов захвата является отсутствие рассмотрения этой операции в контексте последующих действий, которые необходимо совершить с ОМ. Так, например, при охватывающем захвате желаемое изменение положения и ориентации ОМ в пространстве возможно только за счет движения всего манипуляционного робота. При этом если при планировании захвата учесть последующую манипуляционную операцию изменения положения ОМ в пространстве можно достичь за счет движения звеньев ЗУ, что является более безопасным с точки зрения избегания столкновений с объектами, находящимися в рабочей зоне манипулятора. Кроме того, существующие симуляторы захвата не ставят целью минимизацию сил, прилагаемых к ОМ со стороны ЗУ. Минимизация таких сил позволяет избежать чрезмерной деформации или разрушения ОМ, что особенно важно при работе с взрывоопасными объектами.

В работе описан оригинальный алгоритм планирования захвата, учитывающий деформацию ОМ в процессе выполнения операции, последующую манипуляционную операцию и минимизацию сил, прилагаемых к ОМ со стороны ЗУ. Алгоритм реализован с использованием метаоперационной системы Robot Operating System [3]. Модель ЗУ формируется в формате Unified Robot Description Format [4]. Такое представление ЗУ облегчает способ моделирования в части решения прямой задачи кинематики при моделировании захвата. Поверхности ОМ и звенья ЗУ представлены в виде полигональных моделей.

Алгоритм планирования захвата включает в себя: алгоритм формирования гипотез захвата; алгоритм планирования траекторий движения звеньев ЗУ для захвата ОМ; алгоритм определения пересечений полигональных моделей ОМ и звеньев ЗУ; алгоритм расчета сил контактного взаимодействия между ОМ и звеньями ЗУ; алгоритм определения центра масс деформированного в процессе захвата ОМ; алгоритм оценки устойчивости захвата; алгоритм проверки достижимости желаемого положения ОМ; алгоритм планирования движения шарниров ЗУ для перемещения ОМ; алгоритм определения способа захвата.

Алгоритм формирования гипотез захвата в GraspIt! и OpenRAVE осуществляется следующим образом. Вокруг полигональной модели ОМ строится ограничивающий объем в виде сферы или параллелепипеда. Затем на ограничивающий объем накладывается сетка с заданным пользователем шагом, в вершинах которой восстанавливаются нормали к поверхности ограничивающего объема. Вдоль нормалей откладывается точка, удаленная от вершины на заданное пользователем расстояние. В эту точку устанавливается модель ЗУ таким образом, чтобы он был направлен вдоль вектора нормали и пальцами ориентирован в сторону ОМ (рис. 1 а). После этого модель ЗУ переводится в состояние «ЗУ открыто». Моделирование захвата осуществляется путем пошагового изменения положения элементов ЗУ для перевода его в состояние «ЗУ закрыто». На некотором шаге поверхности ОМ и звена ЗУ начинают пересекаться. Когда количество контактных областей становится больше двух, захват считается осуществленным. Для такого состояния проводится анализ свойств захвата и его количественная и качественная оценка. На основании результатов оценки происходит выбор наиболее удачного способа захвата.

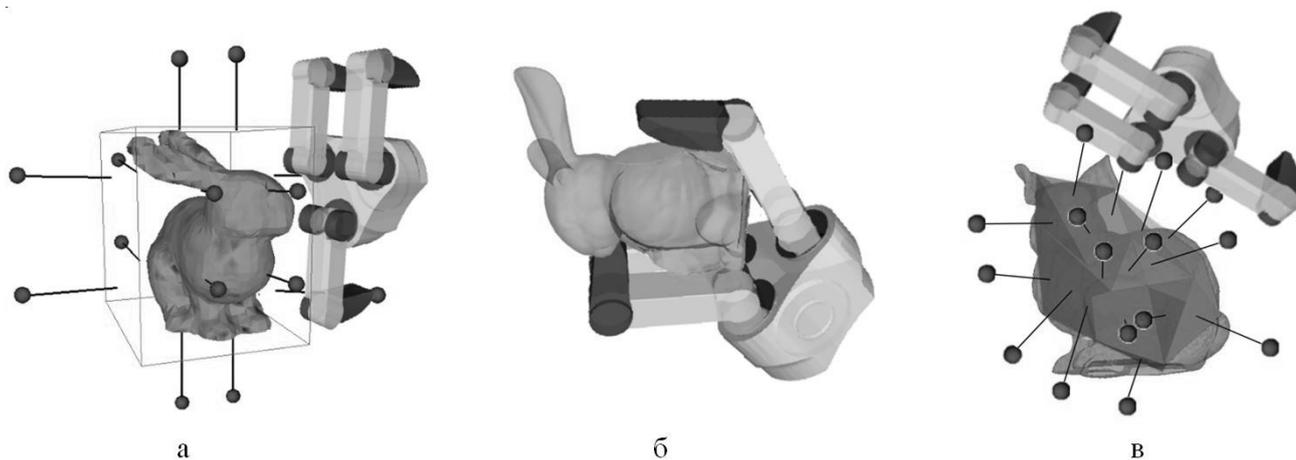


Рисунок 1 – Формирование гипотез захвата

Недостатком такого формирования гипотез захвата является использование простейших ограничивающих объемов. Для объектов, обладающих сложной формой, это приводит к малому количеству гипотез, которые чаще всего являются «неудачными» (рис. 1 б), поскольку ЗУ находится на таком удалении от объекта, что при закрытии его звенья не касаются поверхности ОМ.

Ввиду этого, в качестве вместо ограничивающего объема в предлагаемом алгоритме планирования захвата используется многогранник, получаемый путем уменьшения количества вершин полигональной модели ОМ. Формирование гипотез осуществляется следующим образом. Рассчитываются геометрические центры полигонов ограничивающего объема и в них восстанавливаются нормали к соответствующим полигонам. Далее, аналогично выше описанному алгоритму, вдоль нормалей откладывается точки, удаленные от центров полигонов на заданное расстояние, в которые устанавливается модель ЗУ (рис. 1 в). После чего для каждой гипотезы осуществляется моделирование захвата способом, описанным для GraspIt! и OpenRAVE способом.

Алгоритм планирования траекторий движения звеньев ЗУ для захвата ОМ формирует законы изменения движения следующим образом:

$$q_{ji} = q_{jcl} + \frac{(q_{jop} - q_{jcl})}{n} \cdot i, \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, m,$$

где  $q_{ji}$  – величина обобщенной координаты  $j$ -того шарнира на  $i$ -том шаге моделирования,  $q_{jcl}$  и  $q_{jop}$  – значения обобщенных координат  $j$ -того шарнира в положении «ЗУ закрыто» и «ЗУ открыто» соответственно,  $n$  – количество шагов моделирования.

На каждом шаге моделирования выполняется алгоритм определения пересечений полигональных моделей ОМ и звеньев ЗУ [5]. Если пересечение не обнаружено, происходит переход на следующий шаг моделирования, иначе – выполняется алгоритм расчета сил контактного взаимодействия между ОМ и звеньями ЗУ [6], учитывающий контактные ограничения. В результате формируются множество вершин, входящих в поверхности контактов, и соответствующее им множество сил контактного взаимодействия  $R = \{r_1, \dots, r_m\}$  и  $F_R = \{f_{R1}, \dots, f_{Rm}\}$ . Работу этих алгоритмов для представленного на рис. 2 а способа захвата иллюстрируют рис. 2 б и рис. 2 в.

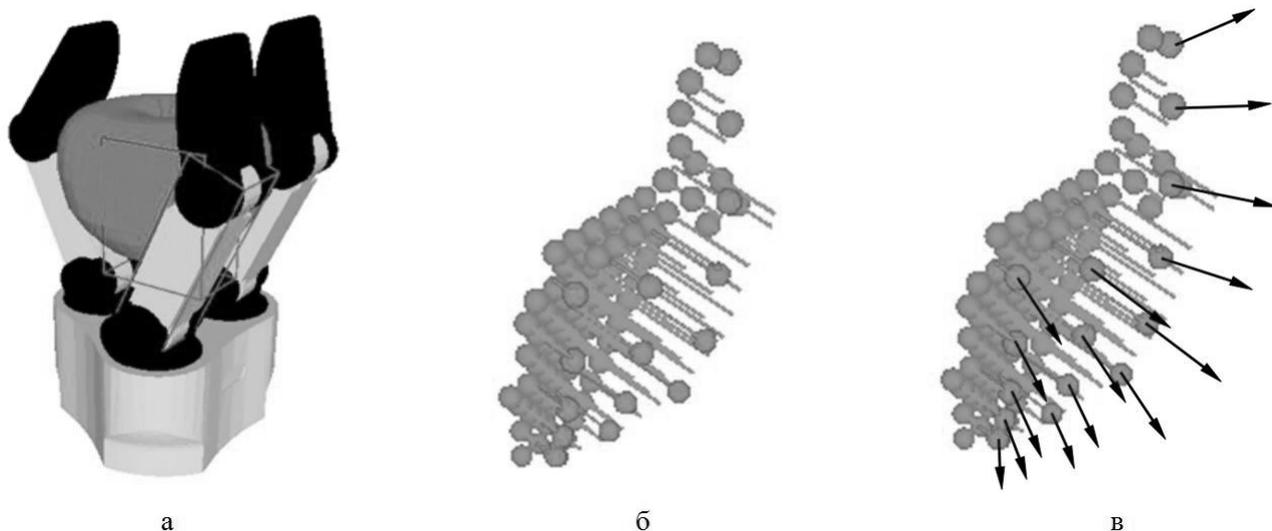


Рисунок 2 – Определение наличия пересечения и расчет сил контактного взаимодействия

После обнаружения пересечения и расчета сил контактного взаимодействия, выполняется алгоритм определения центра масс деформированного в процессе захвата ОМ.

Вначале определяется поверхность ОМ после деформации. Изменение формы поверхности происходит не только в области контакта, но и в области, примыкающей к контактной поверхности. Расчет смещений вершин, входящих в область, примыкающую к контактной поверхности, осуществляется итеративно. Вначале определяются смещения вершин  $q_i$ , которые образуют полигоны с вершинами, входящими в поверхность контактов. Затем рассчитываются смещения вершин, которые образуют полигоны с вершинами  $q_i$ , и так далее до тех пор, пока смещение не станет меньше малой заданной величины. В итоге формируется множество вершин, входящих в область, примыкающую к контактной поверхности, и испытывающих смещение в процессе деформации объекта –  $Q = \{q_1, \dots, q_t\}$ .

В основе физической модели деформации лежит приближение Буссинеска [7]. Вектор смещения  $u_{Q_i}$  для вершины  $q_i$ :

$$u_{Q_i} = \frac{1-\nu}{2 \cdot \pi \cdot G} \cdot \sum_{k=1}^n \frac{f_{Rk}}{l_k}, \quad i = 1, 2, \dots, t,$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона,  $G$  – модуль сдвига,  $l_k$  – расстояние между вершиной  $q_i$  и  $r_i$ , к которой приложена точечная сила  $f_{Rk}$ . Учитывая неизменяемость объема ОМ, определяются смещения вершин не входящих в область, примыкающую к контактной.

Для определения центра масс деформированного ОМ его полигональная модель разбивается трехмерной сеткой. Определяются ячейки, которые находятся внутри модели деформированного ОМ и ячейки, внутри которых находятся вершины модели. Каждой такой ячейке назначается весовой коэффициент  $v_i$ , эквивалентный объему. В итоге радиус-вектор центра масс  $C$  отыскивается из соотношения:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^k v_i \cdot l_i}{\sum_{i=1}^k v_i},$$

где  $l_i$  – радиус-вектор каждой ячейки.

Результат работы алгоритма представлен на рис. 3. На рис. 3 а изображен недеформированный ОМ и положение его центр масс, на рис. 3 б – деформированный ОМ, на рис. 3 в – найденный центра масс деформируемого ОМ.

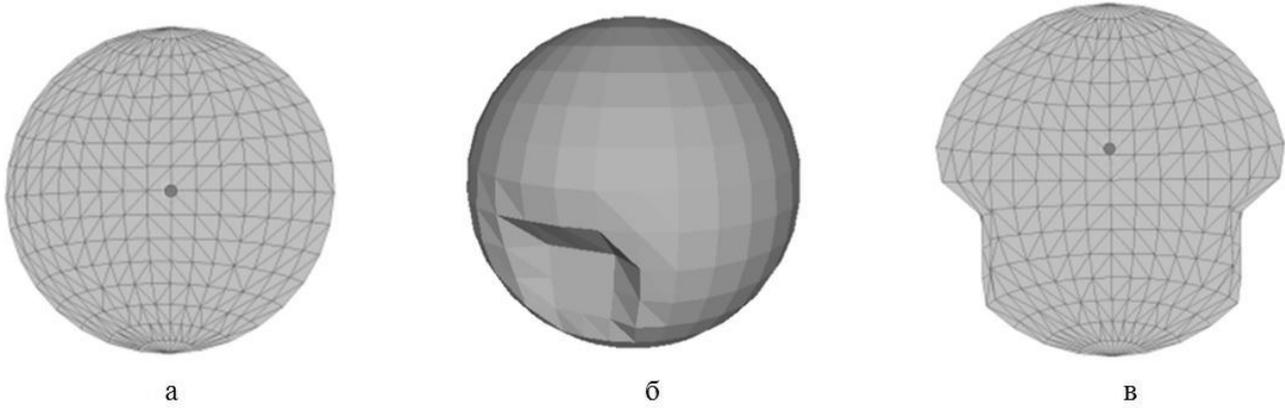


Рисунок 3 – Определение центра масс деформируемого объекта в процессе захвата

Далее выполняется алгоритм оценки устойчивости захвата, который основан на проверке выполнения неравенства [8]:

$$w_{ext} \leq -G\gamma_{con}, \quad (1)$$

где  $G$  – матрица захвата [8], которая рассчитывается на каждом шаге моделирования, поскольку изменяются положение центра масс ОМ и точек приложения равнодействующих сил в каждой кантатной области,  $w_{ext}$  и  $\gamma_{con}$  – блочные векторы внешнего воздействия и контактных сил и моментов:

$$w_{ext} = [f \quad \mu]^T, \quad \gamma_{con} = [f_1 \quad \mu_1 \quad \dots \quad f_i \quad \mu_i \quad \dots \quad f_n \quad \mu_n]^T,$$

где  $f$  и  $\mu$  – равнодействующая сила и крутящий момент, приложенных к ОМ со стороны внешнего мира,  $f_i$  и  $\mu_i$  – равнодействующая сила и крутящий момент, приложенных к ОМ со стороны ЗУ в  $i$ -той контактной области.

Если условие (1) не выполняется, на следующем шаге моделирования продолжается движение всех шарниров модели ЗУМ. Движение осуществляется до тех пор, пока неравенство не будет выполнено.

Затем выполняется алгоритм проверки достижимости желаемого положения ОМ, т.е. определения возможности выполнения последующей манипуляционной задачи. Для этого отыскивается решение матричного уравнения:

$$q = J^{-1}G^T u, \quad (2)$$

где  $q$  – вектор, составленный из значений углов шарниров захватного устройства,  $J$  – матрица Якоби [8],  $u$  – вектор, описывающий положение и ориентацию ОМ.

Если уравнение (2) не имеет решение, то при таком способе захвата желаемое положение ОМ является не достижимым, и гипотеза захвата исключается из дальнейшего рассмотрения.

Далее выполняется алгоритм планирования движения шарниров ЗУ для перемещения ОМ. Траектория ОМ полагается линейной. Она разбивается на заданное число шагов. Для каждого промежуточного положения ОМ отыскивается положение центра контактной области. Затем путем решения обратной кинематической задачи [9] определяется предварительная конфигурация ЗУ для всех промежуточных положений.

Затем моделируется захват ОМ для каждого промежуточного положения, уточняются силы, с которыми звенья ЗУ действуют на ОМ, положение центра масс ОМ, матрица захвата. После этого рассчитывается блочный вектор контактных сил и моментов, при котором захват является устойчивым. Он определяется из решения матричного уравнения (1):

$$\gamma_{con \min} = G^+ w_{ext} + (I - G^+ G) y_{\min},$$

где  $G^+$  – псевдообратная матрица к матрице захвата  $G$ ,  $I$  – единичная матрица,  $y_{\min}$  – произвольный вектор, который выбирается таким образом, чтобы вектор  $\gamma_{con \min}$  был минимальным,  $(I - G^+ G)$  – базис нуль-пространства матрицы захвата, определяющего подпространство внутренних сил и моментов.

Далее сравниваются значения сил, полученных в результате моделирования, и сил, полученных в результате расчета. На основе этого сравнения происходит коррекция значений углов шарниров ЗУ таким образом, чтобы силы, полученные в результате моделирования, были близки к расчетным значениям, но не были их меньше.

В конце выполняется алгоритм определения способа захвата, который в качестве входных параметров принимает положение ОМ относительно манипуляционного робота. Результатом работы алгоритма является гипотеза захвата, для достижения предзахватного положения которой траектория манипулятора в обобщенных координатах минимальна и отсутствует столкновение между исполнительным механизмом и объектами внешнего мира на протяжении выполнения всей манипуляционной операции.

Таким образом, в работе описан алгоритм симулятора захвата. Отличительными особенностями рассмотренного симулятора захвата от существующих алгоритмов планирования захвата являются:

- проверка на достижимость желаемого положения ОМ на этапе планирования захвата,
- минимизация сил, прикладываемых к поверхности ОМ со стороны ЗУ,
- учет изменение формы поверхности ОМ и смещение его центра масс, вызванные деформацией ОМ в процессе захвата и выполнения манипуляционной задачи.

В дальнейшем планируется развитие алгоритмов анализа контактных сил в процессе выполнения манипуляционной операции.

1. Miller A., Allen P. Graspit! A versatile simulator for robotic grasping // IEEE Robot. Autom. Mag., 2004, vol. 11, no. 4, pp. 110–122.
2. Diankov R. Automated construction of robotic manipulation programs. Ph.D. thesis, Carnegie Mellon University, Robotics Institute, 2010.
3. Robot Operating System. URL: <http://www.ros.org/> (дата обращения 22.05.2017)
4. Unified Robot Description Format. URL: <http://wiki.ros.org/urdf> (дата обращения 22.05.2017)
5. Лесков А.Г., Селиверстова Е.В. Расчет областей пересечения поверхностей захватных устройств манипуляторов и деформируемых объектов при планировании и моделировании захвата // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение, 2016, №6, с. 97-114.
6. Лесков А.Г., Селиверстова Е.В. Расчет сил контактного взаимодействия между деформируемым объектом и звеньями захватного устройства манипулятора // Труды Международной научно-технической конференции «ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА», 2016, с. 129-133.
7. Леденев В.В., Однолько В.Г., Нгуен З.Х. Теоретические основы механики деформирования и разрушения. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2013, 312 с.
8. Prattichizzo D., Bicchi A. Consistent task specification for manipulation systems with general kinematics // ASME Journal of Dynamics Systems Measurements and Control, 1997, vol. 113, pp. 760–767.
9. Лесков А.Г., Бажинова К.В., Морошкин С.Д., Феоктистова Е.В. Построение моделей кинематики исполнительных механизмов манипуляционных роботов с использованием блочных матриц // Инженерный журнал: наука и инновации. Электронное научно-техническое издание. 2013, #9(21). URL: <http://engjournal.ru/articles/954/954.pdf> (дата обращения 22.05.2017).

*V.P. Makarychev*

## **ADAPTIVE VISUAL SERVO CONTROL OF ROBOTS**

*CNII RTC, St. Petersburg, makar@rtc.ru*

### **Abstract**

The article is devoted to the exploration of Visual servo different robots: Mobile, underwater, flying. Proposed unified system structure control, adaptive control algorithms based on the model, the application of image processing techniques in Adaptive management.

Key words: ADP, servo control, visualization, transformation groups, technical vision, images.

Control systems (CS) of modern intelligent robots should be harmonized and possess powerful enough control algorithms [1]. This paper describes how such a control system, which was created over several decades and has been implemented in several terrestrial and space robots [1-6].

Such unified SU must contain key components to ensure the functioning of the robot from the formation of the job before his execution servo system drives:

- setting goals or tasks the robot in the form of a special program of robot programming language Voldemar [1-2];
- building a software robot trajectories, including steeplechase Wednesday, static and dynamic [1, 7, 8];
- vision system (VS) [9, 10];

- software tracking the trajectory of an Adaptive robot servo system [11-15].

VS contemporary robots use a variety of methods to manipulate images [9, 10, 16], among which a special place occupy optical streams [17-18]. In recent years, thanks to a strong quality improvement in STZ intelligent robots, it became possible to apply the so-called Visual servo control based on a comparison of reference and current frames during the movement of the robot [19-28].

### Visual servo control

However, in the past 30 years occurred in the West and successfully developed a new direction, called Visual servo control (visual servoing) when feedback to control the movement of the robot is carried out without calculate generalized or spatial coordinates directly on the robot, and Visual information.

The present work is devoted to, first of all, this topic, although it considered the methods can be successfully applied in other ways. Traditional Visual servo control uses instead the robot coordinate signs for external image Wednesday and their disagreement. It is proposed instead of signs use the entire image or parts of it, and disagreement in the dynamics between the images defined by linking their continuing transformation. As these changes can be used by groups of movements of the plane, affine and projective group.

To find such a transformation used frequency methods based on the representation theory of groups and spatial methods based on optical flow or local correlation image areas.

The resulting image mismatch is recalculated in the coordinates, speed, or moments of drives the robot. Next, use conventional control algorithms based on inverse problems of dynamics.

In Visual Servoing Control the research tool is transformation  $g = \Phi(x)$  displaying absolute Cartesian space to features space. To obtain it, you must know the matrix dimension  $2 \times 4$  camera model  $M$ , which is carrying out the conversion in projective coordinates  $x = (x_1, x_2, x_3, 1)^T \in R^4$  of a 3D space in two-dimensional image  $I = (i_1, i_2, 1) \in R^3$ :

$$I = Mx. \quad (1)$$

This matrix is conveniently divided into two main components: an internal model of the camera, depending on camera settings and external camera model defined by camera position in space  $R^3$ .

The main idea of the proposed method of image management is the ability to find a continuous transform, interrelating two images: target, desired, and current. To do this, you can use different methods, including: local correlation, optical flow, finally, the most powerful-frequency method based on the theory of representations of groups.

In General, such a conversion is the conversion of the projective plane  $R^3$ , but assuming affiliation the basic elements of the scene the same plane (which is the case, for example, when a much greater distances to objects in the scene compared to the distances between objects) can focus on affine transformation  $I \in R^2$ .

Let the result of image processing produces the transformation  $\Theta$  (motion, affine, projective) linking images  $I_1$  and  $I_2$ : target and current,  $I_1 = I(t), I_2 = I_3(t)$ , respectively:

$$I(t) = \Theta I_3(t). \quad (2)$$

Of course, the equation (2) should take into account the equation of the Chamber model (1), but with this approach, you do not need to actually restore the structure of the scene, i.e. objects in space  $R^3$ .

As the target image can act as an image in target position of the robot, and images that match the interim provisions during the movement: that can be considered visual programming path  $I_3(t)$  and finds its expression depending on time  $t$ . The robot is close-ups from mobile video camera for the Visual software path.

When a classic Visual Servoing from the above situation conversion function manipulator or mobile robot in signs of moving toward differentiation Jakopian  $J$ , linking the robot speed with the speed of change of the vector:

$$\begin{aligned} \dot{g} &= \left\{ \frac{\partial \Phi(x)}{\partial x} \right\} \dot{x} = J(x) \dot{x}, \\ \dot{x} &= J^{-1}(x) \dot{g}. \end{aligned} \quad (3)$$

from here you may get control algorithm, for example, in the form of job rate:

$$v_{r1}(t) = \dot{x}(t) = KJ^{-1}(x)(g(t) - g_3(t)). \quad (4)$$

where  $g_3$  is the vector of the signs specified in the target image.

Next, the standard way of solving inverse problem of kinematics for speed you can go from an absolute coordinate robot to his relative coordinates  $q$  drives:

$$\begin{aligned}\dot{q} &= \left\{ \frac{\partial F(q)}{\partial x} \right\} \dot{x} = J_q(q) \dot{x}, \\ \dot{x} &= J_q^{-1}(q) \dot{q}.\end{aligned}\tag{5}$$

And from equations (2), (3) is similar to the control algorithm for relative coordinates:

$$v_{q1}(t) = \dot{q}(t) = K_q J_q^{-1} J^{-1}(x) (g(t) - g_3(t))\tag{6}$$

A method of Visual servo on status based on image conversion (2) similar to the classical algorithms (4), (6):

$$v = K_\Theta (I(t) - I_3(t)) = K_\Theta (\Theta I_3(t) - I_3(t)) = K_\Theta (\Theta - E) I_3(t) = K_\Theta \Delta \Theta I_3(t)\tag{7}$$

Thus, the misalignment of the images, i.e. image obtained by subtracting two images composed of  $n_1 \times n_2$  pixels must be converted to vector offices dimension  $n$  - number of managed coordinates. Therefore, it is necessary to solve the problem of conversion matrices of dimension  $n_1 \times n_2$  control into a vector of dimension  $n$ .

Note that similar problems arise in the classical sense and convert  $z = F(q)$ ,  $z = (x, w)^T \in R^3 \times R^3 = R^6$ ,  $q \in Q^n$  relative coordinates to absolute  $z = R^6$ , and in the case of classic Visual servo when converting absolute  $z = R^6$  or relative  $q \in Q^n$  coordinates of robot in feature space  $g = (g_1, \dots, g_N)^T \in G$ :

$$g = \Phi(x) = \Phi(F(q))\tag{8}$$

In all situations, the decision involved pseudoinverse Jacobian.

Let at least one image I known meet him coordinates of robot  $z = F(q) \in R^6$  or  $q \in Q^n$ . Then you can for any other images  $\tilde{I}$  to find the appropriate position of the robot  $\tilde{r} \in R^6$ .

A generalization of the algorithm (7) will manage the couple based on inverse dynamics problems [14-17]:

$$M = A(q, \xi) [\ddot{q}_p + \Gamma_1 (\dot{q} - \dot{q}_p) + \Gamma_0 (q - q_p)] + b(q, \dot{q}, \xi),\tag{9}$$

where  $\Gamma_1$  and  $\Gamma_2$  - is 6-6-matrix coefficients of the feedback channels on dynamic error  $e = q_p(t) - q(t)$  and its speed changes  $\dot{e} = \dot{q}_p(t) - \dot{q}(t)$ .

Used in the algorithm values are retrieved using the following procedures:

- $q_p(t)$ ,  $\dot{q}_p(t)$ ,  $\ddot{q}_p(t)$  - build a predetermined path;
- $q_p(t)$ ,  $\dot{q}_p(t)$ ,  $\ddot{q}_p(t)$  - with sensors and actuators;
- $A(q, \xi)$ ,  $b(q, \dot{q}, \xi)$  - as a result of computing the coefficients of the Lagrange equations;
- $\xi$  - vector design parameters of the robot cast to form (as inertia matrix H) needed to compute the coefficients of the Lagrange equations;

-  $\Gamma_1, \Gamma_0$  - matrix of diagonal reinforcement ratios  $\Gamma_1 = \text{diag}(\gamma_{1ii})_{i=1}^6$ ,  $\Gamma_0 = \text{diag}(\gamma_{0ii})_{i=1}^6$ , selected usually from sustainability conditions and conditions  $\Gamma_1 \geq 2\sqrt{\Gamma_0}$  of aperiodicity of the transition process.

## Experiments

The proposed mathematical method was modeled for moving along the corridor of the mobile robot docking of spacecraft to the international space station. The source data were two sequences of video frames received when driving a real robot. The first sequence was assigned for Visual Programming trajectory, and the second was used to simulate the real movement of the robot. As the first real frame selects the first frame of the second sequence. Each subsequent frame from the previous imitation real via its geometric transformation obtained considering modeling of moving robot. In addition, in order to maintain the sustainability of this process used the second sequence video frames.

At each step of formulating policy on speed drives robot software and compared the actual image, and the signal was formed according to the algorithm (7).

The proposed method was applied to multiple images of different nature: the image of the corridor in the building by driving a mobile robot, overviews of the surface of the international space station (ISS), images of the ISS in the dock with her spacecraft images of persons of different people from different perspective, image surfaces, which is moving mobile robot.

In the example of corridor image had enough poor structure, however Harris detector was allocated about 30 FROM. To FROM local areas was applied and the correlation operator found the point of maximum value of this operator, which is highlighted on the chart the correlation.

Review images of the surface of the ISS was characterized by vibrant colors and lots of large and small details Further defined algorithm shifts FROM the first image to the second that gave the necessary correspondence between points in two images and further an affine transformation.

Using this matrix space robot (for example, pristykuemyj apparatus) can determine how to change their situation in the space of the geometric parameters of the scene, or vice versa, the coordinates of the objects in the scene with the famous moving robot.

Another use could be diagnosing of malfunctions on the surface of the ISS. For this purpose it is necessary to make a sequence of transformations of the received frame to bring it to a similar frame of reference images radiologically surface. Then the difference between these frames will show the differences between them, which correspond to potential malfunctions and damage.

For grayscale images of the ISS when the dock with her spacecraft when determining FROM (before or after) it was necessary to remove the parasite digital information on the display. As a result of which the number diminishes and become reasonable for processing. Referring to artifice and symmetry of the resulting scene is of good quality, even for the purpose of precise movement and docking.

Finally, in the case of images of persons of different people from different perspective, difficulties with fewer of the small size of the image (small object, low resolution). When you increase the sensitivity of the detector receives a greater number of Harris and DATED, they begin to interfere with each other, given the small size of the frame. This leads to the need when working with persons have enough high resolution cameras with a corresponding amount of faces to the frame.

Thus, a pilot study conducted showed the high quality of the affine transformation and the effectiveness of the method.

1. Makarychev V.P., Yurevich E.I. Supervisory management of space manipulators. — Spb.: Asterion, 2005. -108 with.
2. Babkin E.V., Belyaev M.YU., I.A., Vasilyev V.S., Zaborovsky, V.P. Makarychev, A. Silinenko, K. Landcettel'. Supervisory control of space robot to the international space station (ISS) using the Internet//actual problems of protection and security. Extreme robotics. Proceedings of the XIV all-Russian scientific-practical Conference RARAN (4-7 April 2011). Volume 5. -M.: publication of the Russian Academy of missile and artillery Sciences. 2011.32-42.
3. Zhukov A., Makarychev V.P. comparative analysis of underwater vehicle control algorithms//science week SPbPU: materials of scientific conference with international participation the Institute of metallurgy, mechanical engineering and transport h. 2-Spb.: IZD-vo Polytechnic. Irkutsk, 2016. -358 s. 42-45.
4. Leontyev V.A., Makarychev V.P. Program numerical Modeling Dynamics and control systems implemented in submersible program Wednesday MATLAB-SIMULINK (programme of Submersible). Application No. 2016663316 from 07.12.2016. Certificate № 2017611332 from 01.02.2017.
5. Leontyev V.A., Makarychev V.P. Computer software complex motion control model of autonomous underwater vehicle, consisting of its mathematical model in the program Wednesday ADAMS/VIEW and introducing into it management module developed Wednesday MATLAB-SIMULINK. Application No. 2016663472 from 07.12.2016. Certificate № 2017611307 from 01.02.2017.
6. Korsakov, Makarychev V.P., Fomin I.S. program for experimental verification of the algorithm determining the position and orientation of the vehicle. Application No. 2017611397 from 20.02.2017. Certificate № 2017614156 from 06.04.2017.
7. Timofeev A.V. Building Programme in the trajectory of the Adaptive control system. -M.: energy, 1980, with 107.
8. V.P. Makarychev. Method variables build strategies trajectories of robots in steeplechase Wednesday//artificial intelligence, no. 3, National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of problems of artificial intelligence, 2008. S. 451-461.
9. L.G. Shapiro, G.G. Stockman. Computer vision. Pearson Education, Inc. Prentice Hall. 2001. 752 p
10. D. A. Forsyth, J. Ponce. Computer vision. A modern approach. Pearson Education, Inc. Prentice Hall. 2003. 928 p.

11. R. Paul, Modelling, "Trajectory Calculation and Servoing of a Computer Controlled Arm", Stanford Artificial Intelligence Project, Memo AIM-177, Computer Science Department Report CS-311, November 1972.
12. Timofeev A.V., Jekalo Y. Stability and stabilization policy trajectories robot manipulator, *automatics and telemechanics*, No. 10, 1976. C. 148-156.
13. Dynamics control robots. -M.: "Nauka". Home Edition physico-mathematical literature. 1984-336 s.
14. Kozlov V.V., Konovalov A.S., Makarychev V.P. Construction of Adaptive servo control algorithm based on inverse problems of dynamics and neural networks//2012 information-management systems. No. 3 (58). C. 29-32.
15. Kozlov V.V., Makarychev V.P. Diagnostics equipment functioning on the basis of identification algorithms. Tutorial. — Spb.: SUAI. 2008.88 sec.
16. A.J. Davison. Mobil Robot Navigation Using Active Vision. PhD thesis, University of Oxford, 1998/ Available at <http://www.robots.ox.ac.uk/~ajd/>
17. S.S. Beauchemin and J.L. Barron. The Computation of Optical Flow, Dept. of Computer Science, University of Western Ontario, London, Ontario, Canada, N6A 5B7. 44 p.
18. V.P. Makarychev. "Application of Optical Flow and Methods of Group Lee Representation in Problems of Detecting of Movements and Pattern Detection on the Images" // *Solid State Phenomena. Mechatronic Systems and Materials III*. V. 145 (2008). P. 582–587. ISSN 1012 0394.
19. S. Hutchinson, G.D. Hager, and P.I. Corke, "A tutorial on visual servo control," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, vol. 12, pp. 651-670, Oct. 1996.
20. O. Nasisi, R. Carelli. "Adaptive servo visual robot control", in *Robotics and Autonomous Systems*, 43 (2003), pp. 51-78.
21. F. Chaumette, S. Hutchinson, "Visual servo control, part I: basic approaches", *IEEE Robotics and Automation magazine*, 2006, 13 (4), pp. 82–90.
22. F. Chaumette, S. Hutchinson, "Visual servo control, part II: advanced approaches", *IEEE Robotics and Automation magazine*, 2007, 14 (1), pp. 109–118.
23. C. Collewet, E. Marchand, F. Chaumette, "Visual servoing set free from image processing". *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, ICRA'08, May 2008, Pasadena, United States*.
24. Makarychev V.P. Optical flows and methods of the theory of representations of lie groups in image processing tasks//scientific and technical statements of Spbspu. Major release. -St. Petersburg. Polytechnic University Publishing House, no. 3 (59), 2008. C. 30-37.
25. Makarychev V.P. Method local correlation for the definition and identification of affinely invariant objects on images. Materials 5-th all-Russian Conference "advanced system and management problems. — Taganrog: TAGANROG TECHNOLOGICAL INSTITUTE publishing house FMS, 2010. C. 85-89.
26. V.P. Makarychev. Build robot motion paths on a discrete sequence of video frames//actual problems of protection and security. Extreme robotics. Proceedings of the XIV all-Russian scientific-practical Conference RARAN (4-7 April 2011). Volume 5. -M.: publication of the Russian Academy of missile and artillery Sciences. 2011.49-55.
27. Makarychev V.P. affine-invariant recognition algorithms images based on local correlation methods//proceedings of the all-Russian scientific and technical conference «Extreme» robotics. -St. Petersburg: IZD-vo «politehnika-service», 2012. P. 181-187.
28. Makarychev V.p. Finding affine-invariant images for navigation tasks, recognition and Diagnostics/autonomous Robotics/ Robotics and technical Cybernetics, 2014, vol. 2, no. 1, pp. 75-78.

## АДАПТИВНОЕ ВИЗУАЛЬНОЕ СЕРВОУПРАВЛЕНИЕ РОБОТОВ

*ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург, makar@rtc.ru*

### Аннотация

Статья посвящена исследованию визуального сервоуправления различных роботов: мобильных, подводных, летающих. Предложена унифицированная структура системы управления, алгоритмы адаптивного управления на основе модели, применение методов обработки изображений в адаптивном управлении.

Ключевые слова: адаптация, сервоуправление, визуализация, группы преобразований, техническое зрение, изображения.

### Введение

Системы управления (СУ) современных интеллектуальных роботов должны быть унифицированы и обладать достаточно мощными алгоритмами управления [1]. В настоящей работе описана такая система управления, которая создавалась в течение нескольких десятилетий и была реализована в нескольких наземных и космических роботах [1-6].

Такая унифицированная СУ должна содержать основные компоненты, обеспечивающие функционирование робота от формирования задания до его исполнения сервосистемой приводов:

- задание цели или задачи роботу в виде программы на специальном языке программирования роботов Voldemar [1-2];
- построение программных траекторий робота, в том числе в среде с препятствиями, статическими и динамическими [1, 7, 8];
- система технического зрения (СТЗ) [9, 10];
- отслеживание программной траектории адаптивной сервосистемой робота [11-15].

СТЗ современных роботов используют разнообразные методы обработки изображений [9, 10, 16], среди которых особое место занимают оптические потоки [17-18]. В последние годы, благодаря сильному повышению качества СТЗ, в интеллектуальных роботах стало возможным применять, так называемое визуальное сервоуправление, основанное на сравнении эталонных и текущих кадров в процессе движения робота [19-28].

### Визуальное сервоуправление

Однако в последние 30 лет на Западе возникло и успешно развивается новое направление, получившее название визуального сервоуправления (visual servoing), когда обратная связь для управления движением робота осуществляется без вычисления обобщённых или пространственных координат робота, а непосредственно по визуальной информации.

Настоящая работа посвящена, в первую очередь, именно этой теме, хотя рассмотренные в ней методы могут с успехом применяться и другими способами. Традиционное визуальное сервоуправление использует вместо координат робота признаки на изображении внешней среды и их рассогласование. Предлагается вместо признаков использовать всё изображение либо его части, а рассогласование в динамике между изображениями определять с помощью связывающего их непрерывного преобразования. В качестве таких преобразований могут использоваться группы движений плоскости, аффинная и проективная группы.

Для нахождения такого преобразования используются частотные методы, основанные на теории представлений групп и пространственные методы на основе оптических потоков или локальных корреляций областей изображения.

Полученное рассогласование изображений пересчитывается в координаты, скорости или моменты приводов робота. Далее используются обычные алгоритмы управления на основе обратных задач динамики.

При визуальном сервоуправлении основным инструментом исследования является отображение  $g = \Phi(x)$  пространства абсолютных декартовых координат в пространство видеопризнаков  $g$ . Для его получения необходимо знать матрицу размерности  $2 \times 4$  модели камеры  $M$ , осуществляющей преобразование в проективных координатах трёхмерного пространства среды  $x = (x_1, x_2, x_3, 1)^T \in R^4$  в двумерное изображение  $I = (i_1, i_2, 1) \in R^3$ :

$$I = Mx. \quad (1)$$

Эту матрицу удобно разбить на две основные составляющие: внутренняя модель камеры, зависящая от параметров камеры, и внешняя модель камеры, определяемая положением камеры в пространстве  $R^3$ .

Основная идея предлагаемого метода управления по изображению состоит в возможности найти непрерывное преобразование, связывающие два изображения: целевое, желаемое, и текущее. Для этого можно использовать разные методы, в том числе: локальные корреляции, оптические потоки, наконец, наиболее мощный – частотный метод на основе теории представления групп.

В общем случае такое преобразование является проективным преобразованием плоскости  $R^2$ , но предполагая принадлежность основных элементов сцены одной плоскости (что имеет место, например, при намного больших расстояниях до объектов сцены по сравнению с расстояниями между объектами) можно ограничиться аффинным преобразованием  $I \in R^2$ .

Пусть в результате обработки изображения получается преобразование  $\Theta$  (движения, аффинное, проективное), связывающее изображения  $I_1$  и  $I_2$ : целевое и текущее,  $I_1 = I(t), I_2 = I_3(t)$ , соответственно:

$$I(t) = \Theta I_3(t). \quad (2)$$

Конечно, уравнение (2) должно учитывать уравнение модели камеры (1), но при таком подходе не требуется, вообще говоря, восстановления структуры сцены, т.е. положения объектов в пространстве  $R^3$ .

В качестве целевого изображения может выступать как изображение в целевом положении робота, так и изображения, соответствующие промежуточным положениям в процессе движения: что можно считать визуальной программной траекторией  $I_3(t)$  и находит своё выражение в зависимости от времени  $t$ . Цель управления робота состоит в максимальном приближении получаемого с подвижной камеры видеоряда к запланированному на визуальной программной траектории.

При классическом визуальном сервоуправлении от указанной выше функции преобразования положения манипулятора или мобильного робота в признаки  $g = \Phi(x)$  переходят дифференцированием к Якобиану  $J$ , связывая скорость робота со скоростью изменения вектора признаков:

$$\begin{aligned} \dot{g} &= \left\{ \frac{\partial \Phi(x)}{\partial x} \right\} \dot{x} = J(x) \dot{x}, \\ \dot{x} &= J^{-1}(x) \dot{g}. \end{aligned} \quad (3)$$

Отсюда может получить алгоритм управления, например, в виде задания скорости:

$$v_{r1}(t) = \dot{x}(t) = KJ^{-1}(x)(g(t) - g_3(t)). \quad (4)$$

где  $g_3$  – вектор признаков заданного целевого изображения.

Далее стандартным способом, решая обратную задачу кинематики для скоростей можно перейти от абсолютных координат робота к его относительным координатам  $q$  приводов:

$$\begin{aligned} \dot{q} &= \left\{ \frac{\partial F(q)}{\partial x} \right\} \dot{x} = J_q(q) \dot{q}, \\ \dot{x} &= J_q^{-1}(q) \dot{q}. \end{aligned} \quad (5)$$

И из уравнений (2), (3) получается аналогичный алгоритм управления для относительных координат:

$$v_{q1}(t) = \dot{q}(t) = K_q J_q^{-1} J^{-1}(x)(g(t) - g_3(t)). \quad (6)$$

Предлагается метод визуального сервоуправления по положению на основе преобразования изображений (2) аналогичный классическим алгоритмам (4), (6):

$$v = K_\Theta (I(t) - I_3(t)) = K_\Theta (\Theta I_3(t) - I_3(t)) = K_\Theta (\Theta - E) I_3(t) = K_\Theta \Delta \Theta I_3(t). \quad (7)$$

Таким образом, рассогласование изображений, т.е. изображение, полученное вычитанием двух изображений состоящее из  $n_1 \times n_2$  пикселей, должно быть преобразовано в вектор управлений

размерности  $n$  – число управляемых координат. Следовательно, необходимо решить проблему преобразования матрицы размерности  $n_1 \times n_2$  в вектор управления размерности  $n$ .

Заметим, что аналогичные проблемы встают и в классической задаче преобразования  $z = F(q), z = (x, w)^T \in R^3 \times R^3 = R^6, q \in Q^n$  абсолютных координат в относительные, и в случае классического визуального сервоуправления при преобразовании абсолютных  $z \in R^6$  или относительных  $q \in Q^n$  координат робота в пространство признаков  $g = (g_1, \dots, g_N)^T \in G$ :

$$g = \Phi(x) = \Phi(F(q)). \quad (8)$$

Во всех ситуациях в решении участвует псевдообратная матрица якобиана.

Пусть хотя бы для одного изображения  $I$  известны отвечающие ему координаты робота  $z = F(q) \in R^6$  или  $q \in Q^n$ . Тогда можно и для любого другого изображения  $\tilde{I}$  найти соответствующее положение робота  $\tilde{r} \in R^6$ .

Обобщением алгоритма (7) будет моментное управление на основе обратных задач динамики [14-17]:

$$M = A(q, \xi)[\ddot{q}_p + \Gamma_1(\dot{q} - \dot{q}_p) + \Gamma_0(q - q_p)] + b(q, \dot{q}, \xi), \quad (9)$$

где  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$  -  $6 \times 6$ -матрицы коэффициентов усиления в каналах обратной связи по динамической ошибке  $e = q_p(t) - q(t)$  и по скорости её изменения  $\dot{e} = \dot{q}_p(t) - \dot{q}(t)$ .

Используемые в алгоритме величины получаются с помощью следующих процедур:

- $q_p(t), \dot{q}_p(t), \ddot{q}_p(t)$  – в результате построения заданной траектории;
- $q_p(t), \dot{q}_p(t), \ddot{q}_p(t)$  – с датчиков приводов;
- $A(q, \xi), b(q, \dot{q}, \xi)$  – в результате вычисления коэффициентов уравнений Лагранжа;
- $\xi$  – вектор конструктивных параметров робота приведенный к форме (в виде матриц инерции  $H$ ), необходимой для расчета коэффициентов уравнений Лагранжа;
- $\Gamma_1, \Gamma_0$  – матрицы диагональных коэффициентов  $\Gamma_1 = \text{diag}(\gamma_{1ii})_{i=1}^6, \Gamma_0 = \text{diag}(\gamma_{0ii})_{i=1}^6$ , выбираемые обычно из условия обеспечения устойчивости и условия  $\Gamma_1 \geq 2\sqrt{\Gamma_0}$  аperiodичности переходного процесса.

### Эксперименты

Предложенный метод математически моделировался для движущегося по коридору мобильного робота и стыковки космического аппарата к международной космической станции. Исходными данными являлись две последовательности видеок кадров, полученные при движении реального робота. Первая последовательность задавала визуальную программную траекторию, а вторая использовалась для имитации реального движения робота. В качестве первого реального кадра выбирался первый кадр второй последовательности. Каждый следующий реальный кадр имитировался из предыдущего с помощью его геометрического преобразования, получаемого с учётом моделирования перемещения робота. Кроме того, для сохранения устойчивости данного процесса использовалась вторая последовательность видеок кадров.

На каждом шаге выработки управлений по скорости на приводы робота сравнивались программное и реальное изображения, и формировался сигнал согласно алгоритму (7).

Предложенный в работе метод был применён к нескольким изображениям разного характера: изображения коридора в здании при движении мобильного робота, обзорные изображения поверхности Международной космической станции (МКС), изображения МКС при стыковке с ней космического аппарата, изображения лиц разных людей под разным ракурсом, изображения поверхности, по которой движется мобильный робот.

В примере с коридором изображение имело достаточно бедную структуру, тем не менее детектором Харриса было выделено около 30 ОТ. К связанным с ОТ локальным зонам был применён оператор корреляции и найдена точка максимального значения этого оператора, которая хорошо выделяется на графике корреляции.

Обзорные изображения поверхности МКС характеризовались яркими цветами и большим количеством крупных и мелких деталей. Далее алгоритм определял сдвиги ОТ первого изображения на втором, что дало необходимое соответствие между точками двух изображений и далее матрицу аффинного преобразования.

С помощью этой матрицы космический робот (например, пристыковываемый аппарат) может определить как изменение своего положения в пространстве при известных геометрических параметрах сцены, или наоборот, координаты объектов сцены при известном перемещении робота.

Другое применение может состоять в диагностировании неисправностей на поверхности МКС. Для этого необходимо сделать последовательность преобразований полученного кадра для приведения его к аналогичному кадру для эталонного изображения диагностируемой поверхности. После чего разность этих кадров покажет отличия на них, которые и соответствуют потенциальным неисправностям и повреждениям.

Для полутоновых изображений МКС при стыковке с ней космического аппарата при определении ОТ (до или после) необходимо было убрать паразитную цифровую информацию на дисплее. В результате чего количество ОТ сильно уменьшается и становится разумным для обработки. В виду искусственности и симметричности сцены, получаемый результат имеет хорошее качество даже для целей точного перемещения и стыковки.

Наконец, в случае изображения лиц разных людей под разным ракурсом, возникли сложности при малом количестве ОТ на небольшого размера изображении (малый объект, малое разрешение). При увеличении чувствительности детектора Харриса и получении большего числа ОТ, они начинают мешать друг другу, ввиду небольшого размера кадра. Это приводит к необходимости при работе с лицами иметь достаточно большое разрешение телекамеры при соответствующем размере лица на кадре.

Таким образом, проведенное экспериментальное исследование показало высокое качество получаемого аффинного преобразования и эффективность метода.

1. Макарычев В.П., Юревич Е.И. Супервизорное управление космическими манипуляторами. – СПб.: Астерион, 2005. – 108 с.
2. Е.В. Бабкин, М.Ю. Беляев, И.А. Васильев, В.С. Заборовский, В.П. Макарычев, А.В. Силенко, К. Ландцеттель. Супервизорное управление космическим роботом на Международной космической станции (МКС) с использованием сети Интернет // Актуальные проблемы защиты и безопасности. Экстремальная робототехника. Труды XIV Всероссийской научно-практической конференции РАРАН (4-7 апреля 2011 г.). Том 5. –М.: Издание Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2011. С. 32-42.
3. Жуков А.М., Макарычев В.П. Сравнительный анализ алгоритмов управления подводным аппаратом // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием Институт металлургии, машиностроения и транспорта Ч.2 – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – 358 с. С. 42-45
4. Леонтьев В.А., Макарычев В.П. Программа численного моделирования динамики и системы управления подводного аппарата реализованная в программной среде MATLAB-SIMULINK (программа Submersible). Заявка № 2016663316 от 07.12.2016. Свидетельство № 2017611332 от 01.02.2017.
5. Леонтьев В.А., Макарычев В.П. Компьютерный программный комплекс управления движением модели автономного подводного аппарата, состоящий из его математической модели в программной среде ADAMS/VIEW и внедрённого в неё модуля управления, разработанного в среде MATLAB-SIMULINK. Заявка № 2016663472 от 07.12.2016. Свидетельство № 2017611307 от 01.02.2017.
6. Корсаков А.М., Макарычев В.П., Фомин И.С. Программа для экспериментальной проверки алгоритма определения положения и ориентации транспортного средства. Заявка № 2017611397 от 20.02.2017. Свидетельство № 2017614156 от 06.04.2017.
7. Тимофеев А.В. Построение программных траекторий в адаптивной системе управления. – М.: Энергия, 1980, 107 с.
8. В.П. Макарычев. Метод переменных стратегий построения траекторий роботов в среде с препятствиями // Искусственный интеллект, №3, Национальная академия наук Украины, Институт проблем искусственного интеллекта, 2008. С. 451–461.
9. L.G. Shapiro, G.G. Stockman. *Computer vision*. Pearson Education, Inc. Prentice Hall. 2001. 752 p.
10. D. A. Forsyth, J. Ponce. *Computer vision. A modern approach*. Pearson Education, Inc. Prentice Hall. 2003. 928 p.

11. R. Paul, Modelling, "Trajectory Calculation and Servoing of a Computer Controlled Arm", *Stanford Artificial Intelligence Project, Memo AIM-177, Computer Science Department Report CS-311*, November 1972.
12. Тимофеев А.В., Экало Ю. Устойчивость и стабилизация программных траекторий робота манипулятора, *Автоматика и телемеханика*, № 10, 1976. С. 148-156.
13. Динамика управления роботами. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы. 1984. –336 с.
14. Козлов В.В., Коновалов А.С., Макарычев В.П. Построение адаптивных алгоритмов сервоуправления на основе обратных задач динамики и нейронных сетей // *Информационно-управляющие системы* 2012. № 3(58). С. 29-32.
15. Козлов В.В., Макарычев В.П. Диагностика функционирования оборудования на основе идентификационных алгоритмов. Учебное пособие. – СПб.: ГУАП. 2008. 88 с.
16. A.J. Davison. *Mobil Robot Navigation Using Active Vision*. PhD thesis, University of Oxford, 1998/ Available at <http://www.robots.ox.ac.uk/~ajd/>
17. S.S. Beauchemin and J.L. Barron. The Computation of Optical Flow, Dept. of Computer Science, University of Western Ontario, London, Ontario, Canada, N6A 5B7. 44 p.
18. V.P. Makarychev. "Application of Optical Flow and Methods of Group Lee Representation in Problems of Detecting of Movements and Pattern Detection on the Images" // *Solid State Phenomena. Mechatronic Systems and Materials III*. V. 145 (2008). P. 582–587. ISSN 1012 0394.
19. S. Hutchinson, G.D. Hager, and P.I. Corke, "A tutorial on visual servo control," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, vol. 12, pp. 651-670, Oct. 1996.
20. O. Nasisi, R. Carelli. "Adaptive servo visual robot control", in *Robotics and Autonomous Systems*, 43 (2003), pp. 51-78.
21. F. Chaumette, S. Hutchinson, "Visual servo control, part I: basic approaches", *IEEE Robotics and Automation magazine*, 2006, 13 (4), pp. 82–90.
22. F. Chaumette, S. Hutchinson, "Visual servo control, part II: advanced approaches", *IEEE Robotics and Automation magazine*, 2007, 14 (1), pp. 109–118.
23. C. Collewet, E. Marchand, F. Chaumette, "Visual servoing set free from image processing". *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, ICRA '08*, May 2008, Pasadena, United States.
24. Макарычев В.П. Оптические потоки и методы теории представления групп Ли в задачах обработки изображений // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Основной выпуск*. – Санкт-Петербург. Издательство Политехнического университета, №3(59), 2008. С. 30-37.
25. Макарычев В.П. Метод локальной корреляции для определения и идентификации аффинно-инвариантных объектов на изображениях. Материалы 5-ой Всероссийской конференции "Продвинутые системы и проблемы управления". – Таганрог: Издательский дом ТТИ СФУ, 2010. С. 85-89.
26. В.П. Макарычев. Построение траекторий движения роботов по дискретной последовательности видеокадров // *Актуальные проблемы защиты и безопасности. Экстремальная робототехника. Труды XIV Всероссийской научно-практической конференции РАРАН (4-7 апреля 2011 г.)*. Том 5. –М.: Издание Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2011. С. 49-55.
27. Макарычев В.П. Алгоритмы распознавания аффинно-инвариантных образов на основе методов локальной корреляции // *Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции «Экстремальная робототехника»*. – Санкт-Петербург: Изд-во «Политехника-сервис», 2012. С. 181–187.
28. Макарычев В.П. Нахождение аффинно-инвариантных изображений для задач навигации, распознавания и диагностики автономных роботов // *Робототехника и техническая кибернетика*, 2014, т.2, № 1, с. 75-78.

## IDENTIFICATION OF OBJECTS USING SCANNING ANGULAR MOVEMENTS OF ULTRASONIC SENSOR<sup>x</sup>

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

### Abstract

This is results of research on the possibility of using an ultrasonic sensor in the sensor system of a mobile robot to determine the shape of the obstacle. We attached the ultrasonic sensor on a computer-controlled scanning device and use algorithmic analysis to determine the form of the objects: convex angle, concave angle, the flat wall, the doorway with the door open, and etc.

Keywords: ultrasonic sensor, sensor system, mobile robot, information-measuring and control system.

### Introduction

Ultrasound sensors (UZ Sensor) are widely used in sensor systems of mobile robots (MR). For example, in the humanoid robot REEM (Fig. 1) of PAL Robotics [1]. The robot work as a guide, compere or "worker", performing various tasks. The robot has an autonomous navigation system, which includes a combination of ultrasonic and laser sensors, preventing its collision with people and various objects. In robot ROBOSEM (Fig. 2) of Yujin Robot [2], working as an English teacher in primary schools, a combination of ultrasound and laser sensors is also used to detect obstacles.



Figure 1 – Humanoid robot REEM



Figure 2 – Robot ROBOSEM

The ultrasonic sensor has a wide beam aperture, i.e. large measuring angle (measuring angle  $\sim 30^\circ$ ). Therefore, such a sensor allows only detecting an obstacle and determining a certain distance to him. But it is not known from which obstacle point the "echo" is received and it is not known to what part of the obstacle this distance is measured. In the case of several objects covering the sensor's "visibility" zone (Fig.3): the distance is determined

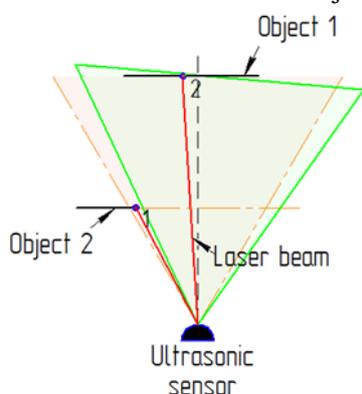


Figure 3 – Measured distances

not to the object in front of the sensor (for example, point 2, object 1), but to the nearest point (point 1, object 2).

The sensor cannot determine the shape of the obstacle because of low space resolution. For example, when a robot moves in a residential or office rooms, it would be desirable to identify obstacles such as "corners formed by walls" (internal or external) or "doorways" (with doors open or closed).

**Research hypothesis:** the use of scanning angular movements of the UZ Sensor will increase its resolution, required to determine the shape of the obstacle.

**Goal:** research the possibility of using the scanning angular movements of an UZ Sensor to determine the shape of obstacles in order to organize the movement of a mobile robot in a nondeterministic environment.

### Objectives:

1. To develop and make a laboratory model of a rotary-tilt mechanism with fixed on it UZ Sensor controlled from a microcontroller.
2. Research the possibility of using the scanning angular movements of an UZ Sensor to increase its resolution and determine the parameters of the scanning motion.
3. Propose an algorithm that allows you to determine the form of the obstacle by the readings of the scanning ultrasound probe.

### Pivot-tilt mechanism for organizing scanning movements of the UZ Sensor

When the sensor is rotated, the field of view is shifted, therefore point 1 (see Fig. 3) leaves the aperture zone of the beam and the nearest point becomes point 2. Calculating the difference between the measured distances, one can get an image of the shape of the obstacle. In [3], the sensor is rotated by turning the MR. This method is energy-intensive and has low accuracy (in terms of rotation angle). It is proposed to use the mechanism shown in Fig. 4 providing rotations in the horizontal and vertical planes.

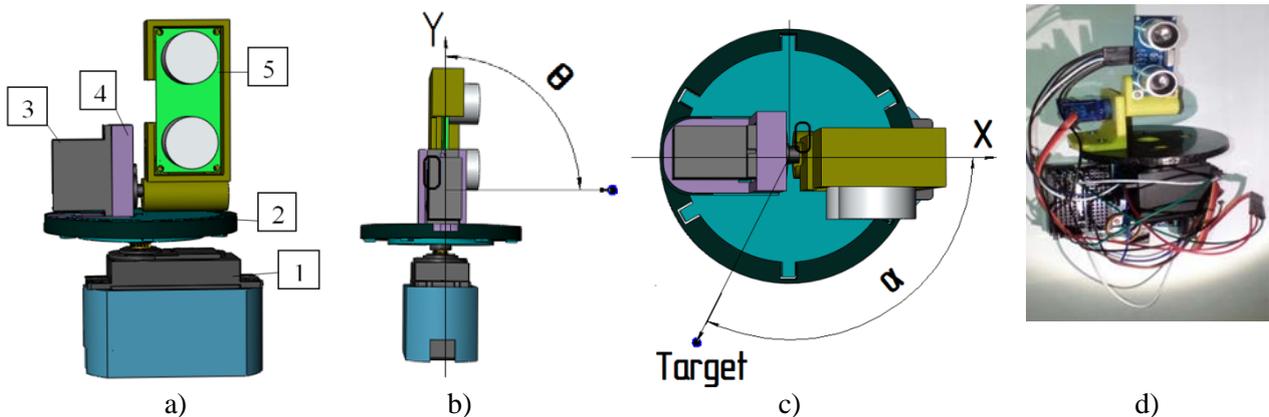


Figure 4 – Device with ultrasonic sensor: a) front view; b) side view; c) top view; d) picture of the device

The mechanism consists of the following elements: 1 – servo FS5106B; 2 – turn table; 3 – servo SG90 9G; 4 - corner; 5 - UZ Sensor HC-SR04. Also in the figure,  $\alpha$  – the azimuth, the angle between the OX axis and the direction to the target;  $\theta$  – the angle between the axis OY and the direction to the target.

The information output of the ultrasonic sensor is connected to the microcontroller Arduino Uno, which the duration of the pulse formed by the ultrasonic sensor is converted into a distance, measured in centimeters. Servo is controlled from the microcontroller too. The microcontroller is connected to the computer using of USB bus. The corresponding software allows you to control the servo, which accordingly change the orientation of the ultrasonic sensor in the space with an accuracy of  $1^\circ$ .

The computer sends a signal to the microcontroller, which determines the angle  $\alpha$  of the rotation of the servo shaft (1), changing discretely with step  $\Delta\varphi_1$  (horizontal scanning step). After each rotation, an ultrasonic sensor measured the distance to the object located in front of the sensor. As a result, a string is formed with the values of the measured distances corresponding to the rotation angle  $\alpha$  from  $-\alpha_{\max}$  to  $\alpha_{\max}$  in the horizontal plane:  $\Delta d = |d_i - d_{i+1}| > T$ ,  $T$  – a certain threshold indicating that the object ends. In this way, you can determine the width of the object in front of us and the angle of the object to the OX axis of the device.

Where, according to our calculations, the middle of the detected object is located, we perform a vertical scan similar to the horizontal. The computer gives a signal cornering  $\theta$  of the servo (2) shaft, changing discretely with step  $\Delta\varphi_2$  (vertical scanning step). As a result, a column is formed with distances corresponding to the rotation angle  $\theta$  from  $-\theta_{\max}$  to  $\theta_{\max}$  in the vertical plane:  $d = f(\theta)$ . In this way, you can determine the height of the object in front of us and the angle of the object to the OY axis of the device.

### Research of the possibility of using the scanning angular movements of an ultrasonic sensor to determine the shape of obstacles

This is results of experiments in the horizontal plane.

1. Vertical flat obstacle, oriented at an angle to the sensor (Fig. 5). Scanning is done from left to right. The object is at a distance  $d = 20$  cm, the scanning angle  $\alpha_{\max} = \pm 30^\circ$  with the step  $\Delta\varphi_1 = 3^\circ$ . The results are shown in table 1.

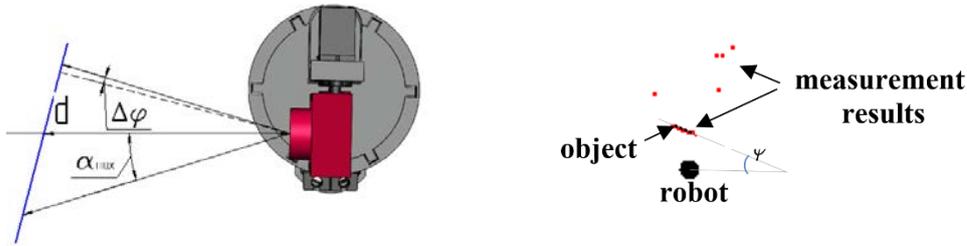


Figure 5 – Flat obstacle scanning scheme and measurement results (red marks)

Table 1. Readings results of the ultrasonic sensor at various angles of rotation

$\alpha$ , degree	-30	-27	-24	-21	-18	-15	-12	-9	-6	-3	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
$D_{дат}$ , cm	54	28	26	25	24	25	24	25	23	21	21	18	18	16	16	15	56	78	77	85	70

Algorithm:

- 1) We exclude anomalous values of the measurements (points giving a sharp range difference with neighboring ones), as a result only the points making up the object;
- 2) We approximate the points using the method of least squares (OLS), and determine the tilt angle  $\psi$ .

The action of the robot: the robot can turn to this angle and move parallel to the obstacle.

2. Identification of external (convex) angles.

Scanning is done from the left to the right (Figure 6). The object is at a distance  $d = 10$  cm, the scanning angle  $\alpha_{max} = \pm 30^\circ$  with the step  $\Delta\phi_1 = 3^\circ$ . The results are shown in table 2.

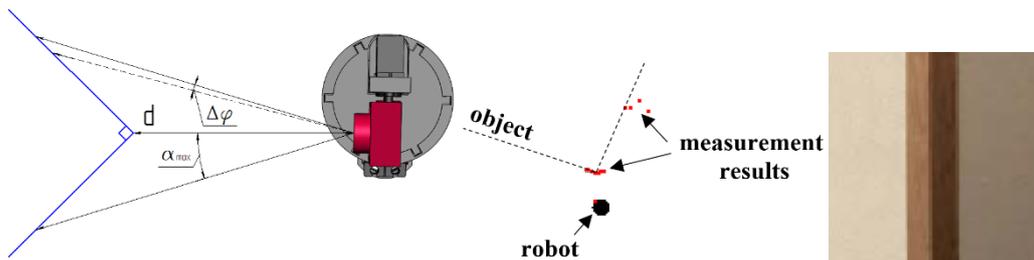


Figure 6 – Scheme of scanning the outer corner, the results of measurements (red marks) and the photo of the object

Table 2. Readings results of the ultrasonic sensor at various angles of rotation

$\alpha$ , degree	-30	-27	-24	-21	-18	-15	-12	-9	-6	-3	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
$D_{дат}$ , cm	19	18	16	17	17	0	15	14	10	14	15	15	16	17	18	18	54	36	54	55	53

Excluding points giving anomalous values, we get the following line (table 3):

Table 3. Identifying the object

$D_{дат}$ , cm	19	18	16	17	17	15	14	10	14	15	15	16	17	18	18
----------------	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Scanning is performed from left to right:

- 1) first, there is a decrease in the values (19, 18, 16, 17, 17, 0, 15, 14, 10) - this is the first side of the angle;
- 2) Then a gradual increase in the values (15, 16, 17, 18).

Analysis result: decrease  $\rightarrow$  increase in values, therefore, this is a convex angle.

3. Identification of internal (concave) angles.

Scanning is done from left to right (figure 7). The object is at a distance  $d = 10$  cm, the scanning angle  $\alpha_{max} = \pm 30^\circ$  with the step  $\Delta\phi_1 = 3^\circ$ . The results are shown in table 4.

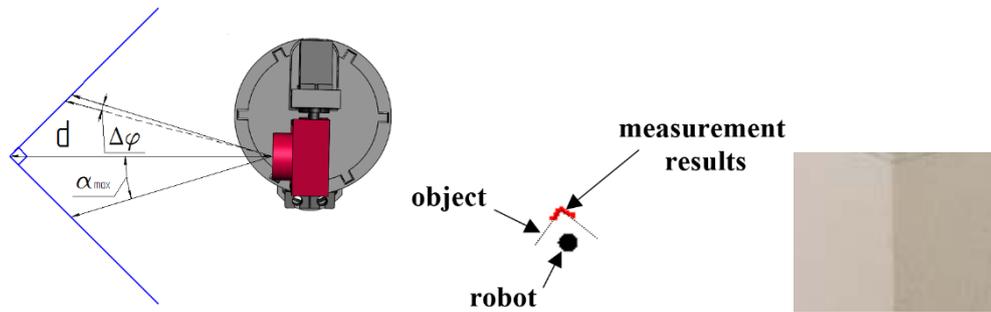


Figure 7 – Scheme of scanning the internal corner, the results of measurements (red marks) and the photo of the object

Table 4. Readings of the ultrasonic sensor at various angles of rotation

$\alpha$ , degree	-30	-27	-24	-21	-18	-15	-12	-9	-6	-3	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	
$D_{дат}$ , cm	10	0	10	11	11	12	12	13	13	13	13	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12

Having carried out the analysis like the one described above, we come to the conclusion that we have a concave angle (increase-decrease values).

#### 4. Identification of "doorways".

Scanning is performed when the door is fully open and when the door is not fully open (Fig. 8). Results of measurements (red marks): the object is at a distance  $d_1 = 30$  cm (Fig. 9 and Fig. 10); and  $d_2 = 60$  cm (Fig.11), the scanning angle  $\alpha_{max} = \pm 30^\circ$  with the step  $\Delta\phi_1 = 1^\circ$ .

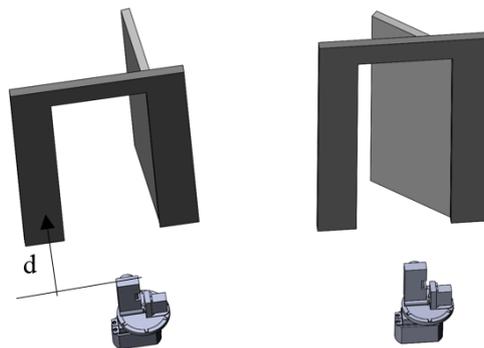


Figure 8 – Scheme of open door scanning

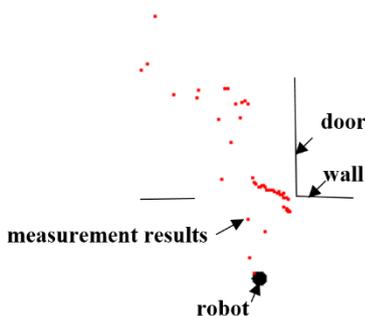


Figure 9 – Open door,  $d_1 = 30$  cm

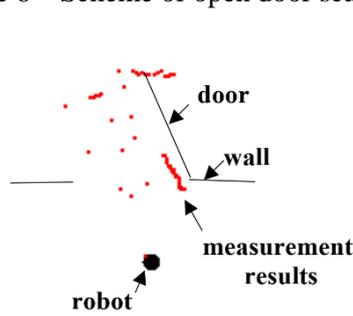


Figure 10 – The slightly open door

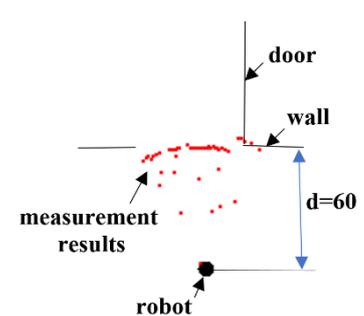


Figure 11 – Distance  $d_2 = 60$  cm

The robot in the distance more than 50 cm from the doorway (width  $d_2 = 60$  cm), does not detect the doorway (Fig. 11).

#### Conclusion

Using the scanning angular movements of the ultrasonic sensor, it is possible to determine the form of the obstacle such as "outer corner", "inner corner", "flat wall", "door opening with an open door", etc., and their orientation in some coordinate system.

Ultrasound sensors are expected to be used in the sensor system of a heterogeneous modular mobile robot [4].

The work is carried out with the partial support of the RFFI: grants 16-07-00811a, 16-07-00935a and 16-07-01264a.

1. The humanoid robot REEM-C. URL: <https://robo-hunter.com/resume/gumanoidnii-robot-reem-c>. - Ver. From the screen (date of circulation: 29/05/2017).
2. Robot ROBOSEM teaches Korean kids English. URL: [http://www.prorobot.ru/07/robot\\_robossem.php](http://www.prorobot.ru/07/robot_robossem.php). - Ver. From the screen (date of circulation: 29/05/2017).
3. Tashev A.A. The development of a robot based on an ultrasonic rangefinder. URL: [http://oreluniver.ru/file/chair/aplast/nol/Tashev\\_Fedorov.pdf](http://oreluniver.ru/file/chair/aplast/nol/Tashev_Fedorov.pdf). (The date of circulation is May 29, 2017).
4. Andreev V.P. Network solutions in the architecture of heterogeneous modular mobile robots / Andreev V.P., Kim V.L., Poduraev Yu.V. // Robotics and technical cybernetics. ISSN 2310-5305.- 2016. - No. 3 (12). - P.23-29.

*В.П. Андреев, В.Э.Тарасова*

## **ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ СКАНИРУЮЩИХ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДАТЧИКА<sup>9</sup>**

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

### **Аннотация**

Приведены результаты исследования, целью которых является попытка использовать ультразвуковой датчик в сенсорной системе мобильного робота для определения формы препятствия. В работе предлагается установить ультразвуковой датчик на управляемое от ЭВМ сканирующее устройство и определить возможность алгоритмического анализа данных, получаемых от датчика в процессе сканирования, с целью определения формы препятствия – внешний угол, внутренний угол, плоская стена, дверной проём с открытой дверью и т.п., и их ориентацию в некоторой системе координат.

Ключевые слова: ультразвуковой датчик, сенсорная система, мобильный робот, информационно-измерительная и управляющая система.

### **Введение**

Ультразвуковые датчики (УЗ-датчики) широко используются в сенсорных системах мобильных роботов (МР). Например, в роботе-гуманоиде REEM (рис.1) компании PAL Robotics (1, б.д.). Робот используется в качестве экскурсовода, конферансье или «работника», выполняющего различного рода задания. Робот имеет автономную систему навигации, включающую сочетание ультразвуковых и лазерных датчиков, предотвращающих его столкновение с людьми и различными предметами. В роботе ROBOSEM (рис.2) компании Yujin Robot (2, б.д.), выполняющего функции учителя английского языка в начальных школах, также для обнаружения препятствий используется сочетание ультразвукового и лазерного датчиков.

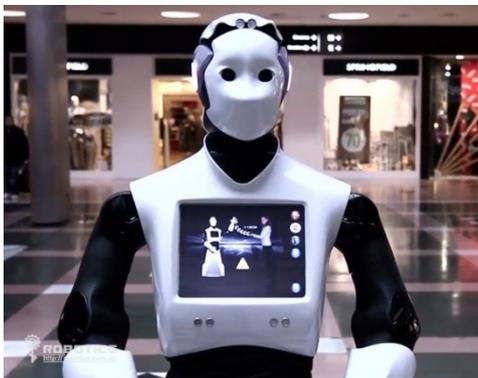


Рисунок 1 – Робот-гуманоид REEM



Рисунок 2 – Робот ROBOSEM

УЗ-датчик имеет широкую апертуру луча, т.е. большой угол измерения (measuring angle  $\sim 30^\circ$ ). Поэтому такой датчик позволяет лишь обнаружить препятствие и определить некоторое расстояние до

него. Поскольку неизвестно от какой точки препятствия получено «эхо», то неизвестно до какой части препятствия измерено это расстояние. В случае нескольких объектов, перекрывающих зону «видимости» датчика (рис.3), расстояние может быть определено как до объекта 1, находящегося перед датчиком (например, точка 2), так и до ближайшей точки объекта 2 (точка 1).

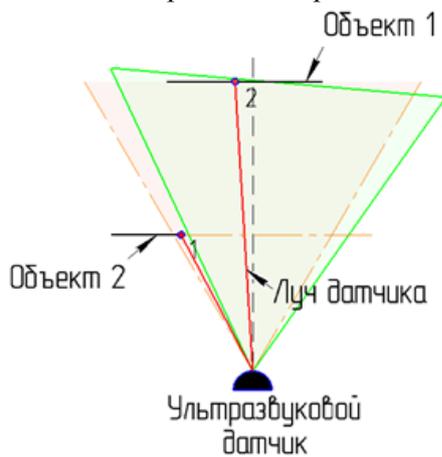


Рисунок 3 – Измерение УЗ-датчиком

Из-за низкой разрешающей способности датчика по пространству отсутствует возможность определять форму препятствия, возникающего на пути движения МР. Например, при перемещениях робота в пространстве жилых или служебных помещений было бы желательно идентифицировать препятствия типа «углы, образованные стенами» (внутренние или внешние), или «дверные проёмы» (с открытыми или закрытыми дверями).

**Гипотеза исследования:** использование сканирующих угловых перемещений УЗ-датчика позволит повысить его разрешающую способность,

достаточную для определения формы препятствия.

**Цель исследования:** исследовать возможность использования сканирующих угловых перемещений УЗ-датчика для определения формы препятствий с целью организации движения мобильного робота в недетерминированной среде.

#### Задачи исследования:

1. Разработать и изготовить лабораторный макет управляемого от микроконтроллера и ЭВМ поворотного-наклонного устройства с закреплённым на нём УЗ-датчиком.
2. Исследовать возможность использования сканирующих угловых перемещений ультразвукового датчика для повышения его разрешающей способности с помощью изготовленного лабораторного макета и определить параметры сканирующего движения.
3. Предложить алгоритм, позволяющий по показаниям сканирующего УЗ-датчика определять форму препятствия.

#### Поворотно-наклонный механизм для организации сканирующих движений УЗ-датчика

При повороте датчика происходит смещение области видимости, вследствие чего точка 1 (см. рис.3) выходит из зоны апертуры луча, и ближайшей точкой становится точка 2. Вычисляя разность между измеренными расстояниями, можно получить представление о форме препятствия. В работе (А.А.) используется поворот датчика за счёт поворота самого МР. Данный метод энергозатратен и обладает низкой точностью (по углу поворота). Предлагается для совершения поворота УЗ-датчика в горизонтальной плоскости и наклона датчика в вертикальной плоскости использовать механизм, приведённый на рис.4

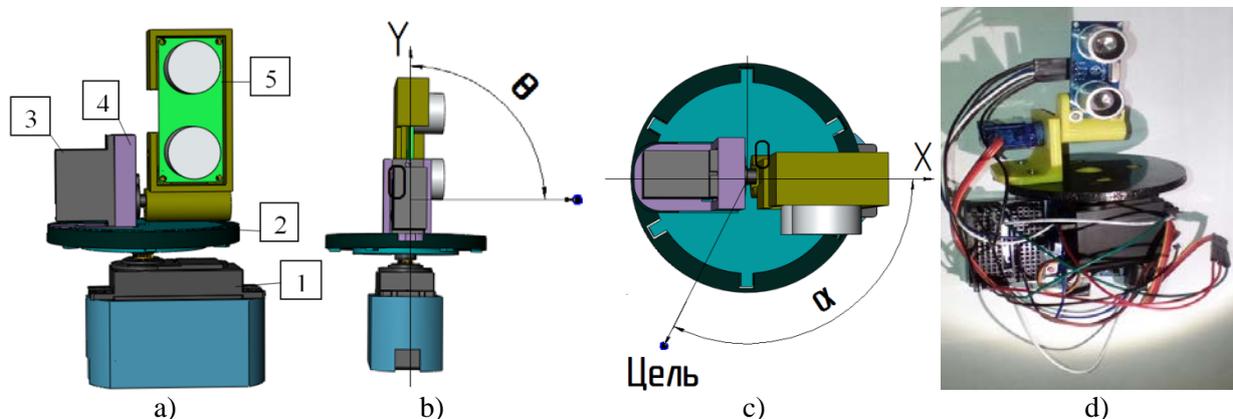


Рисунок 4 – Устройство с УЗ-датчиком: а) вид спереди; б) вид сбоку; в) вид сверху; д) фотография устройства

Механизм состоит из следующих элементов: 1 – сервопривод FS5106B; 2 – поворотный стол; 3 – сервопривод SG90 9G; 4 – уголок; 5 – УЗ-датчик HC-SR04. Также на рисунке  $\alpha$  – азимут, угол между осью  $OX$  и направлением на цель;  $\theta$  – тангаж, угол между осью  $OY$  и направлением на цель.

Информационный выход УЗ-датчика подключён к микроконтроллеру Arduino Uno, с помощью которого длительность формируемого УЗ-датчиком импульса преобразуется в дальность, измеряемую в сантиметрах. Сервоприводы управляются от того же микроконтроллера. Микроконтроллер, в свою очередь, подключён к компьютеру посредством шины USB. Соответствующее программное обеспечение позволяет управлять сервоприводами, которые соответствующим образом изменяют ориентацию УЗ-датчика в пространстве с точностью до  $1^\circ$ .

Компьютер подаёт на микроконтроллер сигнал, задающий угол  $\alpha$  поворота вала сервопривода (1), изменяющийся дискретно с шагом  $\Delta\varphi_1$  (шаг сканирования по горизонтали). После каждого поворота запускается ультразвуковой датчик и выполняется измерение расстояния до объекта, расположенного перед датчиком. В результате формируется строка со значениями измеренных расстояний, соответствующих углу поворота  $\alpha$  от  $-\alpha_{\max}$  до  $\alpha_{\max}$  в горизонтальной плоскости:  $d = f(\alpha)$ . Там, где  $\Delta d = |d_i - d_{i+1}| > T$ , где  $T$  – некоторый порог, считаем, что объект заканчивается. Таким образом можно определить ширину находящегося перед нами объекта и угол наклона объекта к оси  $OX$  устройства.

Там, где по нашим расчётам находится середина обнаруженного объекта, выполняем сканирование по вертикали аналогично горизонтали. Компьютер подаёт сигнал, задающий угол  $\theta$  поворота вала сервопривода (2), изменяющийся дискретно с шагом  $\Delta\varphi_2$  (шаг сканирования по вертикали). В результате формируется столбец со значениями расстояний, соответствующих углу поворота  $\theta$  от  $-\theta_{\max}$  до  $\theta_{\max}$  в вертикальной плоскости:  $d = f(\theta)$ . Таким образом можно определить высоту находящегося перед нами объекта и угол наклона объекта к оси  $OY$  устройства.

#### Исследование возможности использования сканирующих угловых перемещений УЗ-датчика для определения формы препятствий

В данной части работы приведены результаты экспериментов, выполненных для сканирования в горизонтальной плоскости.

1. Вертикальное плоское препятствие, ориентированное под углом к датчику (рис.5).

Сканирование производится слева-направо. Объект находится на расстоянии  $d = 20$  см, угол сканирования  $\alpha_{\max} = \pm 30^\circ$  с шагом  $\Delta\varphi_1 = 3^\circ$ . Результаты приведены в табл.1.

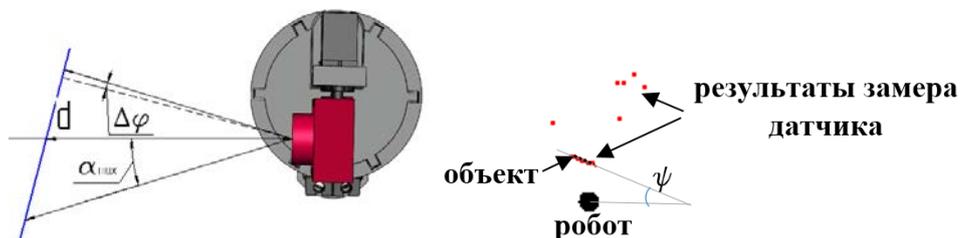


Рисунок 5 – Схема сканирования плоского препятствия и результаты замера дальности (красные метки)

Таблица 1. Показания УЗ-датчика  $D_{\text{дат}}$  при различных углах поворота

$\alpha$ , град.	-30	-27	-24	-21	-18	-15	-12	-9	-6	-3	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
$D_{\text{дат}}$ , см	54	28	26	25	24	25	24	25	23	21	21	18	18	16	16	15	56	78	77	85	70

Алгоритм:

1) Исключаем аномальные значения замеров (точки, дающие резкий перепад дальности с соседними), в результате остаются только точки, соответствующие объекту;

2) Производим аппроксимацию точек, используя метод наименьших квадратов (МНК), и определяем угол наклона  $\psi$ .

Действие робота: робот может повернуться на данный угол и двигаться параллельно препятствию.

2. Идентификация внешних (выпуклых) углов.

Сканирование производится слева-направо (рис. 6). Объект находится на расстоянии  $d = 10$  см, угол сканирования  $\alpha_{\max} = \pm 30^\circ$  с шагом  $\Delta\varphi_1 = 3^\circ$ . Результаты приведены в табл.2.

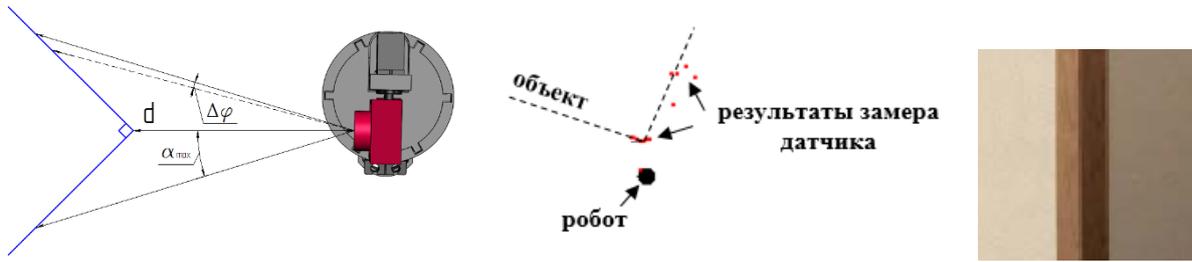


Рисунок 6 – Схема сканирования внешнего угла, результаты замеров (красные метки) и фото объекта

Таблица 2. Показания УЗ-датчика  $D_{\text{дат}}$  при различных углах поворота

$\alpha$ , град.	-30	-27	-24	-21	-18	-15	-12	-9	-6	-3	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
$D_{\text{дат}}$ , см	19	18	16	17	17	0	15	14	10	14	15	15	16	17	18	18	54	36	54	55	53

Исключив точки, дающие аномальные значения, получаем следующую строку (табл. 3):

Таблица 3. Замеры, идентифицирующие объект

$D_{\text{дат}}$ , см	19	18	16	17	17	15	14	10	14	15	15	16	17	18	18
-----------------------	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Сканирование выполняется слева направо:

1) сначала происходит уменьшение значений (19, 18, 16, 17, 17, 0, 15, 14, 10) – это первая сторона угла;

2) затем происходит последовательное увеличение значений (15, 16, 17, 18).

Результат анализа: уменьшение => увеличение значений, следовательно, это выпуклый угол.

3. Идентификация внутренних (вогнутых) углов.

Сканирование производится слева-направо (рис. 7). Объект находится на расстоянии  $d = 10$  см, угол сканирования  $\alpha_{\max} = \pm 30^\circ$  с шагом  $\Delta\varphi_1 = 3^\circ$ . Результаты приведены в табл.4.

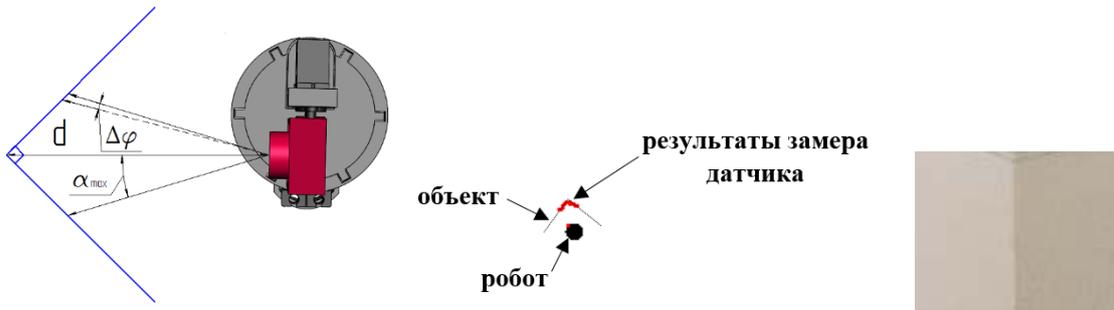


Рисунок 7 – Схема сканирования внутреннего угла, результаты замеров (красные метки) и фото объекта

Таблица 4. Показания УЗ-датчика  $D_{\text{дат}}$  при различных углах поворота

$\alpha$ , град.	-30	-27	-24	-21	-18	-15	-12	-9	-6	-3	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
$D_{\text{дат}}$ , см	10	0	10	11	11	12	12	13	13	13	13	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12

Выполнив анализ подобно описанному выше приходим к заключению, что перед нами вогнутый угол (увеличение-уменьшение значений).

4. Идентификация «дверных проёмов».

Сканирование производится при полностью открытой двери и при не полностью открытой двери (рис.8). Результаты замеров (красные метки): объект находится на расстоянии  $d_1 = 30$  см (рис.9 и рис.10); и  $d_2 = 60$  см (рис. 11), угол сканирования  $\alpha_{\max} = \pm 30^\circ$  с шагом  $\Delta\varphi_1 = 1^\circ$ .

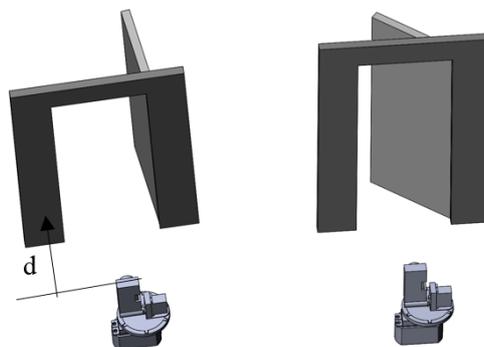


Рисунок 8 – Схема сканирования открытых дверей



Рисунок 9 – Открытая дверь,  $d_1 = 30$  см



Рисунок 10 – Приоткрытая дверь,  $d_1 = 30$  см

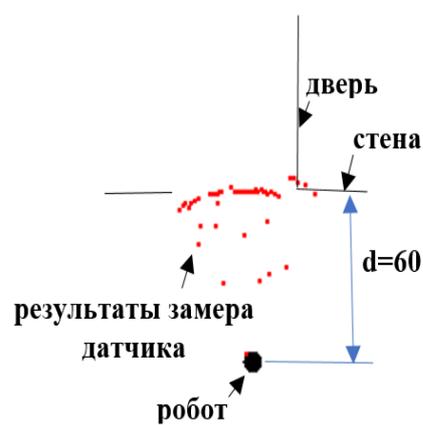


Рисунок 11 – Расстояние  $d_2 = 60$  см

Робот, находясь на расстояниях более 50 см от дверного проёма, ширина которого  $d_2 = 60$  см, дверной проём не обнаруживает (рис.11).

### Заключение

Использование сканирующих угловых перемещений УЗ-датчика позволяет определять форму препятствия типа «внешний угол», «внутренний угол», «плоская стена», «дверной проём с открытой дверью» и т.п. и их ориентацию в некоторой системе координат.

УЗ-датчики предполагается в дальнейшем использовать в сенсорной системе гетерогенного модульного мобильного робота [4].

Работа выполняется при частичной поддержке РФФИ: гранты 16-07-00811а, 16-07-00935а и 16-07-01264а.

1. Гуманоидный робот REEM-C. URL: <https://robo-hunter.com/resume/gumanoidnii-robot-reem-c>. - Загл. с экрана (дата обращения: 29.05.2017).
2. Робот ROBOSEM учит корейских детишек английскому. URL: [http://www.prorobot.ru/07/robot\\_robossem.php](http://www.prorobot.ru/07/robot_robossem.php). – Загл. с экрана (дата обращения: 29.05.2017).
3. Ташев А.А. Разработка робота на основе ультразвукового дальномера. URL: [http://oreluniver.ru/file/chair/aplast/nol/Tashev\\_Fedorov.pdf](http://oreluniver.ru/file/chair/aplast/nol/Tashev_Fedorov.pdf). (дата обращения 29.05.2017).
4. Андреев В.П. Сетевые решения в архитектуре гетерогенных модульных мобильных роботов / Андреев В.П., Ким В.Л., Подураев Ю.В. // Робототехника и техническая кибернетика. ISSN 2310-5305.– 2016. – №3(12). – С.23-29.

*Yu.I. Minkin<sup>1</sup>, A.V. Panchenko<sup>2</sup>, A.Yu. Shkanaev<sup>3</sup>,  
I.A. Konovalenko<sup>1</sup>, D.N. Putincev<sup>2</sup>, R.N. Sadekov<sup>3</sup>*

## **COMPUTER VISION SYSTEM: A TOOL FOR EVALUATING THE QUALITY OF WHEAT IN A GRAIN TANK<sup>XI</sup>**

### **Abstract**

The paper describes a technology that allows for automatizing the process of evaluating the grain quality in a grain tank of a combine harvester. Special recognition algorithm analyzes photographic images taken by the camera, and that provides automatic estimates of the total mass fraction of broken grains and the presence of non-grains. The paper also presents the operating details of the tank prototype as well as it defines the accuracy of the algorithms designed.

Keywords: precision agriculture, broken grain, non-grain, computer vision system, pattern recognition, statistical training.

*Ю.И. Минкин<sup>1</sup>, А.В. Панченко<sup>2</sup>, А.Ю. Шканаев<sup>3</sup>,  
И.А. Коноваленко<sup>4</sup>, Д.Н. Путинцев<sup>5</sup>, Р.Н. Садеков<sup>6</sup>*

## **ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПШЕНИЦЫ ВНУТРИ ЗЕРНОВОГО БУНКЕРА КОМБАЙНА НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ<sup>10</sup>**

<sup>1</sup>*АО Когнитив, г.Москва, y.minkin@cognitive.ru;*

<sup>2</sup>*АО Когнитив, г.Москва, panchenko@cognitive.ru;*

<sup>3</sup>*АО Когнитив, г.Москва, a.shkanaev@cognitive.ru;*

<sup>4</sup>*АО Когнитив, г.Москва,;*

<sup>5</sup>*ИСА ФИЦ ИУ РАН, Institute for Systems Analysis,  
FRC CSC RAS, г.Москва, putincevd@gmail.com;*

<sup>6</sup>*МОУ «Институт инженерной физики», г.Серпухов, sadekovlar@mail.ru*

### **Аннотация**

В работе описывается технология, позволяющая автоматизировать процесс оценки качества зерна в зерновом бункере комбайна. Фотографические изображения, формируемые камерой, анализируются специальными алгоритмами распознавания, что обеспечивает получение оценок массовой доли битого зерна и наличия примесей в автоматическом режиме. Описываются технические подробности созданного макета бункера. Приводятся показатели точности разработанных алгоритмов.

Ключевые слова: точное земледелие, битые зерна, примеси в зерне, компьютерное зрение, распознавание образов, статистическое обучение.

### **Введение**

Важным этапом работы сельскохозяйственных предприятий, производящих зерновые культуры, является оценка показателей качества собранного зерна. Оценку качества зерна необходимо проводить с целью, определения сроков его хранения и возможности дальнейшего использования.

В стандартах [1,2,3,4] подробно описываются процедуры оценивания качества партий зерна, в стандарте [5] качества пшеницы. Традиционно оценки качества зерна требуют длительного и напряженного ручного труда путем снятия тестовых проб. Попытки автоматизировать процесс оценки качества зерна ведутся давно. В работе [6] предложена технология, позволяющая оценивать процентное содержание различных химических компонентов в зерне на основе его способности к пропусканию, поглощению и отражению излучения различных длин волн. В работе [7] предложена автоматическая система сортировки риса, отсеивающая мертвые, меловые (chalky), треснувшие, незрелые и т.д. зерна. В работе [8] описываются датчики массового и объемного потока зерна, а также его влажности.

Тенденцией последнего времени, является организация оценки качества зерна непосредственно в комбайне, во время его непосредственной работы. Такой подход позволяет производить оперативный контроль качества зерна и регулировать исполнительные механизмы комбайна с целью снижения уровня потерь. В работе [9,10] используется инфракрасная спектроскопия для измерения содержания сухого вещества зерна. В работе [11] проводится обзор бортовых датчиков, дающих информацию по урожайности, содержанию влаги и выходу соломы. В работе [12] демонстрируется работа системы, оценивающей массовую долю резаного зерна и содержание примесей на основе фотографического

изображения. Используемая камера располагается непосредственно в специальном бункере. Однако, в данной работе не приводятся алгоритмические подробности и качество получаемых оценок.

В работе предлагается собственная технология визуальной оценки массовой доли битого зерна и массовой доли примесей на примере зерен пшеницы. Приводятся экспериментальные данные оценок искомых параметров.

### Основные этапы работы

Оценку массовой доли битого зерна и массовой доли примесей наиболее целесообразно проводить с использованием следующего приема. Подготовка тестовых изображений содержащих битое зерно и примеси является трудоемкой операцией. Конечным результатом оценки работы алгоритмов является определение массовой доли битого зерна, а не количества битых зерен на изображении которое может меняться от изображения к изображению при одинаковой массовой доле. В силу данных обстоятельств, для оценки массовой доли битого зерна и примесей была выбрана следующая последовательность действий, рисунок 1.

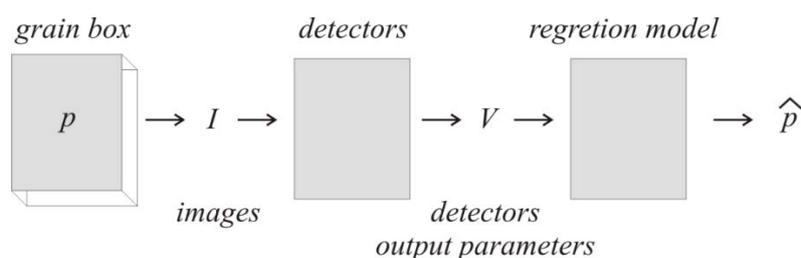


Рисунок 1 – Процесс оценки массовой доли битых зерен и примесей

Суть подхода заключается в формировании зерновых смесей с различной массовой долей битых зерен и примесей  $p$ . Получение набора изображений  $I$  для каждого значения  $p$  массовой доли зерновой смеси. Конструирование детектора битых зерен и детектора примесей, на выходе которых формируются специальные параметры, обозначаемые вектором  $V$ . Определение параметров зависимости (регрессии) между выходными параметрами детектора  $V$  и значением  $p$  массовой доли битых зерен и массовой доли примесей. Проверка адекватности данной регрессии путем тестирования.

### 1. Формирование примесей с различной массовой долей битого зерна и массовой долей примесей

Формирование зерновых смесей с различной массовой долей  $p$ , осуществлялось путем перемешивания цельного зерна пшеницы и битого зерна пшеницы в определенной пропорции (от 0.02 до 0.1 с интервалом 0.02). Аналогично формируется зерновая смесь, содержащая примеси. Полученные зерновые смеси закладывались в специально сконструированный прототип зернового бункера для получения изображений. Описание прототипа бункера приводится ниже.

### 2. Описание макета зернового бункера для получения изображений

Фотографическое изображение сцены существенно образом зависят от условий съемки. В качестве примера на рисунке (рисунок 2) показаны четыре фотографии одного сорта пшеницы из одной партии, сделанные при различных условиях освещения. На данных фотографиях видны значительные различия в цветах и выраженности границ. Данные различия сильно усложняют последующие задачи анализа фотографий.

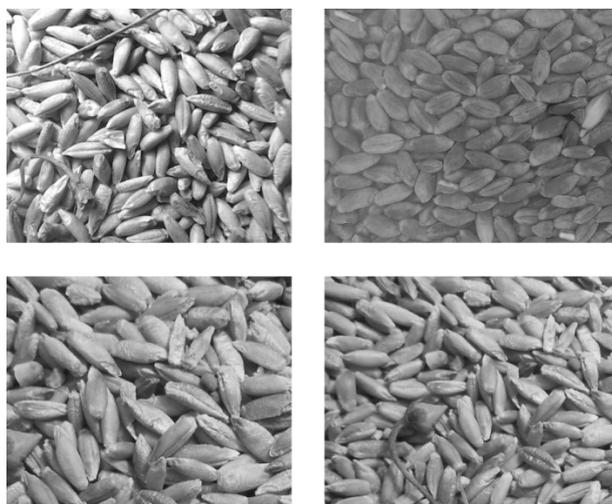


Рисунок 2 – Фотографии одной партии пшеницы, сделанные при различных условиях освещения

Неизменность освещенности сцены можно добиться при использовании специального бункера. На рисунке (рисунок 3) представлен макет созданного зернового бункера.

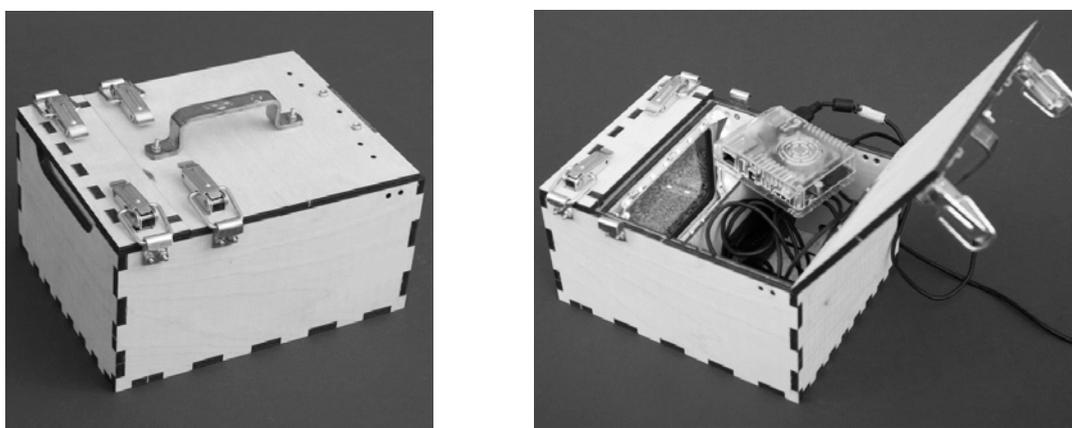


Рисунок 3 – Вид макета измерительного бункера

Зерновой бункер состоит из двух отсеков: отсек для зерна и технологический отсек разделенных специальным прозрачным антибликовым стеклом. Отсек для зерна выполнен в виде съемного ящика для удобного наполнения. В технологическом отсеке располагается фотографическая камера и специальное светодиодное освещение. Внутренняя поверхность отсека покрыта белой краской для лучшего отражения света. Макет измерительного бункера оснащен вычислителем ODROID для автоматической оценки качества зерна.

Создание прототипа зернового бункера позволило сформировать  $m$  изображений  $I$  для каждой партии зерновой смеси с массовой долей  $p$ . Подробное описание бункера для автоматизированного сбора тестовых изображений приводится в статье [13]. Обоснование количества привлекаемых для тестирования изображений  $m$  приводится далее.

### 3. Описание алгоритма детектирования битого зерна

Практически установлено, что при правильно подобранном освещении зерно пшеницы под сколотой оболочкой имеет на фотографии цвет значительно более светлый, чем сама оболочка. Это наблюдение позволяет создать простой и надежный инженерный алгоритм детектирования битых зерен пшеницы. Опишем его пошагово:

1. На вход алгоритма подается фотография зерна (рисунок 4 а) и значение ее разрешения, выраженное в количестве пикселей на дюйм (dots per inch, dpi). Зная реальные размеры зерна пшеницы с использованием dpi можно рассчитать размеры зерна в пикселях изображения;

2. Входная фотография преобразовывается к серому изображению путем усреднения всех компонент цвета (рисунок 4 б);

3. Изображение бинаризуется по глобальному порогу (рисунок 4 с), определенному с помощью метода Отцу. На изображении белые пиксели соответствуют в основном поверхностям зерна под битой оболочкой;

4. Для удаления шума состоящего из большого количества мелких групп связностей применяется операция морфологического открытия изображений с окном, размер которого пропорционален величине  $d_{pi}$  (рисунок 4 d);

5. Близкорасположенные группы связности белых пикселей с большой вероятностью соответствуют одному и тому же зернышку. Для достижения однозначного соответствия между битыми зернами и компонентами связности выполняется слияние близкорасположенных компонент связности с помощью морфологической дилатации изображения с окном, размер которого пропорционален величине  $d_{pi}$  (рисунок 4 e);

6. Центры 8-связных групп белых пикселей (показаны красными метками) объявляются координатами детектированных битых зерен (рисунок 4 f).

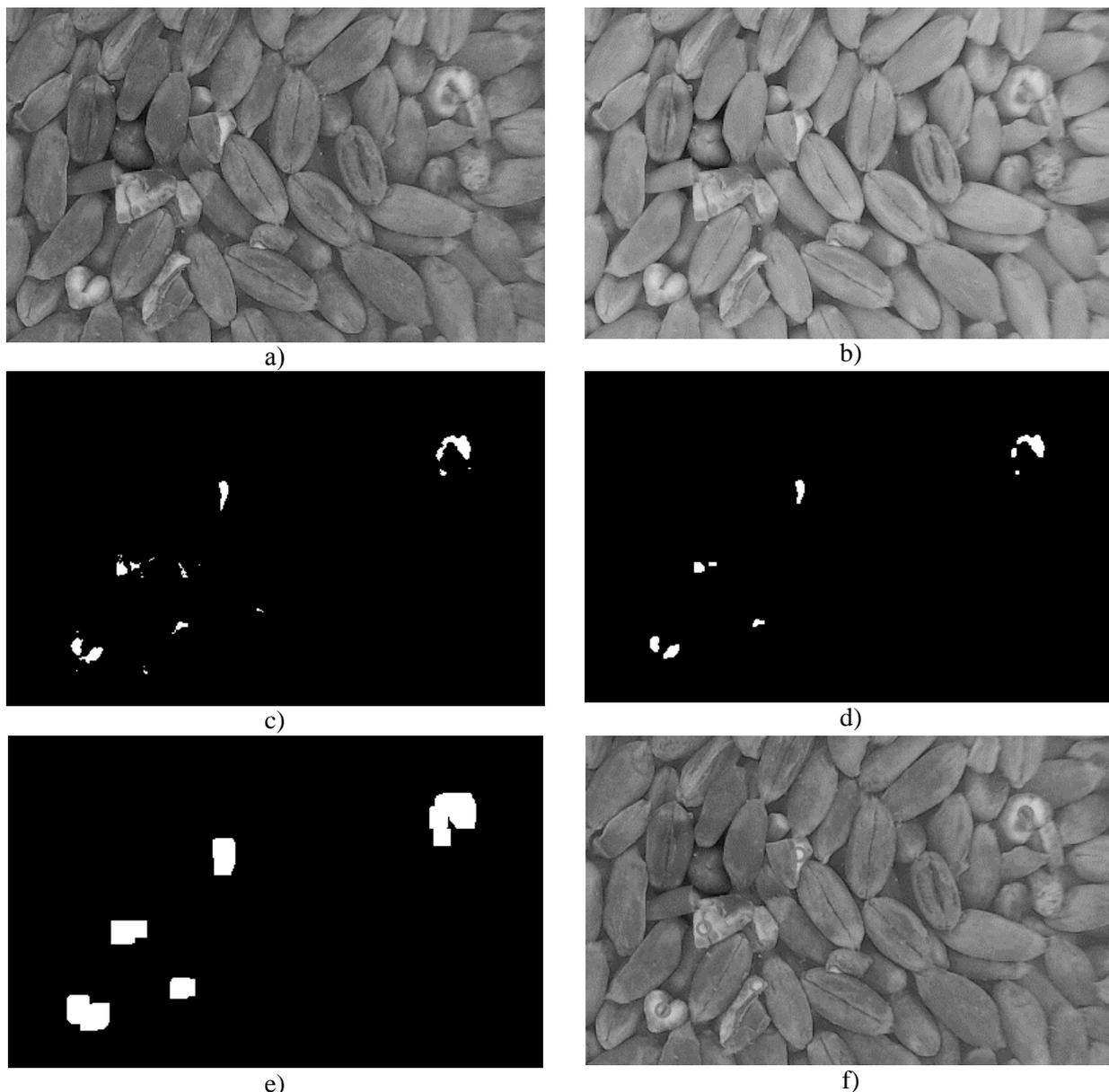


Рисунок 4 – Этапы работы алгоритма детектирования дробленых зерен

#### 4. Описание алгоритма оценки массовой доли примесей

Изображение, содержащее примеси пшеницы представлено на рисунке (рисунок 5). Ввиду большого разнообразия примесей использование ранее предложенного подхода затруднительно. Однако из практики отмечено, что изображение зерна без примесей обладает наименьшим разбросом цветов, а при росте доли примесей этот разброс растет. Поэтому можно выразить разброс цветов

количественно. Представим наше изображение в виде функции трех переменных: двух координат пикселей и номера цветового канала  $I = I(u, v, c)$ , где  $u, v$  – координаты пиксела на изображении,  $c$  – цветовой канал.



Рисунок 5 – Изображение примесей пшеницы

Средний цвет изображения, определим по формуле

$$\bar{I}(c) = \frac{1}{h \cdot w} \sum_{u=1}^w \sum_{v=1}^h I(u, v, c) \quad (1)$$

Тогда разброс цветов, который соответствует квадратному корню из дисперсии цветов, будет равен

$$\Sigma_n = \sqrt{\sum_{c=1}^3 \frac{1}{h \cdot w} \sum_{u=1}^w \sum_{v=1}^h (I(u, v, c) - \bar{I}(c))^2} \quad (2)$$

где  $n$  – количество видимых на изображении зерен, рассчитываемое исходя из площади охватываемой изображением и средним размером зерна пшеницы.

### 5. Определение параметров регрессии

Создавая смеси зерна с различными известными  $p$ , получая фотографии зерновой смеси и запуская детектор, получим реализации  $P_n$ . Обучающая выборка, таким образом, состоит из пар  $\{p, P_n\}$ , вид которой представлен на рисунке (рисунок 6).

Математическое ожидание величины  $p$  может быть найдено в виде линейной регрессии с квадратичным штрафом  $[p - E(P_n)]^2 \rightarrow \min$  (см. рисунок 6)

$$\hat{E}[P_n|P = p] = [b_1 \quad b_2] \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ p \end{bmatrix} \quad (3)$$

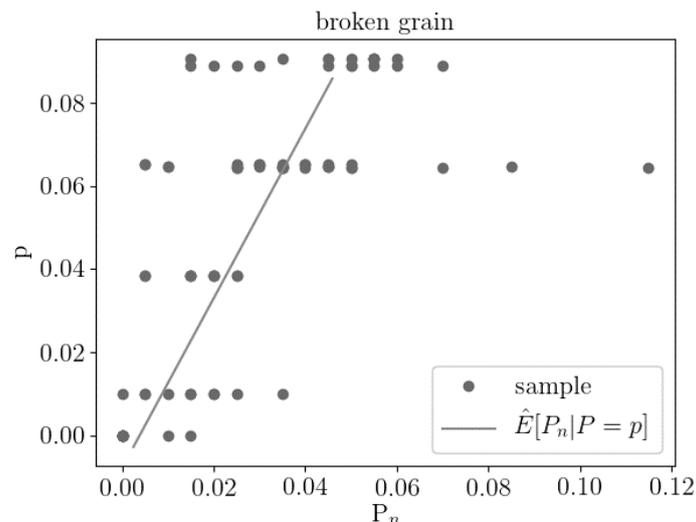


Рисунок 6 – Значения случайной доли битых зерен  $P_n$  найденные детектором, в зависимости от истинной доли битых зерен  $p$  (синие точки), оценка среднего значения доли найденных детектором зерен в зависимости от истинной доли битых зерен (красная линия)

Однако, как видно на рисунке, показания детектора  $P_n$  могут быть очень разными для одного и того же значения истинной доли битых зерен  $p$ . Происходит это из-за малости количества видимых на

изображении зерен  $n$  и в конечном счете приводит к большой дисперсии оценки. Поэтому для формирования оценки используется несколько изображений зерна  $m$  содержащих  $n$  измерений, а результат усредняется.

Аналогично получим зависимость массовой доли примесей зерна от дисперсии цветов изображений (см. рисунок).

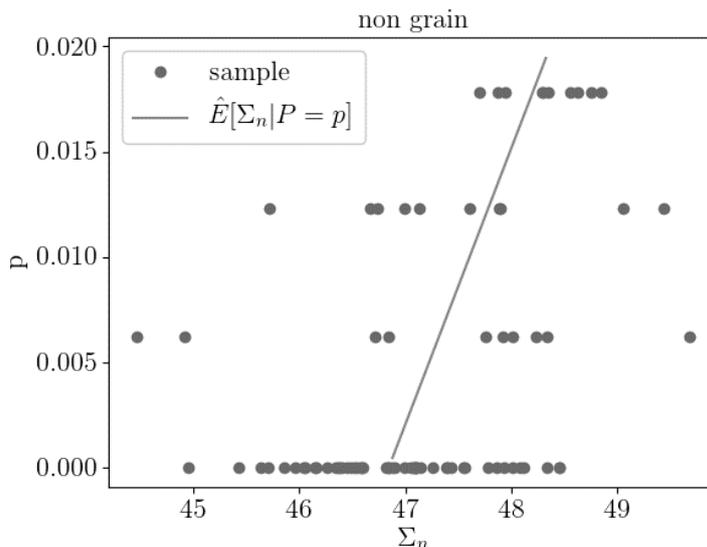


Рисунок 9 – Значения случайной доли примесей  $\Sigma_n$ , найденные детектором, в зависимости от истинной доли примесей зерен  $p$  (синие точки), оценка среднего значения доли примесей в зависимости от истинной доли примесей зерен (красная линия)

#### 6. Оценка точности предложенного подхода

Для оценки точности мы использовали  $m=10$  изображений зерна, каждое из которых вмещает  $n=200$  зерен. Таким образом, каждая оценка основана на анализе  $N = m \cdot n = 2000$  зерен.

Для каждого значения истинной доли  $p$  точность оценщика характеризуется средней квадратической ошибкой

$$\sigma_{MSE} = \sqrt{MSE(p)} = E(P(p) - p)^2 \quad (4)$$

С учетом привлекаемых выборок  $k= 1,2...K$  выражение для нахождения средней квадратической ошибки имеет вид

$$\hat{\sigma}_{MSE} = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (\hat{P}_k(p) - p)^2} \quad (5)$$

Предельно достижимая точность оценки  $\sigma_{MSE}$  рассчитывалась в соответствии с формулой

$$\sigma_{MSE} = \sqrt{\frac{p \cdot (1-p)}{n}} \quad (6)$$

Результаты оценки представлены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнительный анализ точности полученных оценок с предельно достижимой точностью

№	$p$	$\hat{\sigma}_{MSE}$	$\sigma_{MSE}$	$\frac{\hat{\sigma}_{MSE}}{\sigma_{MSE}}$
зерно	0.0652	0.0117	0.00552	2.12
примеси	0.0178	0.00557	0.00295	1.89

#### Заключение

В работе предложена технология, позволяющая автоматически оценивать массовую долю битых зерен пшеницы и примесей. Разработан макет измерительного бункера обеспечивающего проведение измерений. Описаны признаки, использующиеся для решения задачи детектирования зерна. Приведены показатели точности работы алгоритмов, полученные путем обработки большого количества изображений.

В дальнейшем для повышения качества детектирования предлагается использовать сверточные нейронные сети [14], в частности, UNet [15]. Все вычисления при этом предлагается делать на вычислительной платформе Jetson TX1/TX2. Важно заметить, что вышеописанный способ оценки массовой доли примесей является применимым не только для пшеницы, но и для любой другой зерновой культуры.

1. ГОСТ 13586.3–2015 Зерно. Правила приемки и методы отбора проб.
2. ГОСТ 10967–90 Зерно. Методы определения запаха и цвета.
3. ГОСТ 13586.5–2015 Зерно. Метод определения влажности.
4. ГОСТ 13586.2–81 Зерно. Методы определения и содержания сорной, зерновой, особо учитываемой примесей, мелких зерен и крупности.
5. ГОСТ 9353–90 Пшеница. Требования при заготовках и поставках.
6. Donald R Webster. Grain quality analyzer, April 7 1981. US Patent 4, 260,262.
7. Y-N Wan, C-M Lin, and J-F Chiou. Rice quality classification using an automatic grain quality inspection system. Transactions of the ASAE, 45(2):379, 2002.
8. Sun-Ok Chung, Moon-Chan Choi, Kyu-Ho Lee, Yong-Joo Kim, Soon-Jung Hong, and Minzan Li. Sensing technologies for grain crop yield monitoring systems: A review. Journal of Biosystems Engineering, 41(4):408–417, 2016.
9. Steven L Wright and C Fred Hood. Near infrared spectrometer used in combination with a combine for real time grain analysis, May 12 1998. US Patent 5,751,421.
10. JM Montes, HF Utz, W Schipprack, B Kusterer, J Muminovic, C Paul, and AE Melchinger. Near-infrared spectroscopy on combine harvesters to measure maize grain dry matter content and quality parameters. Plant Breeding, 125(6):591–595, 2006.
11. P Reyns, B Missotten, H Ramon, and J De Baerdemaeker. A review of combine sensors for precision farming. Precision Agriculture, 3(2):169–182, 2002.
12. Mathias Escher M.Sc. and Dipl.-Ing. Thilo Krause. Grain quality camera. 4th International Conference on Machine Control and Guidance, pages 8–15, 2014.
13. A. V. Panchenko, N. V. Reshetnyak, A. M. Samohin, V. V. Postnikov, "The automated testing facility based on machine vision for optimizing grain quality control technology", Proc. SPIE 10341, Ninth International Conference on Machine Vision (ICMV 2016), 103411Q (17 March 2017); doi: 10.1117/12.2268596;
14. Shkanaev A.V., Polevoy D.V., Panchenko A.V., Borisov Y.Y. and Kolomeychenko M.I. Straw row position and orientation reconstruction through image segmentation. International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 11, Number 24 (2016) pp. 11803-11810.
15. U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. arXiv preprint arXiv:1505.04597v1, p.1-8, 2015.

*A.V. Panchenko<sup>1</sup>, A.Yu. Shkanaev<sup>1</sup>, D.A. Krochina<sup>1</sup>, D.V. Polevoy<sup>2</sup>, R.N. Sadekov<sup>3</sup>*

## **ANALYSIS OF STRAW ROW IN THE IMAGE TO CONTROL THE TRAJECTORY OF THE AGRICULTURAL COMBINE HARVESTER<sup>XII</sup>**

### **Abstract**

The paper proposes a solution to the automatic operation of the combine harvester along the straw rows by means of the images from the camera, installed in the cab of the harvester. The U-Net is used to recognize straw rows in the image. The edges of the row are approximated in the segmented image by the curved lines and further converted into the harvester coordinate system for the automatic operating system. The “new” network architecture and approaches to the row approximation has improved the quality of the recognition task and the processing speed of the frames up to 96% and 7.5 fps, respectively.

Keywords: grain harvester, semantic segmentation, convolutional neural networks, windrow.

*A.B. Панченко<sup>1</sup>, А.Ю. Шканаев<sup>1</sup>, Д.А. Крохина<sup>1</sup>, Д.В. Полевой<sup>2</sup>, Р.Н. Садеков<sup>3</sup>*

## **АНАЛИЗ ГРАНИЦ ВАЛКОВ НА ИЗОБРАЖЕНИИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ТРАЕКТОРИЕЙ ДВИЖЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО КОМБАЙНА<sup>II</sup>**

<sup>1,2,3</sup>ООО Когнитивные Технологии, г. Москва, [panchenko@cognitive.ru](mailto:panchenko@cognitive.ru),

#### Аннотация

В работе предлагается решение задачи автовождения вдоль соломенных валков по изображениям камеры установленной в кабине комбайна. Распознавание соломенных валков на изображении реализуется сетью U-Net. Края валка аппроксимируются на сегментированном изображении кривыми линиями и пересчитываются в систему координат комбайна для системы авто ведения. Применение «новой» архитектуры сети и подходов к аппроксимации валков повысило качество решения задачи распознавания и скорости обработки кадров до 96% и 7.5 кадров в секунду соответственно.

Ключевые слова: зерноуборочный комбайн, семантическая сегментация изображения, сверточные (конволюционные) нейронные сети, соломенный валок.

#### Введение

В последние годы, развитие информационных технологий, привело к значительному увеличению R&D проектов в области автоматизации транспортных средств: продвинутые системы помощи водителя (ADAS), автопилотируемые системы (self-driving car), производственные и бытовые роботы [1] и т.д. Увеличение числа населения до 10 миллиардов к 2050 году, ставит перед сельскохозяйственной отраслью новые вызовы в повышении производительности и автоматизации всех видов работ [2]. В течение прошлых 20 лет значительные успехи в данной области реализовали Япония, США и Европа. Внедрение в рамках концепции «Precision Agriculture» интегрированных GPS технологий позволило значительно повысить автоматизацию процессов мониторинга и уборки урожая. Так, современные комбайны содержат большое количество датчиков, обеспечивающих управление не только движением комбайна, но и осуществляющих оперативный анализ качества зерна с целью управления уровнем потерь. Задача автовождения комбайна вдоль заданной линии убранного/неубранного участка поля, являться важным этапом автоматизации процесса уборки урожая. Решение данной задачи может осуществляться с использованием системы технического зрения, формирующей изображения для последующего анализа полевой сцены. Анализ полевой сцены на изображении не является тривиальной задачей, в силу существенной неоднородности, высокой текстурированности и разной освещенности поля. Поэтому в работе, предлагается подход, обеспечивающий высокую точность сегментирования изображений полевой сцены, на основе автовождения сетей. Обучение и тестирование сети осуществлялось с использованием большого объема собранных и размеченных вручную данных. Использование новой архитектуры сети для решения данной задачи позволило повысить точность сегментации и быстроту ее решения.

#### Обзор

Для решения задачи автономного и полуавтономного вождения комбайнов по полю применяются различные типы датчиков [3-5] (рисунок 1).



Рисунок 1 – Задача автовождение сельскохозяйственного комбайна по валку

Известны решения, в которых автовождение осуществляется по информации систем технического зрения, при этом часть алгоритмов ориентирована на распознавания краев скошенного/нескошенного поля [6-8] другая валков [9-11]. Структура полученных алгоритмов зависит от количества используемых камер и их местоположения на комбайне. Так в работе [7], использовалась камера, установленная на

крыше комбайна. В работах [12-14] используется стерео система. Наиболее устойчивых и надежных результатов удалось добиться при установке камеры в кабине комбайна [11,12,15].

Развитие алгоритмов детектирования элементов полевой сцены ведется на протяжении многих лет. Так, алгоритмы детектирования, использующие одну камеру, сначала ориентировались на нахождение прямой линии, разделяющей убранную и необработанную части поля, путем бинаризации изображения. Далее детекторы использовали цветную сегментацию, основанную на разделении областей по признаку растительность (цвета в зеленом диапазоне)/остальная область [23]. Нечеткое объединение в кластеры по «растительным» признакам для последующей бинаризации приведено в работах [17,18] для обеспечения большей устойчивости к освещенности и теням. Однако цветовая сегментация показала свою неэффективность, в условиях изменения объектами своего цвета в процессе созревания, смены погодных условий и др.

Для детектирования и оценки положения линий аппроксимирующих края поля часто используется различные техники: фиксированный шаблон [20]; линейная регрессия [10,19]; преобразование Хаффа [16,21,22]; методы RANSAC [12], подходы, использующие точки схода [8,21].

В течение последних нескольких лет сверточные нейронные сети [24] показали замечательные результаты в компьютерном зрении и решении таких задач как классификация изображений [25-27] и обнаружение объектов [28-30]. Недавние работы также показали, что данные сети могут одинаково хорошо решать задачи пиксельно-уровневого объединения, таким как семантическая сегментация [1,31].

Последние самые успешные результаты для семантической сегментации изображений основаны на использовании Fully Convolutional Networks (FCN) и их модификациях [1, 31, 32, 33]. Основанные на FCN модели используют входное изображение и производят другое изображение, которое обычно интерпретируется как карта сегментации. В таком случае можно построить основанные на FCN модели, использующие глобальную контекстную информацию от всего изображения.

В работе [34] для сегментации валков на изображении мы использовали сеть с архитектурой Deepconvnet, которая обеспечила высокое качество распознавания, однако имела низкое быстродействия для решения задачи в реальном времени. Поэтому в данной работе для повышения быстродействия и сохранения качества распознавания использовалась сверточная сеть U-net [35].

### Архитектура сети

По отношению к работе [35] мы использовали уменьшенное изображение разрешением 224x224, с уменьшенным вдвое количеством фильтров на каждом конволюционном слое (рисунок 2).

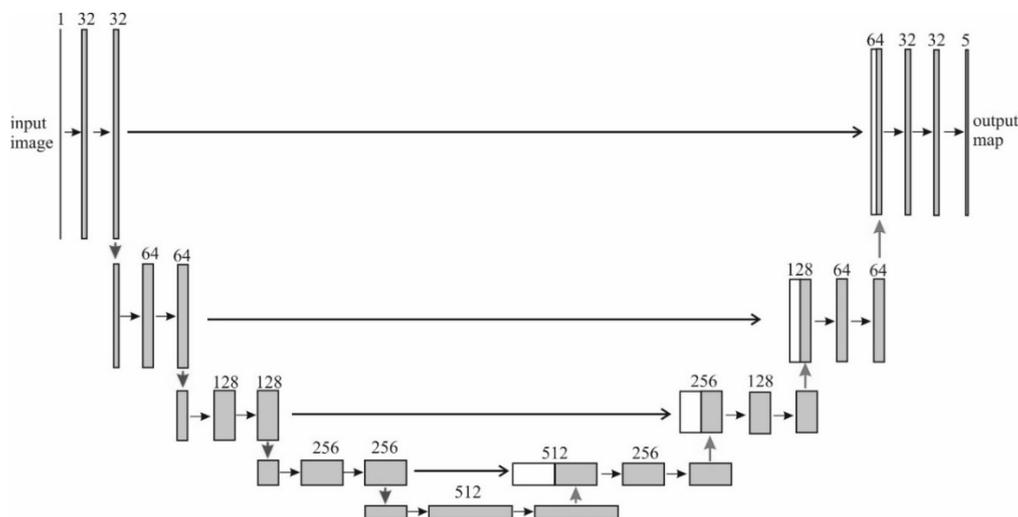


Рисунок 2 – Архитектура модифицированной сети U-net

На рисунке 2 серые блоки показывает карту признаков. Число используемых фильтров представлено цифрами сверху. Длинные тонкие стрелки обозначают операцию копирования и обрезки, полученных на начальных этапах feature map и перенос их на более поздние этапы, операция присоединения показана белыми прямоугольниками. Красные вертикальные стрелки операция max pool 2x2, короткие стрелки операции conv 3x3, зеленые вертикальные стрелки up-conv 2x2.

### Набор данных

Набор данных состоит из изображений, которые были получены с камеры, установленной на сельскохозяйственном комбайне. Полученные изображения были размечены вручную, что позволило сформировать набор эталонных карт сегментации изображения, в количестве 925 штук.

Размеченные изображения содержали следующие классы объектов:

- Валок;
- Нескошенный урожай;
- Скошенный урожай;
- Жатка;
- Фон (все прочие классы объектов).

Области размеченных вручную классов на изображении представлены в виде многоугольников (рисунок 3). Анализ изображений показал, что примерно 27% площади изображения была занята фоном (небо, деревья и край поля, техника), 5% - валок (Straw row), 17% - скошенным урожаем, 41% - необранной частью поля, и 10% жаткой комбайна.

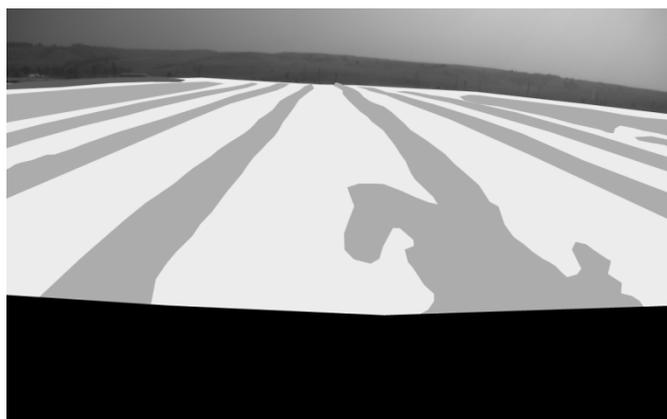


Рисунок 3 – Пример эталонной разметки изображения

Поскольку в учебном наборе присутствовало только 925 уникальных изображений, что не достаточно для обучения сети, мы использовали методы раздутия данных. Увеличение объема данных осуществлялось на основе четырех приемов:

- горизонтальные смещения изображения (flips);
- вращение изображений по часовой и против часовой стрелки на небольшие углы (4-9 градусов);
- случайные обрезания изображения с сохранением 80% исходной площади;
- незначительные изменения в каждом цветовом канале изображения.

После применения описанных выше приемов, было получено 22200 изображений. Таким образом, используемые методы позволили в 24 раза увеличить объем исходной выборки.

Для обучения и тестирования сети мы использовали стандартную практику и разбили весь объем данных на 3 группы: 60% случайно выбранных изображений были назначены для обучения, 20% на этап валидации и 20% на тестовую проверку.

Процесс обучения сети, основывался на известном подходе triangular learning rate [36] с константным периодом (первые N эпох learning rate не изменялся и был равен 0.01, затем циклически изменялся от 0.01 до 0.05 до конца обучения).

Сейчас проводятся эксперименты обучения U-net с измененной геометрией входного изображения размерами кратными 320 или 160 пикселей, что является более правильным для обработки кадров с соотношением W/H = 1.8.

Точность работы сети оценивалась с использованием двух характеристик intersection over Union (IoU) и Accuracy (Acc). В таблице 1 приведены данные точности работы сети по каждой из характеристик в отдельности, общие результаты точности и скорость работы сети. В первой строке приведены данные по работе сети [34], во второй, используемой в настоящее время сети U-net [35].

Таблица 1. Сравнительная точности сегментации различными сетями

	Background	Uncut crop	Straw Row	Combine Head	Harvested Crop	Global	Fps
--	------------	------------	-----------	-----------------	-------------------	--------	-----

	Acc	IoU											
deconv	99.1	98.4	96.4	94.4	84.9	76.8	99.5	98.0	93.2	84.2	94.0	90.4	2.5
unet	98.8	96.5	97.5	95.4	86.1	78.4	99.7	98.3	92.0	85.1	96.0	92.7	7

Из анализа таблицы видно, что использование сети U-net позволило повысить скорость работы сети в 3 раза, при этом качество работы не снизилось, а в целом повысилось на 2%. Скорость работы сетей оценивалась на платформе NVIDIA Jetson TX1.

Для хорошо представленных классов, таких как фон, точность работы сети чрезвычайно высока. С другой стороны, точность для недостаточно представленного класса «Соломенный валок (Straw Row)» находится на уровне 85 процентов.

### Алгоритм решения

Цель активного регулирования заднего колеса состоит в том, чтобы держать соломенный валок между передними колесами комбайна во время его движения по полю (рисунок 1). Траектория вдоль средней линии валка, как правило, сохраняет комбайн от опасных ситуаций, поскольку соломенные ряды формируются таким образом, чтобы гарантировать отсутствие препятствий. После окончания одного соломенного валка комбайн осуществляет маневр разворота и переключается на соседний валок.

После получения сегментированного изображения от сети решается задача реконструкции сцены и определения геометрии валков, т.е. находится направление и положение соломенного валка относительно подвижной системы координат комбайна. Ориентация и положение валков соломы требуется для подачи корректирующих воздействий в подсистему управления комбайна. Класс «валок» единственная информация на изображении, которая участвует в алгоритме. Другие классы, распознанные на изображении, игнорируются, однако информация о них может использоваться при решении других смежных задач. Например, автоматического управления комбайном при движении вдоль кромки убранного и неубранного участка поля, экстренная остановка перед препятствиями и т.д.

Алгоритм определения краев валка состоит из следующих этапов:

- Работа сети и формирование сегментированного изображения.
- Преобразование исходного изображения в систему координат комбайна, посредством использования преобразования birdeye-view.
- Определение связности пикселей валка путем построения четырехсвязного графа.
- Выделение валков имеющих приблизительно одинаковую ширину на всей протяженности и сравнения ее с допустимым порогом. Если валок имеет непостоянную ширину, значит, работа сети является неправильной и такой валок в дальнейшей обработке не используется.
- Определение средней линии валка, путем усреднения крайней левой и правой его границы.
- Аппроксимация средней линии валка кривой третьего порядка.
- Перенос линии вправо и влево исходя из измеренной по изображению ширине валка.
- Слежение за окончанием валка и подача звукового сигнала комбайнеру.

В каждом такте работы сети, производится сопоставление результатов положения валка на предыдущем кадре с текущим, используя допуск пропорциональный скорости движения комбайна. Если результат сопоставления положительный, то используется новая информация о положении валка, если нет, то используется информация о положении валка в предыдущий момент времени, так реализуется процедура «слежения».

На рисунке 4 представлен набор изображений, левый столбец сегментированное с использованием сети изображение, правый – исходное изображения с нанесенными линиями границ валка. На сегментированном изображении красной тонкой линией показаны границы валка, голубой – поля, красной заливкой – область жатки, черной – аппроксимированные с помощью алгоритма области – валка. На исходном изображении красной линией - границы валка и его середина, красной горизонтальной линией - линия горизонта.

Первый ряд изображений демонстрирует нормальное положение валков на изображении, второй ряд - работу детектора в случае окончания ряда валков, третий ряд – работу детектора при появлении в кадре нового ряда валков, четвертый ряд – в условиях нечетких границ валка.

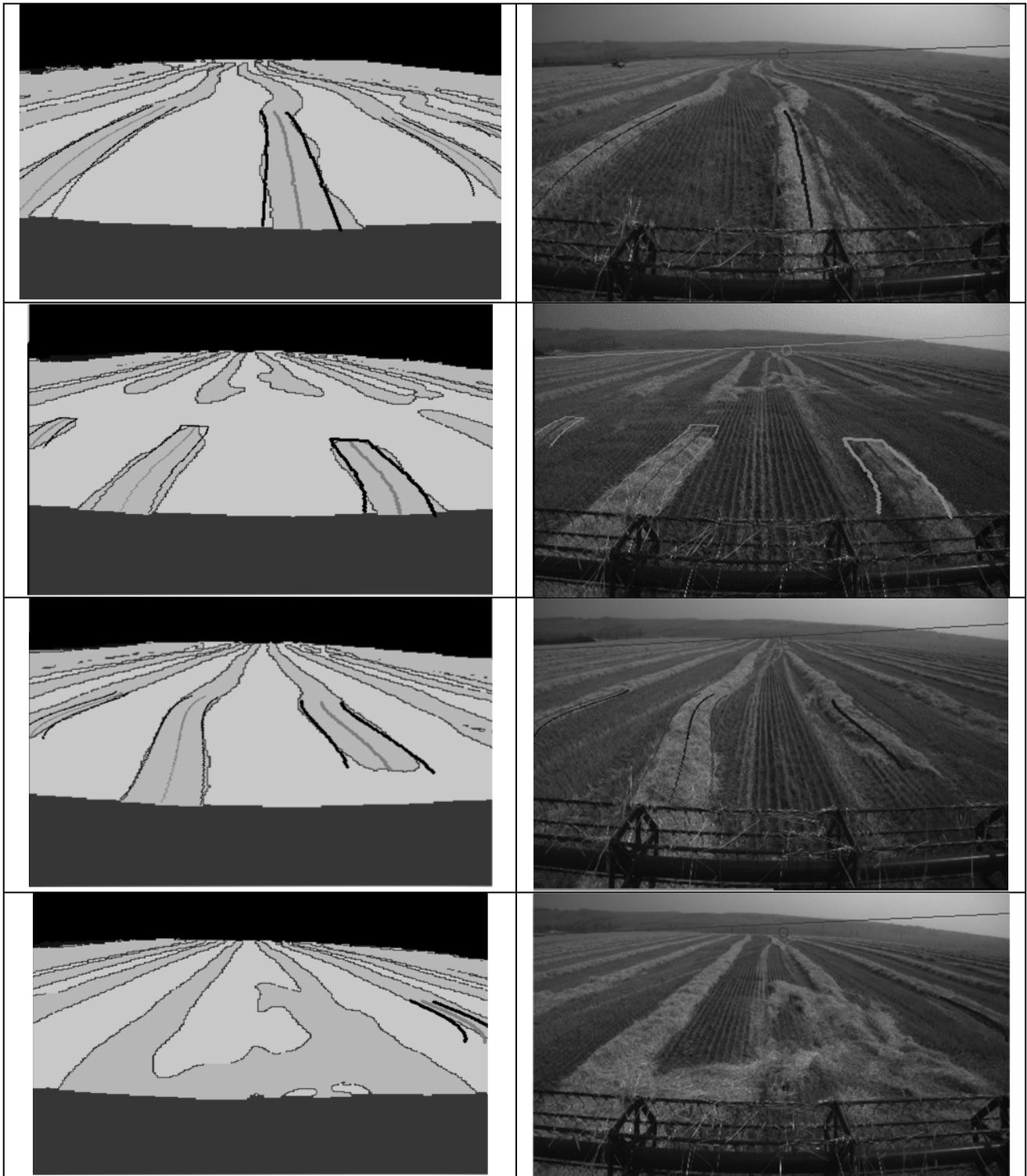


Рисунок 4 – Сегментированное изображение (а) и результат распознавания валка на исходном изображении (б)

### Заключение

В работе показано, что используемая сеть подходит для сегментации полевой сцены и выявления валков сена. Проведенные эксперименты доказали, высокую точность и высокую скорость полученного решения. Сеть обучена от начала до конца (end-to-end) на собственной базе изображений. Модификация структуры сети, а именно уменьшения количества фильтров в слоях привело к значительному повышению скорости решения, на уровне 7.5 fps.

Для определения положения соломенного ряда использовалась информация о калибровочных параметрах камеры и преобразование birds view. Реконструкция геометрии соломенного ряда может

быть сделана с достаточной скоростью обработки, чтобы реализовать автоматическое управление комбайном вдоль рядов валков.

1. Li, L., et al., Cognitive cars: A new frontier for ADAS research. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2012. 13(1): p. 395-407.
2. Bulanon, D. and T. Kataoka, Fruit detection system and an end effector for robotic harvesting of Fuji apples. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 2010. 12(1).
3. Mousazadeh, H., A technical review on navigation systems of agricultural autonomous off-road vehicles. *Journal of Terramechanics*, 2013. 50(3): p. 211-232.
4. Rosell-Polo, J.R., et al., Chapter Three-Advances in Structured Light Sensors Applications in Precision Agriculture and Livestock Farming. *Advances in Agronomy*, 2015. 133: p. 71-112.
5. Vázquez-Arellano, M., et al., 3-D Imaging Systems for Agricultural Applications—A Review. *Sensors*, 2016. 16(5): p. 618.
6. Ollis, M. and A. Stentz. Vision-based perception for an automated harvester. in *Intelligent Robots and Systems, 1997. IROS'97., Proceedings of the 1997 IEEE/RSJ International Conference on*. 1997. IEEE.
7. Benson, E., J. Reid, and Q. Zhang, Machine vision-based guidance system for an agricultural small-grain harvester. *Transactions of the ASAE*, 2003. 46(4): p. 1255.
8. Cho, W., et al., Vision-based uncut crop edge detection for automated guidance of head-feeding combine. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 2014. 7(2): p. 97-102.
9. Billingsley, J. and M. Schoenfisch, The successful development of a vision guidance system for agriculture. *Computers and electronics in agriculture*, 1997. 16(2): p. 147-163.
10. Han, S., et al., A guidance directrix approach to vision-based vehicle guidance systems. *Computers and electronics in Agriculture*, 2004. 43(3): p. 179-195.
11. English, A., et al. Vision based guidance for robot navigation in agriculture. in *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2014. IEEE.
12. Halmetschlager, G., J. Prankl, and M. Vincze. Probabilistic near infrared and depth based crop line identification. in *Workshop Proceedings of IAS-13 Conference on*. 2014.
13. Zhai, Z., et al., Multi-crop-row detection algorithm based on binocular vision. *Biosystems Engineering*, 2016. 150: p. 89-103.
14. Milella, A. and G. Reina, Adaptive multi-sensor perception for driving automation in outdoor contexts. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2014. 11.
15. Ball, D., et al., Vision-based Obstacle Detection and Navigation for an Agricultural Robot. *Journal of Field Robotics*, 2016.
16. Bakker, T., et al., A vision based row detection system for sugar beet. *Computers and electronics in agriculture*, 2008. 60(1): p. 87-95.
17. Romeo, J., et al., Crop row detection in maize fields inspired on the human visual perception. *The Scientific World Journal*, 2012. 2012.
18. Guerrero, J.M., et al., Automatic expert system based on images for accuracy crop row detection in maize fields. *Expert Systems with Applications*, 2013. 40(2): p. 656-664.
19. Sogaard, H.T. and H.J. Olsen, Determination of crop rows by image analysis without segmentation. *Computers and electronics in agriculture*, 2003. 38(2): p. 141-158.
20. Marchant, J., Tracking of row structure in three crops using image analysis. *Computers and electronics in agriculture*, 1996. 15(2): p. 161-179.
21. English, A., et al. Learning crop models for vision-based guidance of agricultural robots. in *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2015 IEEE/RSJ International Conference on*. 2015. IEEE.
22. Astrand, B. and A.-J. Baerveldt, A vision based row-following system for agricultural field machinery. *Mechatronics*, 2005. 15(2): p. 251-269.
23. Guijarro, M., et al., Discrete wavelets transform for improving greenness image segmentation in agricultural images. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015. 118: p. 396-407.
24. LeCun, Y., et al., Gradient-based learning applied to document recognition. *Proceedings of the IEEE*, 1998. 86(11): p. 2278-2324.
25. Krizhevsky, A., I. Sutskever, and G.E. Hinton. Imagenet classification with deep convolutional neural networks. in *Advances in neural information processing systems*. 2012.
26. Simonyan, K. and A. Zisserman, Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. *arXiv preprint arXiv:1409.1556*, 2014.
27. Szegedy, C., et al. Going deeper with convolutions. in *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2015.

28. Ren, S., et al. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks. in Advances in neural information processing systems. 2015.
29. Redmon, J., et al., You only look once: Unified, real-time object detection. arXiv preprint arXiv:1506.02640, 2015.
30. Liu, W., et al., SSD: Single Shot MultiBox Detector. arXiv preprint arXiv:1512.02325, 2015.
31. Long, J., E. Shelhamer, and T. Darrell. Fully convolutional networks for semantic segmentation. in Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2015.
32. Zheng, S., et al. Conditional random fields as recurrent neural networks. in Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. 2015.
33. Chen, L.-C., et al., Semantic image segmentation with deep convolutional nets and fully connected crfs. arXiv preprint arXiv:1412.7062, 2014.
34. Shkanaev A.V., Polevoy D.V., Panchenko A.V., Borisov Y.Y. and Kolomeychenko M.I. Straw row position and orientation reconstruction through image segmentation. International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 11, Number 24 (2016) pp. 11803-11810.
35. U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. arXiv preprint arXiv:1505.04597v1,p.1-8, 2015.
36. Leslie N.S., Cyclical learning rate for training neural networks. arXiv preprint arXiv:1506.0118686v6, p.1-10, 2017.

*E.Shipovalov, V.Pryanichnikov*

### **AUTOMATED MISSION PLANNING FOR MOBILE ROBOTS USING ON-BOARD COMPUTERS WITH HYBRID ARCHITECTURES**

*KIAM RAS, IINET RSUH, MSTU "STANKIN", IL "Sensorika", Москва, v.e.pr@yandex.ru*

#### Abstract

Design of original hybrid parallel (CPU+GPU) software solution for automated planning of mobile robot missions using heuristic state space search is described. New massively parallel algorithms are proposed. Also included is an analysis of current state of domain-independent planning in artificial intelligence research, review of challenges for improving planner performance and scalability, and possible solutions. Special attention is given to adaptation of planner software to mobile low-power parallel computing platforms based on generalized GPU technology. Suggested approaches are very useful in extreme robotics.

Key words: automated planning, domain-independent planning, heuristic search, parallel computation, STRIPS, PDDL, artificial intelligence, mobile robot, GPU, GPGPU, CUDA.

*Е.А. Шиповалов, В.Е. Пряничников*

### **АВТОПЛАНИРОВАНИЕ МИССИЙ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ БОРТОВЫМИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМИ КОМПЛЕКСАМИ С ГИБРИДНОЙ АРХИТЕКТУРОЙ**

*ИИМ им.Келдыша РАН, МИНОТ РГТУ, МГТУ "Станкин", МЛ «Сенсорика», Москва, v.e.pr@yandex.ru*

#### Аннотация

Описывается оригинальный программный комплекс для автоматического планирования миссий мобильных роботов методом эвристического поиска в пространстве состояний, адаптированный для работы в гибридных вычислительных системах (CPU + GPU). Предложены новые алгоритмы с высоким уровнем параллелизации. Анализируются текущее состояние автоматического доменно-независимого планирования, позволяющего интеллектуализировать бортовые вычислительные комплексы мобильных роботов. Рассматриваются проблемы повышения производительности и масштабируемости планировочных алгоритмов и предлагается путь их решения. Особое внимание уделено адаптации к вычислительным платформам с низким энергопотреблением, построенным на основе универсализации технологии графических акселераторов. Предложенные подходы особенно актуальны для применения на роботах, эксплуатируемых в экстремальных условиях.

Ключевые слова: автоматическое планирование, доменно-независимое планирование, STRIPS, PDDL, эвристический поиск, параллельные вычисления, искусственный интеллект, мобильный робот, графический акселератор, GPU, GPGPU, CUDA.

*A.S. Yushenko, K.R. Lebedev, S.H. Zabihafar*

## **ADAPTIVE NEURAL NETWORK CONTROL OF QUADROTOR HELICOPTER**

*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, robot@bmstu.ru*

### **Abstract**

This paper proposes to solve the problem of controlling such a complex dynamical object as a quadrotor helicopter by using a neural network controller. A control method based on the adaptive algorithm of neural network tuning is considered herein. The proposed method is based on the system equilibrium in the sliding mode. This method enables to control the system without a priori information on parameters of a dynamic model for a controlled object as well as on environmental perturbations. To determine optimal weight factors for the neural network, adaptive algorithms are used. The network stability is proved by Lyapunov method. The proposed control method achieves good results through the simulation of a neural network controller and a dynamic quadcopter model in the MATLAB environment.

Keywords: UAV, quadrotor helicopter, nonlinear control, sliding-mode control, adaptive neural network.

*A.S. Ющенко, К.Р. Лебедев, С.Х. Забихафар*

## **УПРАВЛЕНИЕ КВАДРОКОПТЕРОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДАПТИВНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ**

*МГТУ имени Н.Э. Баумана, Москва, robot@bmstu.ru*

### **Аннотация**

В данной работе предлагается решение проблемы управления сложным динамическим объектом – квадрокоптером с помощью нейросетевого регулятора. Рассматривается метод управления, основанный на адаптивном алгоритме настройки нейронной сети. В основе предлагаемого метода лежит обеспечение устойчивого скользящего режима при действии случайных возмущений. Предлагаемый метод позволяет управлять системой без априорной информации о параметрах динамической модели управляемого объекта. Настройка нейронной сети происходит в реальном масштабе времени использованием адаптивных алгоритмов. С помощью метода Ляпунова доказана устойчивость движения в окрестности скользящего режима. Моделирование предложенного способа управления квадрокоптером в среде MATLAB демонстрирует его эффективность.

Ключевые слова: БПЛА, квадрокоптер, нелинейное управление, скользящее управление, адаптивная нейронная сеть.

### **Введение**

Рост интереса к использованию беспилотных мультироторных летательных аппаратов (БПЛА), предназначенных для широкого спектра задач, обусловлен простотой конструкции и управления, вместе с тем, решение задачи управления мультикоптерами осложняется за счет существенной нелинейности системы, а также действия внешних возмущений. Наиболее распространенные ПИД-регуляторы, а также линейно-квадратичные регуляторы, недостаточно хорошо справляются с этой задачей [1,2]. Возникает необходимость оперативной подстройки коэффициентов регуляторов в процессе работы, в том числе, в случаях изменения параметров объекта управления.

Одним из способов управления в изменяющихся условиях является применение скользящего режима [3]. Эта технология позволяет добиться стабилизации объекта управления при случайных внешних воздействиях и обеспечивает управление объектом при изменении его параметров в процессе работы. Принцип скольжения заключается в обеспечении движения системы в непосредственной близости от поверхности скольжения в пространстве состояний. Однако, скользящий режим имеет существенные недостатки, которые не позволяют его непосредственно применить в рассматриваемом

случае. Наиболее существенным является высокочастотный «дребезг» управляющего сигнала в малой окрестности поверхности скольжения. Кроме того, организация скользящего режима предполагает полное знание динамики системы. Для устранения этих недостатков были предложены разные методы. Например, в работе A.G. Aissaoui, H. Abid и M. Abid использование нечеткой логики при организации скользящего режима для управления приводом позволяет избежать высокочастотных колебаний [4]. В работе Lon-Chen Hung и Hung-Yuan Chung при организации скользящего режима при управлении манипулятором применяется искусственная нейронная сеть, решающая задачу идентификации его математической модели [5].

В данной работе представлен метод управления квадрокоптером с помощью нейросетевого регулятора, который не предполагает знания априорной информации ни о динамике объекта управления, ни о внешних возмущениях. Система использует два нейрорегулятора, один из которых аппроксимирует основной управляющий сигнал, позволяющий системе двигаться вблизи поверхности скольжения, а второй вырабатывает корректирующий сигнал, сглаживающий высокочастотные колебания.

### Динамика квадрокоптера

Квадрокоптер представляет собой беспилотный летательный аппарат с четырьмя двигателями, закрепленными на концах крестообразной рамы (рис.1). Противоположные моторы вращаются в разные стороны в целях компенсации изменения моментов импульса друг друга. Каждый мотор обладает вертикальной силой тяги, ответственной за подъем и маневрирование квадрокоптера. Уравнение динамики квадрокоптера можно записать в следующем виде [1]:

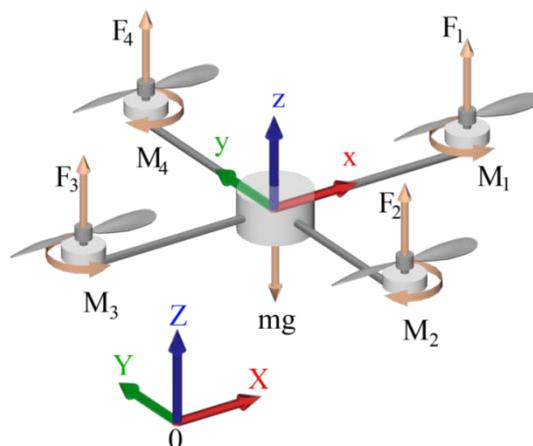


Рисунок 1 – Расчетная модель квадрокоптера

$$\begin{aligned}
 \ddot{\phi} &= \frac{U_{\phi}(t)}{I_x} + \frac{(I_y - I_z)}{I_x} \dot{\psi} \dot{\theta} - \frac{I_r \Omega_r(t)}{I_x} \dot{\theta} - \frac{k_{f\phi x}}{I_x} \dot{\phi}^2 + d_{\phi} \\
 \ddot{\theta} &= \frac{U_{\theta}(t)}{I_y} + \frac{(I_y - I_x)}{I_y} \dot{\psi} \dot{\phi} - \frac{I_r \Omega_r(t)}{I_y} \dot{\phi} - \frac{k_{f\theta y}}{I_y} \dot{\theta}^2 + d_{\theta} \\
 \ddot{\psi} &= \frac{U_{\psi}(t)}{I_z} + \frac{(I_x - I_y)}{I_z} \dot{\phi} \dot{\theta} - \frac{k_{f\psi z}}{I_z} \dot{\psi}^2 + d_{\psi} \\
 \ddot{x} &= \frac{(C_{\psi} S_{\theta} C_{\phi} + S_{\psi} S_{\phi}) U_1(t)}{m} - \frac{k_{f\dot{x}}}{m} \dot{x} + d_x \\
 \ddot{y} &= \frac{(S_{\psi} S_{\theta} C_{\phi} + S_{\psi} C_{\phi}) U_1(t)}{m} - \frac{k_{f\dot{y}}}{m} \dot{y} + d_y \\
 \ddot{z} &= \frac{C_{\theta} C_{\phi} U_1(t)}{m} - \frac{k_{f\dot{z}}}{m} \dot{z} - g + d_z
 \end{aligned} \tag{1}$$

где  $m$  - масса квадрокоптера,  $I_r$  - сумма моментов инерций роторов относительно оси  $z$ ,  $I_x$ ,  $I_y$ ,  $I_z$  - моменты инерции относительно главных осей,  $k_{f\dot{x}}$ ,  $k_{f\dot{y}}$ ,  $k_{f\dot{z}}$  - коэффициенты аэродинамического сопротивления перемещению,  $k_{f\dot{\phi}}$ ,  $k_{f\dot{\psi}}$ ,  $k_{f\dot{\theta}}$  - коэффициенты аэродинамического сопротивления вращению,  $\phi$ ,  $\theta$ ,  $\psi$  - углы

крена, тангажа и рысканья соответственно,  $x, y, z$  - координаты центра масс,  $d_x, d_y, d_z, d_\varphi, d_\theta, d_\psi$  - внешние возмущения по координатам,  $\omega_i$  - угловая скорость ротора  $i$ -го мотора,  $\Omega_r = \sum_{i=1}^4 (-1)^{i+1} \omega_i$ .

Вектор управляющих сигналов определяется угловыми скоростями роторов. При этом возможны четыре основных режима движения – вертикальное перемещение и поворот относительно каждого из углов:

$$\begin{bmatrix} U_1(t) \\ U_\varphi(t) \\ U_\theta(t) \\ U_\psi(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_p & k_p & k_p & k_p \\ 0 & -lk_p & 0 & lk_p \\ -lk_p & 0 & lk_p & 0 \\ k_d & -k_d & k_d & -k_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где,  $k_p$  - коэффициент тяги,  $k_d$  - моментный коэффициент.

### Постановка задачи управления с помощью нейросетевого регулятора

Динамическая модель квадрокоптера в форме Эйлера-Лагранжа может быть записана в виде [6]:

$$M(q)\ddot{q} + V_m(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + F(\dot{q}) = U, \quad (3)$$

где  $M(q)$  - матрица инерции,  $V_m(q, \dot{q})\dot{q}$  - вектор кориолисовых и центробежных сил,  $G(q)$  - вектор гравитации,  $F(\dot{q})$  - вектор сил аэродинамического сопротивления,  $U$  - вектор управляющих сил.

Рассмотрим задачу управления движением квадрокоптера по траектории, заданной вектором  $q_d = [x_d \ y_d \ z_d \ \varphi_d \ \theta_d \ \psi_d]^T$ . Определим ошибку, возникающую при движении как  $e = q_d - q$ , где  $q = [x \ y \ z \ \varphi \ \theta \ \psi]^T$  - вектор текущих координат. Основная идея рассматриваемого метода состоит в том, чтобы обеспечить устойчивое движение системы в окрестности поверхности скольжения. Зададим поверхность скольжения, преобразовав ошибку линейным фильтром

$$S = \dot{e} + \lambda e, \quad (4)$$

где  $\lambda > 0$  - диагональная матрица, определяющая наклон поверхности скольжения. При движении системы вдоль поверхности скольжения в фазовой плоскости преобразованная ошибка  $S$  и ее производная  $\dot{S}$  стремятся к нулю. Уравнение динамики квадрокоптера в терминах преобразованной ошибки  $S$  может быть записано как:

$$M\dot{S} = -V_m + f(x) - U, \quad (5)$$

где  $f(x)$  - неизвестная функция, определяемая динамикой квадрокоптера:

$$f(x) = M(q)(\ddot{q}_d + \lambda \dot{e}) + V_m(q, \dot{q})(\dot{q}_d + \lambda e) + F(\dot{q}) + G(q). \quad (6)$$

Для аппроксимации функции  $f(x)$  введем двухслойную нейронную сеть (НС) с сигмоидальной активационной функцией нейронов скрытого слоя, которую можно описать соотношением

$$f(x) = W^T \sigma(V^T x) + \varepsilon, \quad (7)$$

где  $W, V$  - неизвестные весовые множители. На ошибку аппроксимации  $\varepsilon$  наложены ограничения:  $\|\varepsilon\| < \varepsilon_N$ , ( $\varepsilon_N > 0$ ). Введенная НС., по существу, позволяет идентифицировать модель динамики управляемого объекта.

Представим теперь управляющий сигнал в виде суммы двух слагаемых:

$$U = U^* + U_{cor} \quad (8)$$

где  $U^*$  - основной управляющий сигнал для движения системы в непосредственной близости от поверхности скольжения, а  $U_{cor}$  - корректирующий сигнал, предназначенный для сглаживания высокочастотных колебаний в её окрестности. Основной управляющий сигнал выберем в виде [6]:

$$U^* = \hat{W}^T \sigma(\hat{V}^T x) + K_v S \quad (9)$$

Корректирующий управляющий сигнал определяется как выходной сигнал второй НС:

$$U_{cor} = BP(\alpha^T x^e) + \varepsilon_c \quad (10)$$

с активационной функцией

$$P(x) = \frac{1 - e^{-2x}}{1 + e^{-2x}} \quad (11)$$

Здесь весовые множители  $V$  и  $\alpha = [\lambda_1 \ \lambda_2]^T$  - веса выходного слоя корректирующей НС и скрытого слоя основной НС соответственно,  $x^e = [e \ \dot{e}]^T$  - входной вектор,  $\varepsilon_c$  - ошибка аппроксимации;  $\|\varepsilon_c\| < \varepsilon_{cN}$  ( $\varepsilon_{cN}$  - неотрицательная постоянная). В работе [7], где была исследована сеть такого вида, было показано, что неизвестные весовые множители могут быть получены в процессе самонастройки путём интегрирования дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{B}} &= F_B \hat{P}(\alpha^T x^e) S \\ \dot{\hat{\alpha}} &= F_\alpha (x^e S \hat{B} \hat{P}' + k_\alpha |S| (\bar{\alpha} - \hat{\alpha})) \end{aligned} \quad (12)$$

где  $F_B = F_B^T > 0, F_\alpha = F_\alpha^T > 0, k_\alpha > 0, \bar{\alpha} = \begin{bmatrix} 1 \\ |e| + \varepsilon \end{bmatrix}^T, 1, \varepsilon > 0$

Таким образом, управляющий сигнал (8) принимает окончательный вид:

$$U = \hat{W}^T \sigma(\hat{V}^T x) + K_v S + \hat{B} P(\hat{\alpha}^T x^e) \quad (13)$$

В [7] было показано, что ошибка  $S(t)$  и её производная стремятся к нулю с течением времени, если весовые множители  $V, W$  основной НС также определяются в процессе самонастройки путём интегрирования дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} \dot{\hat{W}} &= F(\hat{\sigma} S^T - k \|S\| \hat{W}) \\ \dot{\hat{V}} &= G(x S^T \hat{W}^T \hat{\sigma}' - k \|S\| \hat{V}) \end{aligned} \quad (14)$$

для любых параметров  $F, G, k > 0$ . Устойчивость движения системы по Ляпунову в окрестности поверхности скольжения при настройке коэффициентов нейронных сетей в соответствии с уравнениями (12) и (14) показана в работе [6].

### Экспериментальное исследование

В ходе исследования в среде MATLAB была создана модель квадрокоптера согласно уравнениям динамики (1), а также регулятор для управления по углам крена, тангажа и рысканья. Регулятор состоит из НС для аппроксимации основных управляющих сигналов и трех НС для аппроксимации корректирующих сигналов по каждой из осей вращения. Входной вектор управляющей НС, имеющей 7 нейронов в скрытом слое, может быть записан как  $x = [\varphi_d \ \dot{\varphi}_d \ \ddot{\varphi}_d \ e \ \dot{e}]$ . Внешние возмущения в эксперименте задавались как  $d_\varphi, d_\theta, d_\psi = \sin(t) + 3$ ; время моделирования:  $t=20$  с. Параметры моделирования представлены в табл. 1.

Таблица 1. Значения параметров при моделировании

Параметр	Значение	Параметр	Значение
$g, (м/с^2)$	9,81	$k_{fitz}, (Н*с/м)$	6e-4
$m, (кг)$	0,5	$k_{fit\varphi}, k_{fit\theta}, (кг*м^2/рад)$	5,5e-4
$l, (м)$	0,25	$k_{fit\psi}, (кг*м^2/рад)$	6e-4
$k_p, (Н*с^2)$	3e-5	$F$	100
$k_d, (Н*м*с^2)$	3,5e-7	$G$	40
$I_z, (кг*м^2)$	2,5e-5	$k$	1
$I_x, (кг*м^2)$	3,5e-3	$F_B$	10
$I_y, (кг*м^2)$	3,5e-3	$F_\alpha$	4
$I_z, (кг*м^2)$	8e-3	$k_\alpha$	1
$k_{fix}, k_{fity}, (Н*с/м)$	5,5e-4		

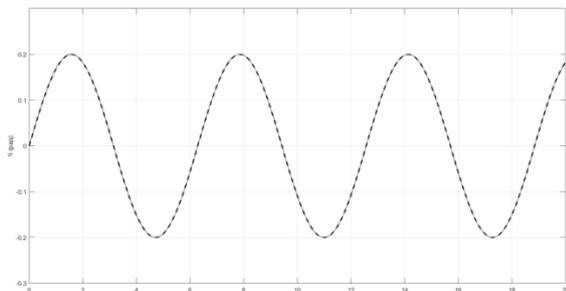


Рисунок 2 – Отработка заданного угла крена  $\varphi_d$ , (штриховая линия), сплошная линия –  $\varphi$ .

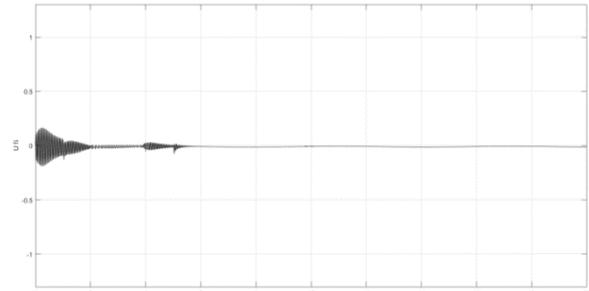


Рисунок 3 – Управляющий сигнал  $U_\varphi$  при отработке угла крена

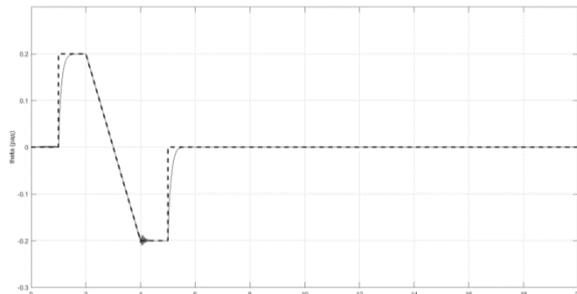


Рисунок 4 – Отработка заданного угла тангажа  $\theta_d$ ,

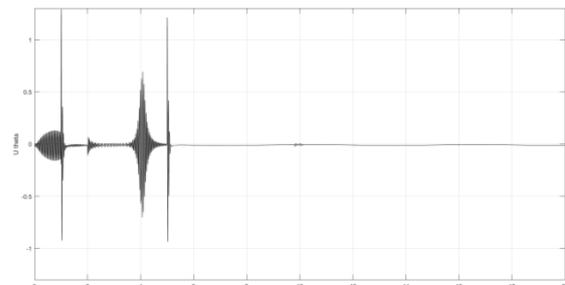


Рисунок 5 – Управляющий сигнал -  $U_\theta$

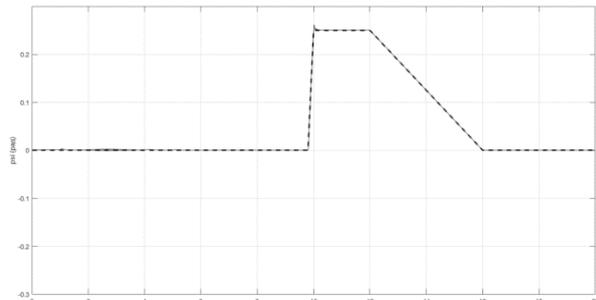


Рисунок 6 – Отработка заданного угла рысканья  $\psi_d$ ,

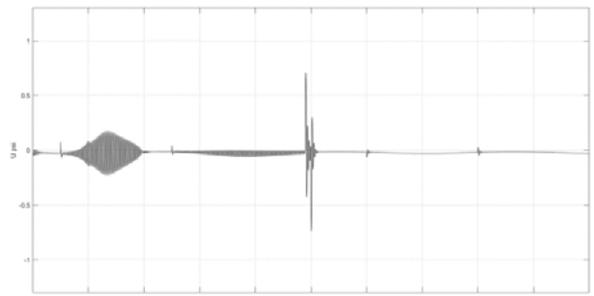


Рисунок 7 – Управляющий сигнал -  $U_\psi$

Из полученных результатов можно заключить, что система управления достаточно быстро настраивается при изменении входного сигнала и обеспечивает устойчивую и высокоточную отработку управляющих сигналов по каждому из каналов управления. Заметим также, что внешние воздействия не оказывают влияния на процесс управления в скользящем режиме. Таким образом, показана эффективность предлагаемого метода управления.

### Заключение

Рассмотрена система управления квадрокоптером в скользящем режиме, основанная на использовании двух НС. Основная НС представляет собой ММО систему, аппроксимирующую управляющий сигнал для движения системы в непосредственной близости от поверхности скольжения. Вспомогательная нейронная сеть аппроксимирует корректирующий управляющий сигнал, необходимый для сглаживания высокочастотных колебаний в окрестности поверхности скольжения. Метод обеспечивает устойчивое движение системы в окрестности поверхности скольжения и не требует априорной информации о параметрах динамической модели управляемого объекта. По результатам моделирования динамической модели квадрокоптера с нейросетевым регулятором и в среде MATLAB, можно сделать вывод о том, что предложенный способ управления обеспечивает устойчивое движение по заданной траектории несмотря на внешние возмущающие воздействия.

1. Bouabdalla, S., Noth A., & Siegwart R. (2004). PID vs LQ control techniques applied to an indoor micro quadrotor. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. (Vol. 3, pp. 2451–2456). Sendai, Japan (at Tohoku University).
2. Naidoo, Y., Stopforth, R., & Bright, G. (2011). Helicopter Modelling and Control. *Int J Adv Robotic Sy*. Vol. 8, No. 4, pp. 139–149. <http://cdn.intechopen.com/>
3. Spurgeon, Sarah K. Sliding Mode Control: a tutorial. (2014). *European Control Conference (ECC 2014)*, 25-27 June 2014, Strasbourg, France. <http://kar.kent.ac.uk/41730/>

4. Aissaoui, A.G., Abid, H., & Abid, M. (2009). Robust Fuzzy Sliding Mode Controller Design for Motor Driver. *Acta Electrotechnica et Informatica*. (Vol. 9, No. 2. pp. 64–71). [http://www.aei.tuke.sk/papers/2009/2/10\\_Aissaoui.pdf](http://www.aei.tuke.sk/papers/2009/2/10_Aissaoui.pdf)
5. Lon-Chen, Hung, & Hung-Yuan, Chung (2004). Hybrid Neural Sliding Mode Controller Design for a Robot Manipulator. Submitted to *The Journal of Grey System Date: Sept 2004*. Vol. 17, No. 2, pp. 183-200, 2005.
6. Jagannathan, S., Yesildirak, A., & Lewis, F. L. (1998). *Neural Network Control of Robot Manipulators and Non-Linear Systems*. London, England: Taylor & Francis, 468 p.
7. Ge, S. S., Hang, C. C., Lee, T. H., & Zhang, T. (2002). *Stable Adaptive Neural Network Control*. Boston, England: Kluwer Academic Publishers, 296 p.

*V.E.Pavlovsky, A.Yu.Shamin*

## THE DYNAMIC MODEL AND OPTIMAL CONTROL OF THE MOTION OF THE ROBOT-YACHT WITH DIFFERENT FORMS OF THE SAIL

*Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS, Moscow,  
Mechanics-mathematical faculty of the Moscow State University of M.V.Lomonosov, Moscow*

### Abstract

This work is devoted to the construction of the theoretical model of motion three-wheeled robot with a sail and a study of the problem of optimal performance. We write the equations of motion and the system of equations. Numerically solved the problem of optimal control in some forms of the sail and different power restrictions.

Keywords: robot-yacht, optimal control, control quickness.

*В.Е.Павловский, А.Ю. Шамин*

## ДИНАМИЧЕСКИ ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РОБОТОМ-БУЕРОМ С РАЗЛИЧНОЙ ФОРМОЙ ПАРУСА

*Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН, Москва  
Механико-математический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва,  
vpavl@mail.ru, Shamin\_AY@mail.ru*

### Аннотация

Работа посвящена построению теоретической модели движения трехколесного робота-буера с парусом и исследованию задачи оптимального быстрогодействия и управления им. Получены уравнения движения. При помощи численного пакета решается задача оптимального управления и анализируется влияние формы паруса при различных ограничениях на развиваемые двигателями моменты сил.

Ключевые слова: робот-буер, оптимальное управление, быстрогодействие.

### 1.1 Введение

Развитие науки и техники привело к возникновению различных двигательных аппаратов и средств передвижения. Современный мир трудно представить себе без автомобилей, мотоциклов, самолетов, кораблей и многих других средств передвижения. Возможность мобильно перемещаться, безусловно, является необходимостью современного человека. В то же время, в последнее время большое внимание уделяется экологии, а так как большинство современных средств передвижения загрязняют окружающую среду, постоянно ведутся работы по модернизации двигателей с целью уменьшения наносимого вреда окружающей среде, а также изучаются экологически чистые источники энергии, в том числе с целью использования их в транспорте.

Одним из таких источников может являться энергия ветра. Человечество давно использует ветер для передвижения на воде: парусные суда уже в Древнем Египте позволяли людям преодолевать значительные расстояния. Применение паруса на суше распространено меньше. Но все же такие транспортные средства есть, и они обладают несомненным плюсом: они не наносят урон окружающей среде. Таким образом, полезно бы было изучить такой тип транспорта подробнее: как управлять им, насколько выгоден с точки зрения энергетических затрат, насколько удобен в эксплуатации, каковы

динамические характеристики, как следствие, насколько целесообразно использование этого вида транспорта в практических целях.

Такую модель парусника на колёсах можно было бы применять в суровых условиях планеты Венера. За счет высокой плотности атмосферы, парусник может использовать энергию ветра для передвижения по поверхности планеты, попутно используя солнечные батареи для питания электроники. Таким образом, можно было бы использовать такой экстремальный фактор как высокая плотность атмосферы для выполнения полезной работы по перемещению аппарата.

Авторами был рассмотрен так называемый робот-буер - трехколесная тележка с закрепленным на ней парусом. Управление роботом осуществляется парусом и передним рулевым колесом. Подобные аппараты представляют собой новый, экологически чистый, вид транспорта и могут представлять интерес для организации специальных перевозок, например, на больших открытых пространствах, где имеется доступ к свободному ветру.

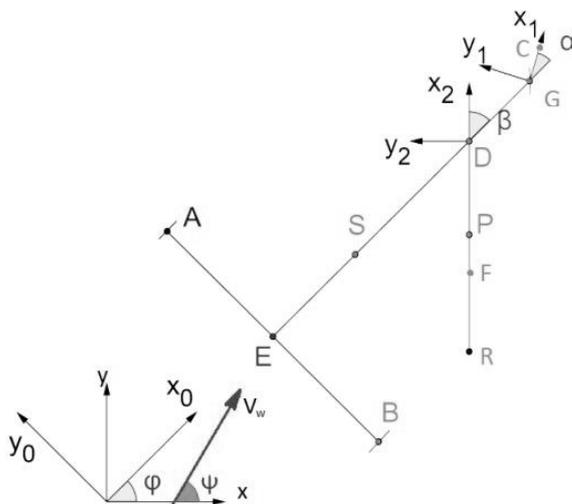


Рисунок 1 – Механическая модель

## 1.2 Модель механической системы

Буер движется по горизонтальной плоскости. Колеса  $A, B, C$  катятся без проскальзывания. Переднее колесо  $C$  вынесено вперед на поворотной вилке  $GC$ . Точка  $E$  является пересечением оси вращения задних колес и продольной оси симметрии буера. Центр масс тележки находится на оси симметрии в точке  $S$ , причем  $ES = s$ . Мачта буера также расположена на оси симметрии и удалена от точки  $E$  на расстояние  $ED = d$ . Парус обозначен  $DFP$ , где  $F$  - центр масс паруса,  $DF = l$ . Расстояния до задних колес  $EA = EB = a$ . Ось вилки  $GC$  расположена на оси симметрии тележки, причем  $EG = c$ . Длина вилки  $GC = n$ ; ее центр масс находится в точке  $U$ , где  $GU = u$ . Радиусы задних колес  $R_k$ , а переднего  $R_c$ .

Движение буера рассматривается в неподвижной системе координат  $Oxy$ . Ведем подвижную систему координат  $Ex_0y_0$ , жестко связанную с корпусом буера. Ее центром будет служить точка  $E$ , ось  $Ex_0$  направим вдоль оси симметрии, а ось  $Ey_0$  перпендикулярно ей. Таким образом, положение этой системы определяется координатами  $(x, y)$  точки  $E$ , а также углом  $\varphi$  между положительными направлениями осей  $Ox$  и  $Ex_0$ . Углы  $\alpha, \beta$  задают повороты соответственно рулевого колеса и паруса относительно корпуса буера. Ведем еще одну подвижную систему координат  $Cx_1y_1$ , связанную с центром масс переднего колеса, причем ось  $Cx_1$  всегда направлена по вилке. В этой системе координат поворот переднего колеса вокруг оси  $Cy_1$  задается углом  $\psi$ , а повороты задних колес  $A$  и  $B$  относительно оси  $Ey_0$  соответственно углам  $\psi_A, \psi_B, \psi_C$ .

Положение буера в неподвижной системе координат задается обобщенными координатами:

$$x, y, \varphi, \psi_A, \psi_B, \psi_C, \alpha, \beta.$$

Так как связи, наложенные на механическую систему, являются неголономными, то для вывода уравнений движения использовались соответствующие методы. Авторы воспользовались уравнениями

движения в лаконичной форме [1]. Замкнутая система уравнений будет состоять из 8 выражений обобщенных скоростей через псевдоскорости, которые будут введены ниже, 8 выражений для обобщенных импульсов и 3 уравнений на псевдоскорости. В качестве псевдоскоростей выберем  $V$  (проекция скорости точки  $E$  на продольную ось буера),  $\Omega$  (угловая скорость  $\Omega = \dot{\alpha}$ ),  $\omega$  (угловая скорость  $\omega = \dot{\beta}$ ).

## 2.1 Модели сил. Обобщенные силы

### 2.1.1 Аэродинамические силы

Для описания аэродинамического воздействия на аппарат используется квазистатическое представление [2], и будем считать, что аэродинамическая сила приложена в центре давления паруса  $F$ .

Искомая аэродинамическая сила раскладывается на 2 составляющие: силу лобового сопротивления  $\vec{S}$  и подъемную силу  $\vec{P}$ . Сила лобового сопротивления  $\vec{S}$  сонаправлена с вектором относительной (вымпельной) скорости ветра  $V_r$ , и ее значение равно  $S = \frac{\rho S}{2} s(\gamma) V_r^2 = \frac{\rho S}{2} s(\gamma) V_r^2$ , где  $S$  - площадь паруса,  $\gamma$  - угол атаки, угол между плоскостью паруса и вектором вымпельной скорости,  $s(\gamma)$  - аэродинамический коэффициент, зависящий от угла атаки.

Подъемная сила  $\vec{P}$  перпендикулярна вымпельной скорости, а ее направление зависит от угла атаки: если  $\gamma > 0$ , то  $\vec{S}$  и  $\vec{P}$  составляют правую пару осей, если  $\gamma < 0$ , то левую. Ее значение равно  $P = \frac{\rho S}{2} p(\gamma) V_r^2$ , здесь  $p(\gamma)$  - аэродинамический коэффициент для подъемной силы. Коэффициент  $s(\gamma)$  неотрицателен, что характеризует сопротивляемость среды, функция  $p(\gamma)$  - нечетна в силу того, что направление подъемной силы изменяется при смене знака угла атаки.

Несмотря на то, что поле скоростей ветра в неподвижной системе координат однородно, поле вымпельных скоростей около паруса таким свойством не обладает, так как каждая точка паруса может иметь разную скорость и по модулю и по направлению. Отсюда следует, что центр давления  $F$  зависит от распределения вымпельных скоростей.

Аэродинамические силы можно далее разложить по осям системы координат, связанной с буером  $E\vec{x}_0\vec{y}_0$  на силу тяги  $\vec{F}_m$  и силу дрейфа  $\vec{F}_d$ .

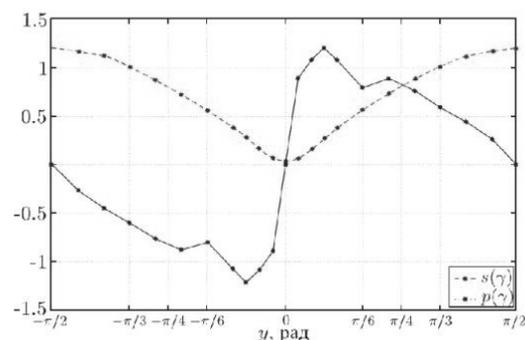
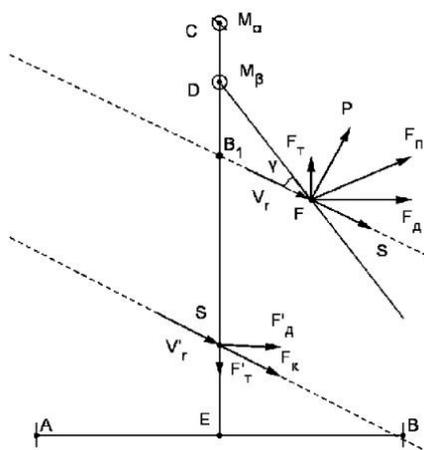


Рисунок 2 – Аэродинамические силы и коэффициенты

Сила тяги:

$$\vec{F}_m = \frac{\rho \lambda l}{2} \int_0^l V_{wr} ((s(\gamma) \vec{V}_{wr} + p(\gamma) [\vec{z}_0 \times \vec{V}_{wr}], \vec{x}_0) d\mu \vec{x}_0 = \frac{\rho \lambda l}{2} \int_0^l V_{wr} ((s(\gamma) (V_\omega \cos(\psi - \varphi) - V - \mu (\frac{V \sin \alpha - \Omega n}{n + c \cos \alpha} + \omega) \sin \beta) - p(\gamma) (V_\omega \sin(\psi - \varphi) - d \frac{V \sin \alpha - \Omega n}{n + c \cos \alpha} + \mu (\frac{V \sin \alpha - \Omega n}{n + c \cos \alpha} + \omega) \cos \beta)) d\mu \vec{x}_0$$

Сила дрейфа:

$$\vec{F}_d = \frac{\rho\lambda l}{2} \int_0^l V_{wr} ((s(\gamma)\vec{V}_{wr} + p(\gamma)[\vec{z}_0 \times \vec{V}_{wr}], \vec{y}_0) d\mu \vec{y}_0 = \frac{\rho\lambda l}{2} \int_0^l V_{wr} ((s(\gamma)(V_\omega \sin(\psi - \varphi) - d \frac{V \sin \alpha - \Omega n}{n + c \cos \alpha} +$$

$$+ \mu(\frac{V \sin \alpha - \Omega n}{n + c \cos \alpha} + \omega) \cos \beta) + p(\gamma)(V_\omega \cos(\psi - \varphi) - V - \mu(\frac{V \sin \alpha - \Omega n}{n + c \cos \alpha} + \omega) \sin \beta)) d\mu \vec{y}_0$$

где угол атаки есть угол между вымпельной скоростью и парусом.

Чтобы найти центр давления, найдем момент аэродинамических сил:

$$\vec{M}_d = \int_0^l -\mu[(\vec{x}_0 \cos \beta + \vec{y}_0 \sin \beta) \times \vec{F}(\mu)] d\mu = \frac{\rho\lambda l}{2} \int_0^l \mu V_{wr} (V_\omega \cos(\psi - \varphi) - V - \mu(\frac{V \sin \alpha - \Omega n}{n + c \cos \alpha} + \omega) \sin \beta) \cdot$$

$$\cdot (s(\gamma) \sin \beta - p(\gamma) \cos \beta) - (V_\omega \sin(\psi - \varphi) - d \frac{V \sin \alpha - \Omega n}{n + c \cos \alpha} + \mu(\frac{V \sin \alpha - \Omega n}{n + c \cos \alpha} + \omega) \cos \beta) \cdot$$

$$\cdot (s(\gamma) \cos \beta - p(\gamma) \sin \beta) d\mu \vec{z}_0$$

Тогда расстояние центра давления от центра мачты будет:  $f = \frac{\|\vec{M}_D\|}{\|\vec{F}_m\| \sin \beta - \|\vec{F}_D\| \cos \beta} f =$

$$\frac{\|\vec{M}_D\|}{\|\vec{F}_m\| \sin \beta - \|\vec{F}_D\| \cos \beta}$$

### 2.1.2 Обобщенные силы

Помимо аэродинамических сил, в системе действуют управляющие моменты  $\vec{M}_\alpha$  и  $\vec{M}_\beta$ ,  $\vec{M}_\beta$ , которые приложены соответственно к вилке переднего колеса и парусу в точках G и D. При таком определении сил, действующих в системе, обобщенные силы выражаются следующим образом:

$$Q_V = F_m + F'_m + \frac{\sin \alpha}{n + c \cos \alpha} (F_d d + F'_d s) + \frac{f \sin \alpha}{n + c \cos \alpha} (F_m \sin \beta - F_d \cos \beta),$$

$$Q_\Omega = -\frac{n}{n + c \cos \alpha} (F_d d + F'_d s) - \frac{fn}{n + c \cos \alpha} (F_m \sin \beta - F_d \cos \beta) + M_\alpha,$$

$$Q_\omega = f (F_m \sin \beta - F_d \cos \beta) + M_\beta$$

Так получаем замкнутую систему уравнений движения робота-буера.

### 3 Задача оптимального быстродействия

Решается следующая задача оптимального управления:

$$J = \int_0^T dt = T \rightarrow \min$$

$$\dot{V} = f_1(V, \Omega, \omega, x, y, \alpha, \beta, M_\alpha, M_\beta)$$

$$\dot{\Omega} = f_2(V, \Omega, \omega, x, y, \alpha, \beta, M_\alpha, M_\beta)$$

$$\dot{\omega} = f_3(V, \Omega, \omega, x, y, \alpha, \beta, M_\alpha, M_\beta)$$

$$\dot{x} = V \cos \varphi$$

$$\dot{y} = V \sin \varphi$$

$$\dot{\varphi} = \frac{V \sin \varphi - \Omega n}{n + \cos \alpha}$$

$$\dot{\alpha} = \Omega$$

$$\dot{\beta} = \omega$$

$$\dot{\psi}_A = \frac{V(n + c \cos \alpha - a \sin \alpha) + an\Omega}{R_k(n + c \cos \alpha)}$$

$$\dot{\psi}_B = \frac{V(n + c \cos \alpha + a \sin \alpha) - an\Omega}{R_k(n + c \cos \alpha)}$$

$$\dot{\psi}_C = \frac{V(c + n \cos \alpha) - cn\Omega \sin \alpha}{R_c(n + c \cos \alpha)}$$

при следующих краевых условиях:

$$V(0) = \Omega(0) = \omega(0) = y(0) = \alpha(0) = \beta(0) = \psi_A(0) = \psi_B(0) = \psi_C = 0, x(0) = -r_0$$

$$x(T) = 0, y(T) = 0, \|M_\alpha\| < M_1, \|M_\beta\| < M_2$$

Управление осуществляется моментами  $M_\alpha, M_\beta, M_{\alpha'}, M_{\beta'}$ . Для численного решения задачи оптимального управления использовался численный пакет TOMLAB, предназначенный для решения задач по оптимизации.

### 3.1 Форма паруса. Влияние ограничений на моменты сил в двигателях

Для анализа влияния формы паруса на характеристики движения робота выбираются 3 формы: треугольная, трапецевидная и прямоугольный отношению одной из вертикальных сторон к другой. При  $\lambda = 0$  парус треугольный, при  $\lambda = 1$  прямоугольный, а когда  $\lambda \in (0;1)$  парус имеет форму трапеции.

Для начала было исследовано влияние формы паруса при существенных ограничениях на моменты в двигателях. Оказалось, что в таком случае влияние формы паруса существенно влияет на траекторию и скорость движения. В результате проведения численных экспериментов выяснилось, что треугольная форма паруса обеспечивает наименьшее значение функционала времени в задаче оптимального управления по сравнению с прямоугольной и трапецевидными формами паруса. График зависимости функционала времени от коэффициента  $\lambda$  приведен ниже на рисунке:

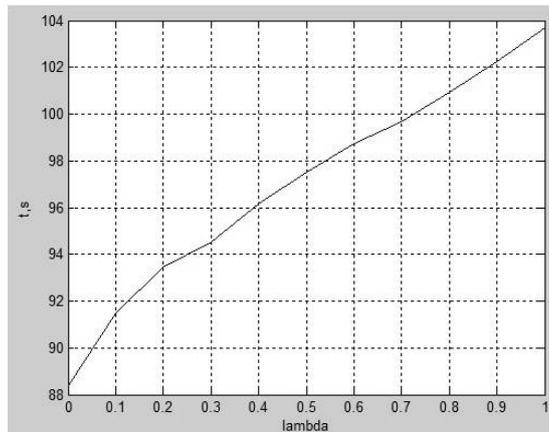


Рисунок 3 – Зависимость времени. Сильные ограничения

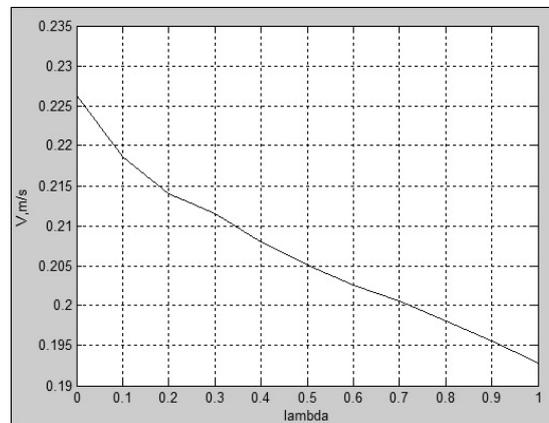


Рисунок 4 – Зависимость максимальной скорости от формы. Сильные ограничения

Также было получено, что максимальная скорость в процессе движения достигается при использовании треугольного паруса, что можно объяснить различными установившимися углами атаки паруса на этапе разгона буера. Видно, что для прямоугольного паруса угол атаки меньше, что может объяснять меньший темп набора скорости.

Сильные ограничения на моменты в двигателях приводят к тому, что буер вынужден снижать угол атаки с целью минимизировать момент внешнего воздействия на парус, что приводит к уменьшению средней скорости буера.

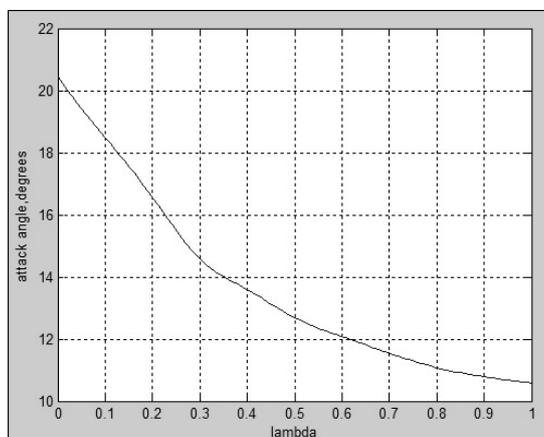


Рисунок 5 – Средний угол атаки. Сильные ограничения

При существенном увеличении диапазона значений, которые может принимать момент силы в двигателе, возникает ситуация, когда двигатель буера перестает минимизировать момент внешнего воздействия на парус, так как развиваемый двигателем момент достаточен для поддержания паруса в оптимальном положении.

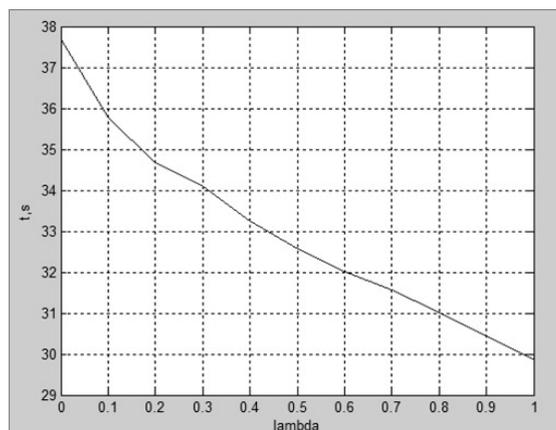


Рисунок 6 – Зависимость времени движения. Слабые ограничения

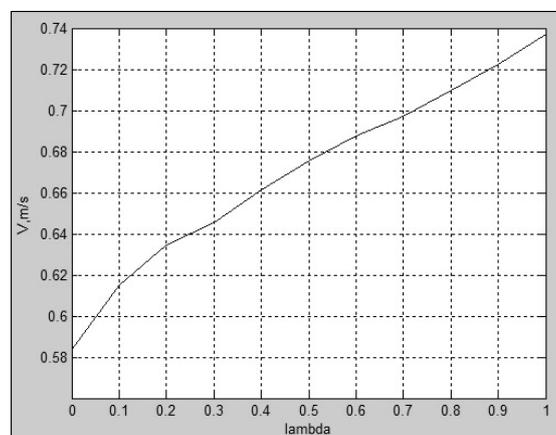


Рисунок 7 – Зависимость максимальной скорости от формы. Слабые ограничения

В результате наблюдается обратная картина: прямоугольная форма паруса позволяет развивать большие скорости по сравнению с прямоугольной. Вероятно, это вызвано тем, что суммарная аэродинамическая сила в таком случае больше, а парус в силу слабых ограничений способен развить необходимые для этого моменты сил.

Таким образом, оптимальная стратегия управлением роботом-буером зависит от ограничений, накладываемых на моменты сил паруса. Это обстоятельство влияет на возможность двигателя развивать необходимые моменты, что в свою очередь приводит к тому, что оптимальное управление в случае с различной формой паруса качественно отличается.

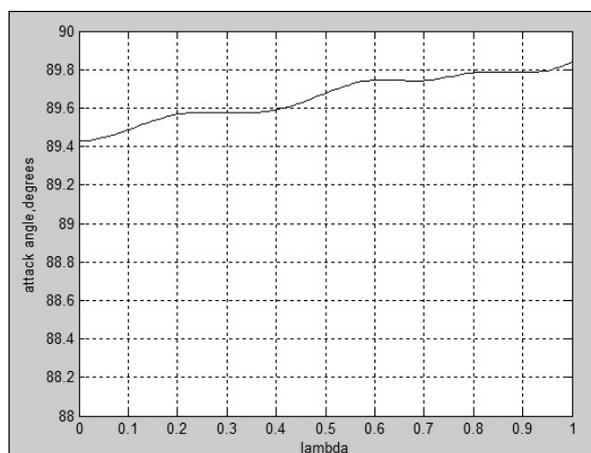


Рисунок 8 – Средний угол атаки. Слабые ограничения

#### 4 Заключение

В данной работе разработана теоретико-механическая модель роботизированного буера с выносом переднего колеса. Описана модель аэродинамического воздействия на робота со стороны внешней среды-ветра. В рамках модели были проведены численные эксперименты с различной формой паруса и разными ограничениями на двигатели. В результате экспериментов выявлены особенности оптимальных управлений и кинематических характеристик оптимального движения.

1. Татаринов Я.В. Уравнения классической механики в новой форме // Вестник МГУ. Сер. Матем. Механ., 2003, #3, с.67-76.
2. Локшин Б.Я., Привалов В.А., Самсонов В.А. Введение в задачу о движении точки и тела в сопротивляющейся среде. М.: МГУ, 1992. 75 с.
3. Жуковский Н.Е. Теоретические основы воздухоплавания: Ч.2// Полное собрание сочинений: Лекции: Вып.2. А.П.Котельников, В.С. Пышнов, В.А.Семенов (ред.); ЦАГИ им. Н.Е.Жуковского. М.-Л.:Оборонгиз, 1939. 206 с.
4. Леонтьев Е.П. Школа Яхтенного капитана. М.:Физкультура и спорт, 1983. 245 с.
5. Павловский В.Е., Глазкова Л.В., Панченко А.В. Динамика, моделирование и управление колесным робобуером // Нелинейная динамика, 2012 Т.8, №4, с.679-687.

*Y. A. Zhukov, E. B. Korotkov, N. S. Slobodzyan*

### **CONTROL OF HIGH-PRECISION SPACE APPLICATION SYSTEM OF POSITIONING AND ORIENTATION ON THE BASIS OF HEXAPODE WITH "THE SPATIAL SENSOR OF POSITION"<sup>XIII</sup>**

*BALTIC STATE TECHNICAL UNIVERSITY «VOENMEH» named after D.F. Ustinov,  
St. Petersburg, zhkv@rambler.ru*

#### Abstract

The problems of control of space execution high-precision positioning and orientation system based on hexapod with the use of "spatial position sensor" (based on solving a direct kinematics problem) are considered. A simulation model of the hexapod control system has been developed. Two versions of hexapod control systems are considered. The results of modeling are presented. The implemented hexapod control unit is described. The evaluation of the feasibility of control algorithms in a system based on a radiation-resistant

microcontroller is presented. Based on the results of the research, recommendations are given on the application of the proposed algorithms in the hexapod management problems.

Keywords: Hexapod, Stewart platform, control system, linear drive, measuring system.

*Ю.А. Жуков, Е.Б. Коротков, Н.С. Слободзян*

## УПРАВЛЕНИЕ ВЫСОКОТОЧНОЙ СИСТЕМОЙ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ И ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА БАЗЕ ГЕКСАПОДА С «ПРОСТРАНСТВЕННЫМ ДАТЧИКОМ ПОЛОЖЕНИЯ»<sup>12</sup>

*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (БГТУ), Санкт-Петербург, zhkv@rambler.ru*

### Аннотация

В работе рассмотрены задачи управления высокоточной платформой позиционирования и ориентации космического исполнения на базе гексапода с применением «пространственного датчика положения», основанного на решении прямой задачи кинематики. Разработана имитационная модель системы управления гексаподом. Рассмотрены два варианта систем управления гексаподом. Представлены результаты моделирования. Описан реализованный блок управления гексаподом. Представлена оценка реализуемости алгоритмов управления в системе на базе отечественного радиационно-стойкого микроконтроллера. По результатам исследования даны рекомендации о применении предложенных алгоритмов в задачах управления гексаподом.

Ключевые слова: Гексапод, платформа Стюарта, система управления, линейный привод, измерительная система.

### Введение

В БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова и АО «ИСС» им. академика М.Ф. Решетнева ведется совместная актуальная работа по созданию ряда многостепенных механизмов с параллельной кинематикой для обеспечения точного позиционирования и ориентации бортовых приборов и устройств космического назначения.

На сегодняшний день во многих областях науки и техники активно создаются сверхточные системы позиционирования и ориентации на базе механизмов с параллельной структурой, большинство из которых является модификацией платформы Гафа-Стюарта [1,2]. Подобные механизмы обладают рядом важных достоинств, таких как высокая жесткость, точность, надежность, компактность. Эти свойства весьма важны для разработки систем наведения элементов антенн и других приборов космического назначения.

Объектом исследования является цифровая система управления механизмом с параллельной кинематикой («гексапод») на основе шести линейных приводов на базе шаговых двигателей, эскиз которого показан на рисунке 1.

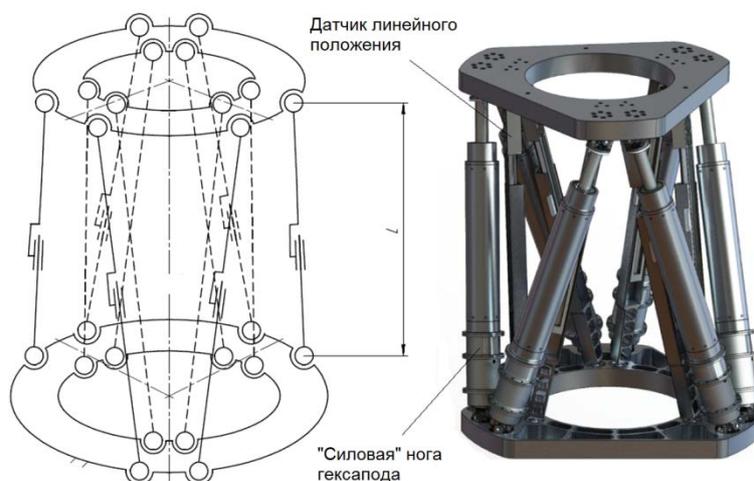


Рисунок 1 – Гексапод с системой внешних датчиков линейного положения

Для достижения высокой точности управления гексаподом в экстремальных условиях эксплуатации предлагается подход на основе применения системы внешних линейных датчиков положения, как показано на рисунке 1, по данным которых формируется сигнал о положении и ориентации платформы, таким образом создается «пространственный датчик положения». Необходимость применения подобных датчиков и возможные конструкции описаны в работе [3], в настоящем исследовании рассмотрим некоторые аспекты построения системы управления гексаподом. Целью настоящего исследования является оценка точности алгоритмов управления гексаподом на основе данных внешней измерительной системы, а также оценка реализуемости алгоритмов на основе современной отечественной элементной базы.

### Кинематика гексапода

Управление гексаподом основано на решении задач кинематики гексапода. Положение центра подвижной платформы относительно неподвижной системы координат будем определять с помощью декартовых координат  $X, Y, Z$ . Для определения ориентации платформы будем использовать углы Эйлера  $\varphi, \theta, \psi$ . Таким образом, положение и угловая ориентация платформы задаются вектором  $q = [X, Y, Z, \varphi, \theta, \psi]^T$ .

*Обратная задача кинематики* [5] заключается в нахождении длин ног  $l_i$  ( $i=1,2,..,6$ ) для заданного вектора  $q$  — положения и ориентации. Алгоритм решения обратной задачи относительно прост и основан на вычислении расстояния между центрами шарниров основания и платформы, определяемого из соотношения:

$$l_i = \|P_{ai} - P_{bi}\|, \quad (1)$$

где  $P_{ai} = [x_{ai}, y_{ai}, z_{ai}, 1]^T$  и  $P_{bi} = [x_{bi}, y_{bi}, z_{bi}, 1]^T$  — расширенные векторы положений центров шарниров  $A$  и  $B$   $i$ -ой ноги.

Если известны координаты шарниров платформы и основания относительно центров соответствующих систем координат, то по заданным положению и ориентации платформы, применяя преобразование в однородных координатах, вычисляются абсолютные координаты

$$P_{bi} = T \cdot P_{bi}^i, T = \begin{vmatrix} R & P \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad (2)$$

где  $T$  — матрица преобразования в однородных координатах,  $P = [X, Y, Z]^T$  — вектор, задающий положение подвижной системы координат (платформы),  $P_{bi}^i$  — положение  $i$ -ого шарнира относительно подвижной системы координат,  $R$  — матрица поворота, определяемая выражением

$$R = \begin{vmatrix} \cos\theta\cos\psi - \sin\varphi\sin\theta\sin\psi & -\cos\varphi\sin\psi & \cos\psi\sin\theta + \cos\theta\sin\varphi\sin\psi \\ \sin\psi\cos\theta + \cos\psi\sin\theta\sin\varphi & \cos\varphi\cos\psi & \sin\theta\sin\psi - \cos\theta\sin\varphi\cos\psi \\ -\cos\varphi\sin\theta & \sin\varphi & \cos\varphi\cos\theta \end{vmatrix}. \quad (3)$$

*Прямая задача кинематики* [5] состоит в оценке вектора  $q$  — положения и ориентации гексапода, соответствующего заданным длинам ног  $l_r$ . Как показано в [5], прямая задача кинематики решается итерационными методами. Наиболее эффективным из которых является метод Ньютона-Рафсона на основе задания ориентации подвижной платформы углами Эйлера, в соответствии с которым оценка вектора  $q$  находится из выражения

$$\tilde{q}_k = \tilde{q}_{k-1} - J^{-1}(\tilde{q}_{k-1}) \times (l(\tilde{q}_{k-1}) - l_r), \quad (4)$$

где  $\tilde{q}_k$  — оценка на текущем шаге итерации,  $\tilde{q}_{k-1}$  — оценка на предыдущем шаге,  $l(\tilde{q}_{k-1})$  — вектор длин ног (решение обратной задачи кинематики для  $\tilde{q}_{k-1}$ ),  $l_r$  — вектор заданных длин ног,  $J^{-1}(\tilde{q}_{k-1})$  — обратная матрица Якоби [5].

### Моделирование гексапода с «пространственным датчиком положения»

Отметим, что в настоящей работе исследуются алгоритмы позиционного управления гексаподом, что соответствует задачам, поставленным на проектирование. В такой постановке задача управления гексаподом решается несколькими методами, позволяя применять простые регуляторы.

При моделировании гексапода с пространственным датчиком положения оценим следующие варианты управления гексаподом:

1. «упрощенный» — формирование сигналов управления линейными приводами на основе обратной связи по ошибке управления длинами датчиков линейного положения («измерительных ног»); силы управления формируются на основе пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) закона.

Для оценки ошибок позиционирования и ориентации гексапода в функции от ошибок воспроизведения (измерения) длин ног измерительной подсистемы в пакете математического моделирования *SimMechanics* системы *Matlab Simulink* создана модель системы управления гексаподом, показанная на рисунке 2. Моделируется управление гексаподом в условиях нулевой гравитации. Система управления гексаподом формирует усилия в ногах «силовой» системы на основе ПИД-регулятора от ошибки управления длинами ног, т.е. разности эталонных длин «измерительных» ног (*Leg\_ref*) и сигнала обратной связи модели динамики гексапода. Эталонная длина «измерительной» ноги вычисляется по заданному желаемому положению платформы на основе решения обратной задачи кинематики (1).

Модель позволяет вычислить статические ошибки управления длиной ног (*Legs error*) и ошибки позиционирования — ориентации платформы при наличии аддитивной ошибки измерения длины ног в канале обратной связи *delta\_leg*. Модель динамики гексапода «*Hexapod*» собрана в пакете моделирования *SimMechanics*, состоит из следующих элементов: *Base* — основание, *Plate* — платформа, *ForceLegs (Leg1-Leg6)* — модели динамики «силовых» ног гексапода, *Measurer system (Leg7-Leg12)* — модели динамики «измерительных» ног гексапода, *Machine Environment* — общие параметры окружения системы моделирования (заданы нулевое ускорение свободного падения и точность сборки модели механики), *Ground* — основание абсолютной системы отсчета, *Weld* — «сварка» основания с абсолютной системой координат, *Body Sensor* — датчик абсолютно положения платформы.

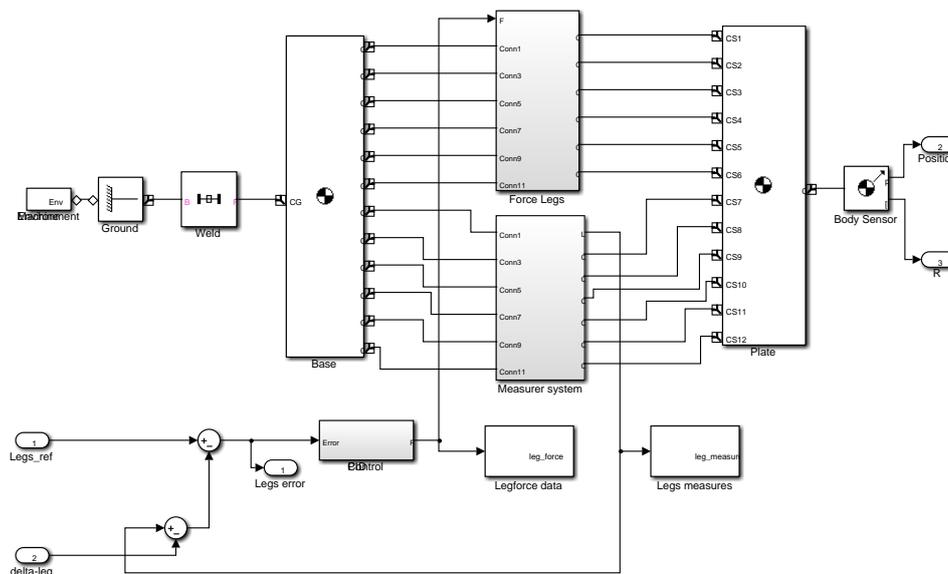


Рисунок 2 – Модель «Hexapod» механики силовой и измерительной подсистем

Модель ноги гексапода, показанная на рисунке 3, состоит из двух тел: *Base cylinder* — цилиндрическое твердое тело, соединяющееся с основанием двухосным шарниром, *Plate cylinder* — цилиндрическое тело, соединяющееся с платформой двухосным шарниром, тела между собой имеют две степени свободы: поступательную и вращательную. На вход модели подается сила  $F$ , обеспечивающая поступательное относительное движение тел и порт системы координат шарнира основания, с выхода регистрируется длина ноги гексапода  $L$  и порт системы координат шарнира платформы.

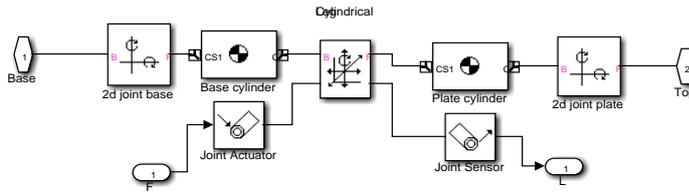


Рисунок 3 — Модель ноги гексапода

Разработанную модель будем использовать для оценки установившейся ошибки управления гексаподом с системами силовых и измерительных ног. Числовые значения кинематических параметров гексапода будут зависеть от конструктивных параметров гексапода, показанных на рисунке 4, и параметра  $h_0$  как нулевой высоты гексапода:

$R_b, R_p$  — радиусы делительных окружностей основания и платформы соответственно, на которых размещены шарниры;

$C_b, C_p$  — расстояние между смежными парами (1-2, 3-4, 5-6) шарниров основания и парами (2-3, 4-5, 6-1) шарниров платформы соответственно.

Длины ног в «нулевом» положении определим, как  $L_0$  — нулевые длины ног. Введем номера ног, как показано на рисунке 5.

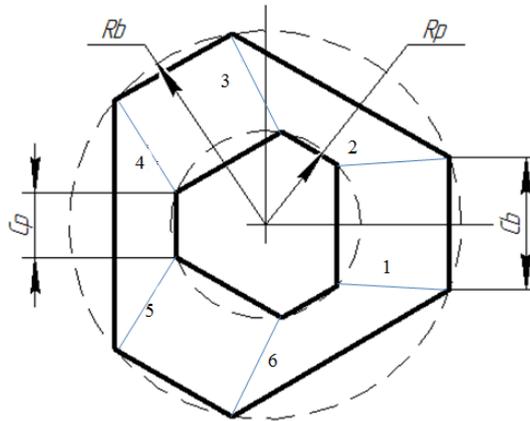


Рисунок 5 – Геометрические параметры платформы и основания гексапода

Проведено моделирование первого варианта управления гексаподом со следующими параметрами, рассчитанными в ходе проектирования конструкции гексапода:

- для силовой системы:  $h_0 = 0,35\text{ м}$ ,  $R_b = 0,175\text{ м}$ ,  $R_p = 0,15\text{ м}$ ,  $C_b = 0,045\text{ м}$ ,  $C_p = 0,045\text{ м}$ ;

- для измерительной системы:  $h_0 = 0,35\text{ м}$ ,  $R_b = 0,1225\text{ м}$ ,  $R_p = 0,095\text{ м}$ ,  $C_b = 0,035\text{ м}$ ,  $C_p = 0,035\text{ м}$ .

На вход системы управления подавались задающие воздействия  $Legs_{ref}$  — длины ног измерительной системы, полученные решением обратной задачи кинематики (1) для желаемой кинематической конфигурации:

$$\mathbf{q}_r = [X_r, Y_r, Z_r, \varphi_r, \theta_r, \psi_r]^T = [-0,1\text{ м}, -0,1\text{ м}, 0,375\text{ м}, -7^\circ, 7^\circ, -7^\circ]^T$$

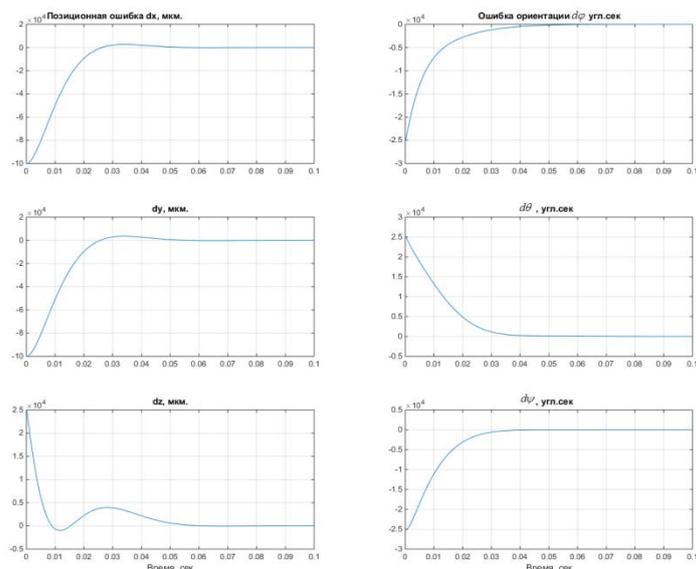


Рисунок 6 – Ошибки позиционного управления гексаподом

На рисунке 6 показаны графики кинематических ошибок позиционного управления гексаподом при нулевых ошибках в каналах измерения длин ног.

При этом значения ошибок в установившемся режиме соответствуют погрешности метода численного интегрирования системы дифференциальных уравнений:

$$\Delta X = 1,21 \cdot 10^{-8} \text{ м}, \Delta Y = 1,26 \cdot 10^{-8} \text{ м}, \Delta Z = 4,83 \cdot 10^{-8} \text{ м},$$

$$\Delta \varphi = 1,35 \cdot 10^{-6} \text{ угл.сек.}, \Delta \theta = 1,26 \cdot 10^{-5} \text{ угл.сек.}, \Delta \psi = 7,77 \cdot 10^{-6} \text{ угл.сек.}$$

Как видно из результатов моделирования, при точном определении конструктивных параметров гексапода и отсутствии ошибок в каналах обратной связи достижима высокая точность позиционного управления гексаподом.

Отметим, что успех синтеза и относительная простота закона регулирования связаны с близким расположением одноименных шарниров «силовых» и «измерительных» ног. При удаленном положении применение первого подхода может привести к не вполне управляемым состояниям, поэтому предлагается в процессе управления использовать решение прямой задачи кинематики.

2. Подход к управлению гексаподом на основе прямой задачи кинематики (6) реализуется по следующей схеме: формирование сигналов управления длинами ног осуществляется на основе ошибок управления длинами силовых ног (разницы между желаемыми и рассчитанными длинами ног). Расчет длин силовых ног осуществляется на основе сигнала от датчика пространственного положения, т.е. путем решения прямой задачи кинематики гексапода. Силы управления также формируются на основе пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) закона по ошибке регулирования. На рисунке 6 показана схема управления гексаподом на основе ошибки управления системой силовых ног.

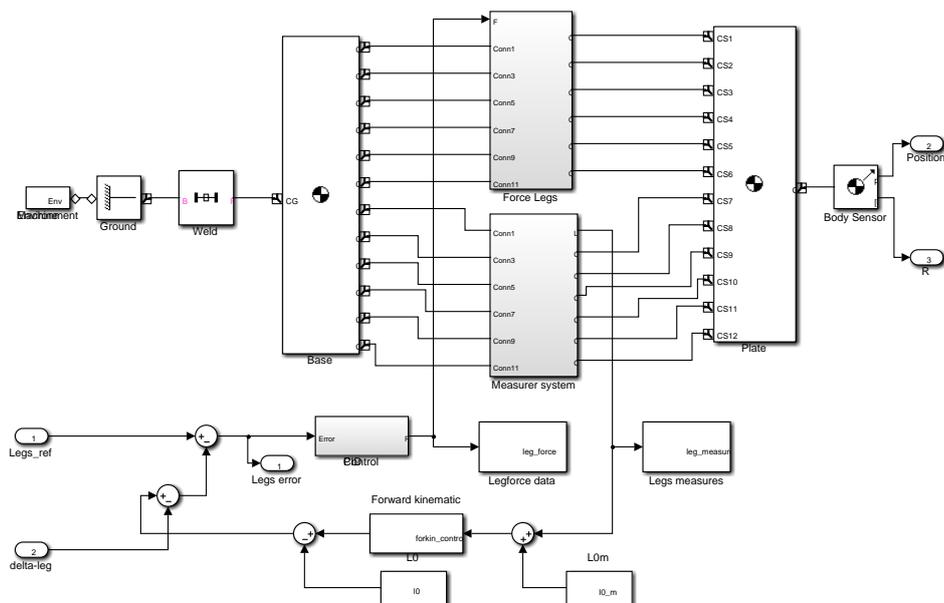


Рисунок 6 – Схема управления гексаподом с вычислением ошибки системы силовых ног на базе «прямой задачи кинематики»

На вход системы подается сигнал  $Leg\_ref$  — задающие сигналы, полученные решением обратной задачи кинематики для системы силовых ног гексапода. Ошибка управления вычисляется на основе длин ног, полученных в системе цифрового управления ( $forkin\_control$ ), в которой с интервалом дискретизации  $T_d = 0,03$  сек на основании длин ног измерительной системы решается прямая задача кинематики (6), в результате чего определяются текущие положение и ориентация платформы, по их значениям вычисляются текущие длины ног силовой системы на основе решения обратной задачи кинематики.

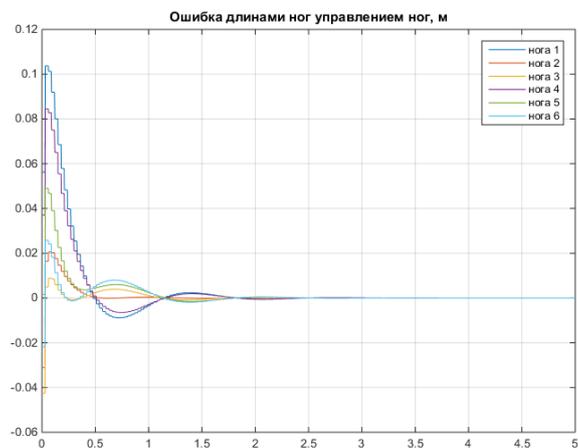


Рисунок 7 – Ошибка управления системами силовых ног

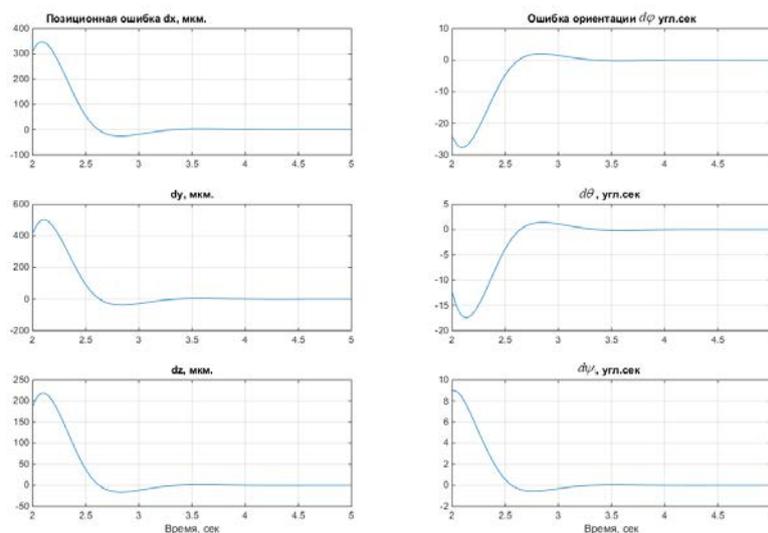


Рисунок 8 – Ошибка позиционного управления гексаподом с датчиком пространственного положения

Изображенные на рисунках 7 и 8 графики подтверждают возможность применения системы измерительных ног для управления гексаподом с достижением целевой точности позиционного управления. Отметим, что период дискретизации цифрового регулятора в ходе проектирования цифровой системы управления гексаподом на основе отечественного радиационно-стойкого RISC-микроконтроллера с процессорным ядром ARM Cortex-M4F 1986BE8T.

#### **Блок управления гексаподом (БУГ) и оценка реализуемости алгоритмов управления**

В настоящее время в научно-исследовательской лаборатории «Робототехнические и мехатронные системы» БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова реализован блок управления гексаподом (БУГ), функциональная схема которого показана на рисунке 9-а). Блок является аппаратной частью (электронный блок) системы управления гексаподом и состоит из двух каналов: основного и резервного. В состав каждого из каналов БУГ входят следующие модули и элементы, электрически объединяемые жгутом БУГ и кросс-платой: преобразователь сигналов датчиков системы измерения положения платформы (СИПП); преобразователь сигналов датчиков углового положения (ПСДУП); контроллер; усилитель; вторичный источник питания; элементы системы обеспечения теплового режима (СОТР).

В экспериментальных образцах системы управления гексаподом предусматривается определение положения платформы с помощью учета информации:

- от датчиков системы измерения положения платформы («пространственного датчика»);
- от датчиков углового положения вала электродвигателя линейного привода;
- датчиков температуры, распределенных по линейному приводу и платформам гексапода (путем пересчета определяется температурные деформации конструкции).

К элементам СОТР относятся: элемент Пельтье; датчик температуры корпуса БУГ.

Элементы СОТР подключаются физически к контроллеру преобразователя сигналов датчиков системы измерения положения платформы (СИПП) и терморегулирование осуществляется с его помощью.

Все сигналы, предназначенные для внешней коммутации, выводятся на разъемы, устанавливаемые в корпусе БУГ.

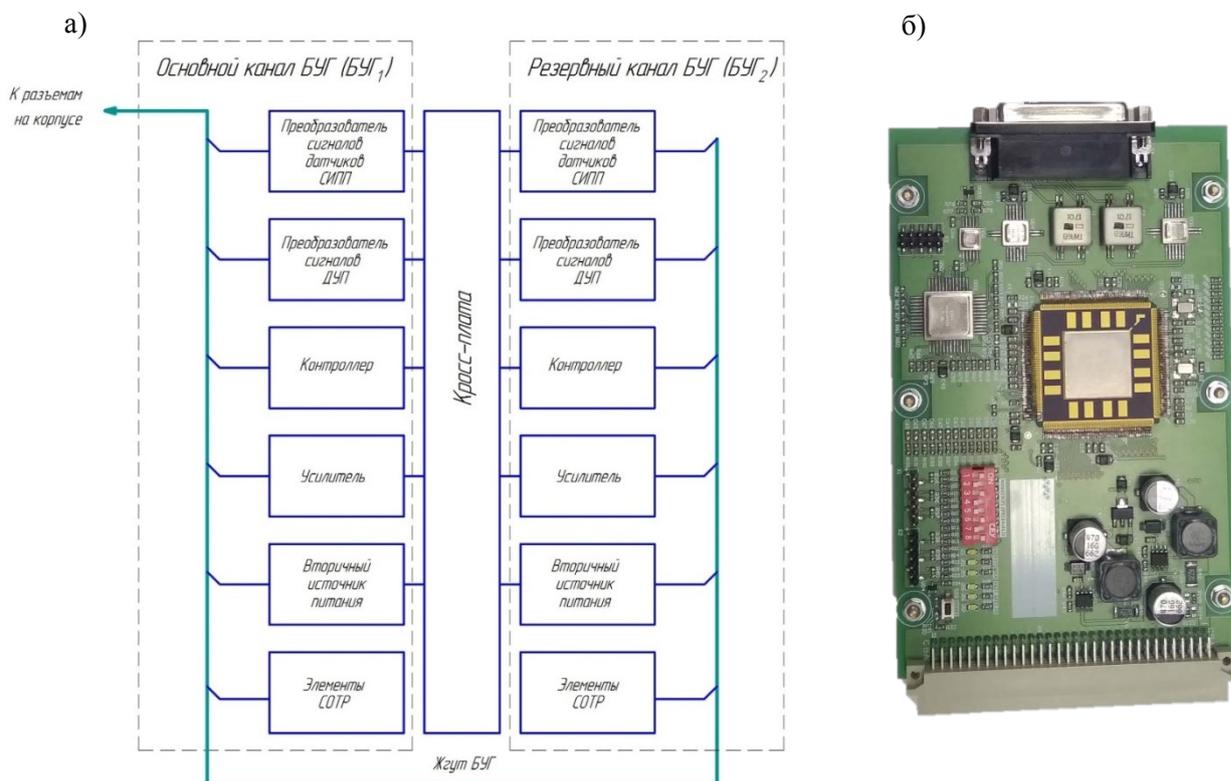


Рисунок 9 – Элементы системы управления гексаподом: а) — функциональная схема блока управления гексаподом, б) — контроллер управления линейными приводами

Основным компонентом модуля контроллера является 32-разрядный радиационно-стойкий RISC-микроконтроллер на базе процессорного ядра ARM Cortex-M4F K1986BE8T производства АО «ПКК Миландр» [6]. Микроконтроллер работает на тактовой частоте до 100 МГц. Содержит 128 Кбайт однократно программируемой ПЗУ программ с контролем ECC (SEC-DED) и 32 Кбайт ОЗУ ECC (SEC-DED).

Разработан C и C++ код решения задач кинематики гексапода (1) и (6) для системы управления гексаподом, а также алгоритмы управления шаговыми электроприводами. Разработка выполнена в среде *Keil μVision 5*. Для сборки программ микроконтроллера применен компилятор *ARM C/C++ Compiler (armcc)*. Результаты тестирования представлены для компиляции без использования оптимизации (уровень *OO*).

Проведено сравнение ресурсов, необходимых для реализации задач кинематики для представления чисел с плавающей точкой одинарной точности *float*. Результаты тестирования сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Результаты тестирования задач кинематики

Задача кинематики	Время расчета, мс	Погрешность решения, %	Объем программного кода, байт	Объем памяти данных, байт
1. Обратная задача кинематики	0,67	$6 \cdot 10^{-7}$	18668	27716
2. Прямая задача кинематики (10 итераций)	27,4	$8,6 \cdot 10^{-5}$	25160	34040

### Выводы

Разработаны имитационные модели систем управления гексаподом. Оценка управления гексаподом с «пространственным датчиком положения» показала, что при построении гексапода на базе системы силовых и измерительных ног реализуется простое управление системой силовых ног по ошибке системы измерительных ног, что объясняется относительно близким и «подобным» расположением осей с «одноименными» шарнирами силовой и измерительной систем. Стоит отметить, что размещение системы измерительных ног внутри системы силовых ног уменьшает общий

возможный рабочий диапазон позиционирования гексапода. Необходимость расширения рабочего диапазона повлечет изменение положения осей измерительной системы, а, значит, и изменения положения «одноименных» осей. Изучение влияния способа размещения измерительной системы на реализуемость «упрощенного» варианта управления является перспективной темой исследования.

Моделирование показало успешную возможность управления системой силовых ног на основе данных системы измерительных ног с решением в контуре обратной связи прямой задачи кинематики, что значительно усложняет математический аппарат системы управления, но позволяет применять для управления данные разнообразных вариантов размещения измерительной системы ног.

Полученные оценки (см. табл. 1) показывают, что отечественный радиационно-стойкий микроконтроллер ARM-архитектуры 1986BE8T производства АО «ПКК Миландр» подходит для организации цифрового управления системой приводов гексапода космического назначения в реальном времени. На его основе создан макет блока управления гексаподом. Создано и реализовано алгоритмическое и программное обеспечение для блока управления.

В будущем планируется развитие алгоритмического и программного обеспечения системы управления гексаподом в направлении реализации задач планирования траекторий, построения комплексной системы управления линейными шаговыми приводами и позиционированием и ориентацией гексапода, создания адаптивной системы управления для работы в условиях открытого космоса.

1. Коротков Е. Б., Матвеев С. А., Яковенко Н. Г. Пути повышения качественных показателей системы управления механизмом с параллельной структурой (гексапод, трипод) на базе российских и мировых доступных электронных компонентов // Вопросы радиоэлектроники. 2016. № 8. С. 85—91.
2. Stewart D. A platform with six degrees of freedom. Proceedings of the Institution of mechanical engineers, 1965, vol. 180, part 1, no. 15, pp. 371—385.
3. Горбунов А. В., Коротков Е. Б., Слободзян Н. С. Высокоточная система наведения и ориентации космических бортовых приборов на базе гексапода с пространственным датчиком положения // Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 7. С. 42-48.
4. Жуков Ю. А., Коротков Е. Б., Слободзян Н.С. Система управления механизмом с параллельной кинематикой для перемещения бортовых приборов КЛА на базе современного отечественного радиационно-стойкого микроконтроллера с процессорным ядром Cortex-M4F // Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 7. С. 48-54.
5. Гавриленко В. А., Жуков Ю. А., Мороз А. В. Реализация задач кинематики на микропроцессоре ARM-архитектуры для мехатронных систем управления гексаподом // Вопросы радиоэлектроники. 2016. № 8. С. 92—98.
6. Микроконтроллер 1986BE8T [Электронный ресурс] // Сайт АО «ПКК Миландр». 2017. 28 июня. URL: [http://ic.milandr.ru/products/mikrokontrollery\\_i\\_protessory/](http://ic.milandr.ru/products/mikrokontrollery_i_protessory/) (дата обращения: 28.06.2017).

*E.S. Briskin, N.G. Sharonov, Ya.V. Kalinin, A.V. Maloletov, V.A. Serov*

## **ON THE FEATURES OF MOTION CONTROL OF MOBILE ROBOTS WITH WALKING LOCOMOTOR OF DISCRETE INTERACTING WITH THE SUPPORT SURFACE<sup>XIV</sup>**

*Volgograd State Technical University, Volgograd,  
dtm@vstu.ru*

### **Abstract**

The some propulsion devices are considered: the rotary-orthogonal propulsion device, the wedging-sliding propulsion device, the wedging-rotary propulsion device, the cable-anchors propulsion device. For each of them, possible areas of application are defined, and the most urgent tasks of traffic control are set.

For the rotary-orthogonal propulsion device, the task is to determine the laws for changing the lengths of crankshafts of mechanisms. For a wedge-sliding propulsion device, equations of program motion that ensure a minimum of energy costs are defined. For the wedge-rotary propulsion device, the dependence of the spreading force on external loads is determined. For the cable-anchors propulsion device, the task is to determine the location of the cables and the laws governing their movement.

Keywords: mobile robots, propulsion devices, control of movement.

### **Introduction**

Wheels and tracked propulsion-devices have received the most widespread among the propulsion-devices of mobile robots [1]. However walking propulsion-devices as propulsion-devices discretely interacting with the support surface are superior them in a number of indicators [2]. Along with that kinematic schemes of walking movers are extremely diverse in comparison with to the wheels and tracks movers [3]. The search of new types of propulsion-devices is continuously performed and some of them are offering [4-6]. Such propulsion-devices are still not a lot, each individual is described their equations, is required special control and used in certain condition. However, there are general properties and requirements to their motion.

### 1. Statement of the problem

The task is to describe methods of control of mobile robots with propulsion-devices of different types, possible areas of their practical application and related physical effects in the motion of mobile robots with such propulsion-devices.

### 2. Rotary-ortogonal propulsion-device (ROP)

The peculiarity of ROP lies in the fact that it the main drive of course motion, is the drive committing unidirectional rotation [7]. Such ROP is the development of orthogonal-turning propulsion-device of walking machine “Ortonog” [8] (fig.1).



Figure 1 – Walking machine “Ortonog”

The principle of operation rotary-orthogonal walking propulsion-device (fig. 2) is based on the interacting only one walking mechanism with the ground.

The other two mechanisms are in phase of transfer in this time. The control of ROP is carried out by changing angle velocity of leading crank, but the turn due to changing the angle of rotary guide orientation

$$\begin{aligned} \dot{\rho} &= -v_0 \cos(\varphi + \varphi) \\ \dot{\varphi} &= \frac{v_0}{\rho} \sin(\varphi + \varphi) \end{aligned} \quad (1)$$

where  $\rho$  is the length of cranks,  $\varphi$  is the angle of rotation,  $\psi$  is the angle of the walking machine turn,  $v_0$  is the velocity of the axis of propulsion device. The laws of motion  $\rho_2(t)$  and  $\rho_3(t)$  are determined depending on the optimality criterion, consisting of several indicators  $H_j$  with weight coefficients  $k_j$  [9]. If you are considering only one of indicator, for example the indicator of static balance

$$H = \frac{1}{s^2 \tau} \int_0^\tau \sum_{j=1}^N (\rho_{C_{xj}}^2 + \rho_{C_{yj}}^2) dt, \quad (2)$$

the minimum of  $H$  will be provided if

$$\begin{cases} \rho_3 = (h \sin \varphi - S \cos \varphi) + \sqrt{3} (h \cos \varphi - S \sin \varphi) \\ \rho_2 = (h \sin \varphi - S \cos \varphi) - \sqrt{3} (h \cos \varphi - S \sin \varphi) \end{cases} \quad (3)$$

where  $\rho_{C_{xj}}, \rho_{C_{yj}}$  – coordinates of center of mass of walking mechanisms,  $s$  – length of step,  $N$  – number of walking mechanisms in propulsion device,  $\tau$  – the time of one step,  $h$  – the distance from axis of rotation to track of motion.

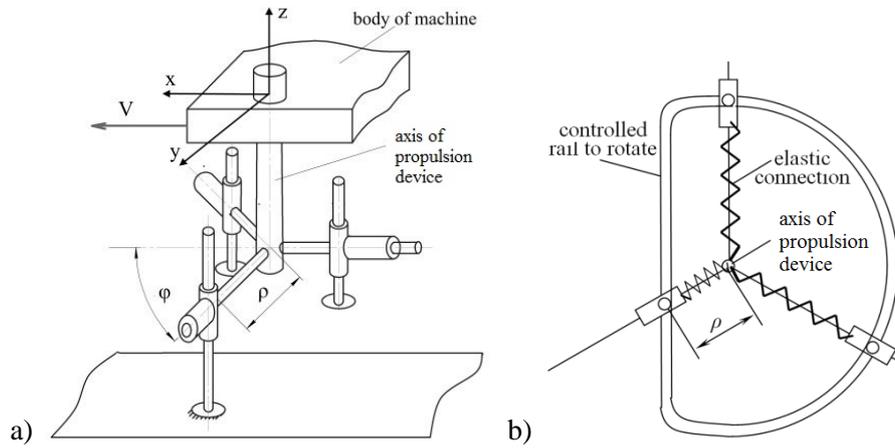


Figure 2 – Rotary-orthogonal propulsion-device with controlled (a) and uncontrolled variable (b) length  $\rho$  of cranks in process of motion

### 3. Wedging-sliding propulsion-device

The principle of movement and the active force diagram of the robot moving on the vertical smooth rod are shown in figure 3a with a resting bottom sleeve and moving up the top sleeve and equations of motion for sleeve have a form:

$$\begin{cases} P - G - 2F_{\max} > 0 \\ Pb \pm N_1 h - Ga = 0, \\ F_{\max} = fN_1 \end{cases} \quad (4)$$

where  $G$  are weight of sleeves,  $f$  are coefficient of friction,  $N_i$ ,  $F$  – the normal reactions and forces of friction,  $P$  – active force,  $a$ ,  $b$  – the geometric dimensions. The minus sign corresponds to the acting of forces  $\vec{N}_1$  in points  $A'_1, B'_1$ , but plus in points  $A_1, B_1$ .

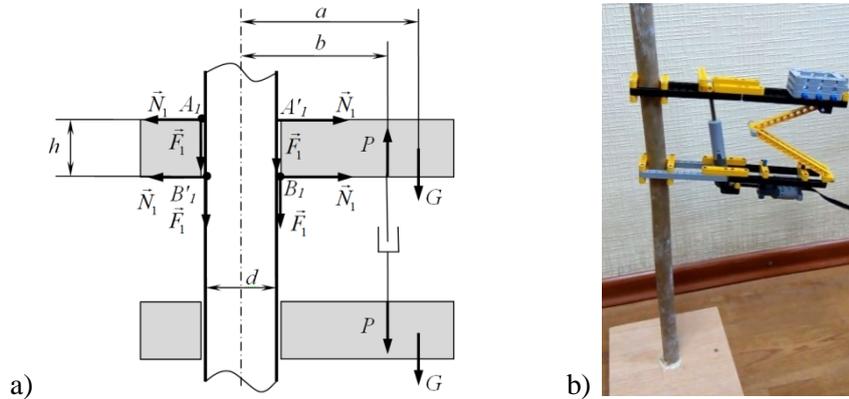


Figure 3 – Design model (a) and experiment (b) of sliding-wedging mover

The motion is possible if:

$$G \frac{h + 2fa}{h + 2fb} < P < G \frac{2fa - h}{2fb - h} \quad (5)$$

For example, if  $a/h = 10$ ;  $b/h = 5$ ;  $f = 0,2$

$$1.66G < P < 3G. \quad (6)$$

The complete cycle of motion includes a phase of motion of bottom sleeve and stop of top sleeve. The appropriate selection of the geometric dimension, coefficient of friction and control laws allow the robot to move both up and down in an optimal way in accordance with the selected criterion.

One of the important indicators of such robot motion is the level of heat loss in engine [10]

$$I = \gamma \int_0^{\tau} \rho^2 dt, \quad (7)$$

where  $\gamma$  – coefficient, characterizing the engine,  $\tau$  – the time of cycle.

So we can obtain the law of motion

$$x = 2l \frac{t^2}{\tau^2}, \quad (8)$$

where  $l$  – displacement of the robot per cycle.

Experimental study (fig. 3b) has confirmed efficiency of such method of moving and easy to control in comparison with walking robot [11].

#### 4. Wedging-rotary propulsion-device with controlled distance between wedging sleeves.

The relevance of development and investigation such propulsion-device is due of such important quality as to no need to interact directly with the ground when it moves through ground. Natural objects rigidly connected with supported surface (on the ground may be used for this purpose, for example - trees). The scope of used such propulsion-devices can be timber harvesting. Then there is no need to have a massive chassis and any propulsion-devices for such machine. Instead of the bearing support are used trees. Therefore the tasks of ensuring the stability of machine, profile and ground permeability problems of ecological interacting with the ground are absent. The ability to work on steep slopes appears also (fig. 4).

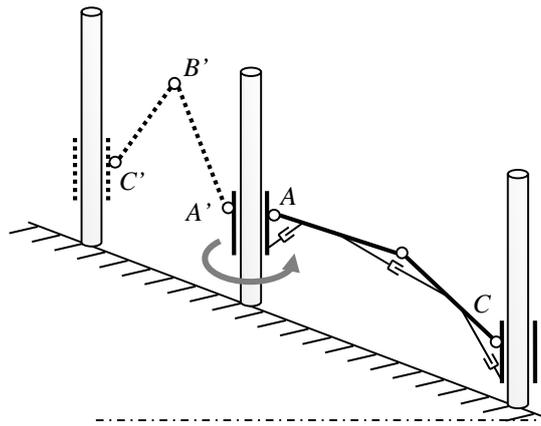
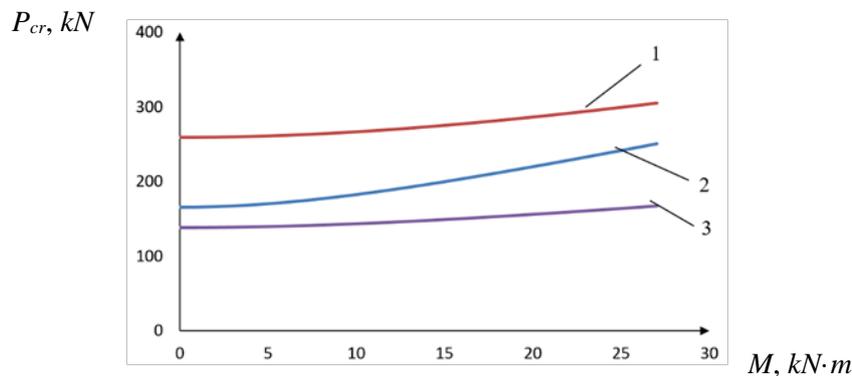


Figure 4 – Design scheme of wedging– rotary mover ( $A'$ ,  $B'$ ,  $C'$  are the new position of  $A$ ,  $B$ ,  $C$  points after the turn of wedging– rotary mover)

The problem of determining the spacer effort  $P$  (fig. 3) providing for the sleeve reliable jamming on depending from their geometrical sizes and others parameters is considered. The method of solution is based on obtaining equilibrium equations. The main result of given task is the determination of critical effort when  $4f^2\beta^2 - 1 > 0$ ;  $4f^2\alpha^2 - 1 > 0$ . The dependencies  $P_{cr} = P_{cr}(M, G)$  in various geometrical parameters of wedging-rotary propulsion device are presented in fig. 5.

The analysis of graphs shows a significant influence of geometrical parameters of wedging-rotary propulsion-devise on the value of push-in force.

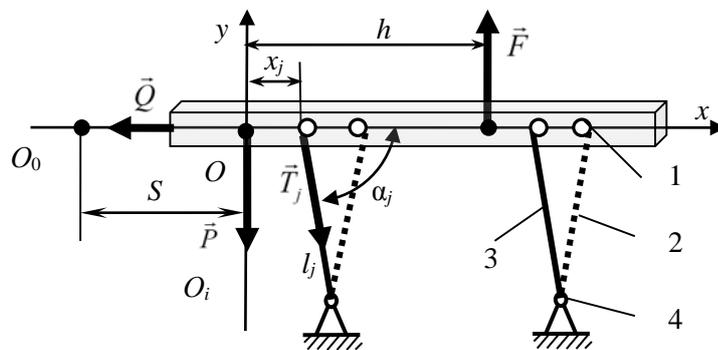


1 –  $G=6250N$ ,  $d=0,5m$ ,  $f=0,3$ ; 2 –  $G=4000N$ ,  $d=0,4m$ ,  $f=0,3$ ; 3 –  $G=6250N$ ,  $d=0,5m$ ,  $f=0,5$ .

Figure 5 – The dependence of the critical push-in force  $P_{cr}$  from the moment  $M$ .

#### 4. Cable-anchors propulsion-device

The displacement of equipment is provided with changing of cable length, attached to the anchors according to the program motion. The transfer of the anchors is carried out the agreed operation of flywheels, and their actual position is determined by the orientation and length of cable [fig. 6].



1 – controlled flywheels, 2 – loose cable, 3 – loaded cable, 4 – anchor  
Figure 6 – Cable-anchor propulsion-device

The problem of determining the place of installation drives of cables, providing optimal motion with required indicators of quality is considered.

If the minimum of heat loss in engine is the criteria  $I$  of optimal program motion, then

$$I = \sum_{i=1}^3 \int_0^S T_i^2 dS \rightarrow \min, \quad (8)$$

where  $S$  is the path traversed by the body,  $T_i$  – the force in  $i$  cable.

The dependence of relative heat loss  $\varepsilon$  from coordinate  $x_2$  is presented in fig. 7 when  $N=3$ ,  $m_1g=130N$ ,  $P=4905N$ ,  $F=52^1$  The work was supported by RFBR (№ 17-01-00675 a).00N,  $x_1=-5m$ ,  $x_3=5m$ .

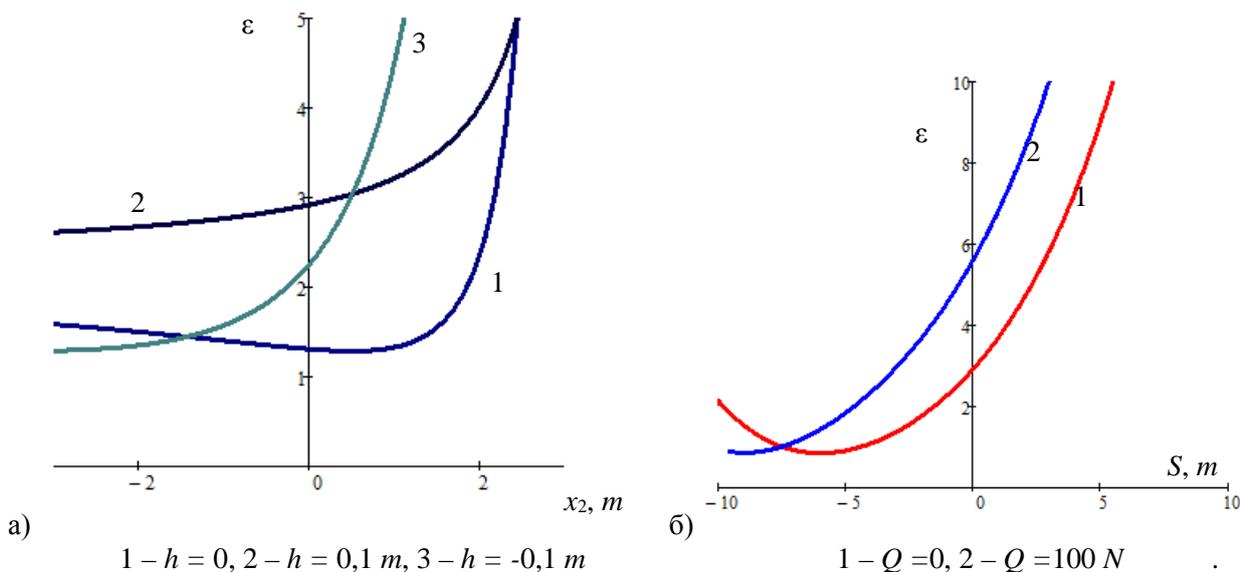


Figure 7 – The dependence of relative heat loss  $\varepsilon$

**Contribution of authors.** Briskin E.S. - statement of the problem, methods of solution, Sharonov N.G. - solution and analysis of problems, Kalinin Ya.V. - an analysis of the energy efficiency of the cable-anchor propulsion device (grant of the President of the Russian Federation MK-1493.2017.1), Maloletov A.V. - programming of the kinematics of the rotor-orthogonal propulsion device (RFBR grant No. 16-48-340957 p\_a), Serov V.A. - design study.

1. Osnovy robototekhniki / E.I. Yurevich // 2-e izd. SPb: BHV Peterburg, 2005. - 416 p.
2. Koncepciya proektirovaniya, dinamika i upravlenie dvizheniem shagayushchih mashin. CH.3. Algoritmy upravleniya dvizheniem shagayushchih mashin serii "Vos'minog" i ehksperimental'nye issledovaniya / E.S. Briskin i dr.// Mekhatronika, avtomatizaciya, upravlenie. - 2005. - №7. - P. 13-18.
3. Pavlovskij V.E. O razrabotkah shagayushchih mashin // Preprinty IPM. 2013. № 101. 32 p.
4. Chernous'ko F.L., Shunderyuk M.M. Vliyanie sil treniya na dinamiku dvuzvennogo mobil'nogo robota//Prikladnaya matematika i mekhanika. 2010. T. 74, Vyp. 1. P. 22-36.
5. Mobil'nye roboty: problemy upravleniya i optimizacii dvizhenij / Chernous'ko F.L., Bolotnik N.N., Gradeckij V.G.//V sbornike: XII VSPU-2014 IPU RAN. -2014. -P. 67-78.

6. Issledovanie raboty plavnikovogo dvizhitelya gidrobionta / Cyfanskij S.L., Viba YA.A., Yakushevich V.A., Kruusmaa M., Megill V. //Dinamika vibroudarnyh (sil'no nelinejnyh) sistem DYVIS-2009: Sb. tr. M.: RAN, 2009. S. 385-392.
7. Development of Rotary Type Movers Discretely Interacting with Supporting Surface and Problems of Control Their Movement / E.S. Briskin, A.V. Maloletov, N.G. Sharonov, S.S. Fomenko, Ya.V. Kalinin, A.V. Lenard // ROMANSY 21 – Robot Design, Dynamics and Control: Proceedings of the 21st CISM-IFTToMM Symposium (Udine, Italy, June 20-23, 2016) / ed. by V. Parenti-Castelli, W. Schiehlen. – [Switzerland]: Springer International Publishing, 2016. – P. 351-359. – (Ser. CISM International Centre for Mechanical Science. Courses and Lectures; Vol. 569).
8. On the control of motion of a walking machine with twin orthogonal rotatory movers / E.S. Briskin, I.P. Vershinina, A.V. Maloletov, N.G. Sharonov // Journal of Computer and Systems Sciences International. - 2014. - Vol. 53, Issue 3 (May). - P. 464-471.
9. Ob ocenke ehffektivnosti ciklovyh mekhanizmov / E.S. Briskin, Ya.V. Kalinin, A.V. Maloletov // Izvestiya RAN. Mekhanika tvyordogo tela. - 2017. - № 2. - P. 13-19.
10. On the energy efficiency of cyclic mechanisms / E.S. Briskin, Ya.V. Kalinin, A.V. Maloletov, V.V. Chernyshev // Mechanics of Solids. - 2014. - Vol. 49, No. 1. - P. 11-17.
11. Lazayushchij robot s dvizhitelem, rabotayushchim na ehffekte periodicheskogo «dinamicheskogo zaklinivaniya» / V.S. Majstrenko, R.A. Temin, A.V. Maloletov // MIKMUS – 2016: sb. tr. konf., IMASH RAN. - Moskva, 2017. - P. 260-263.

*Е.С. Брискин, Н.Г. Шаронов, Я.В. Калинин, А.В. Малолетов, В.А. Серов*

## ОБ УПРАВЛЕНИИ ДВИЖЕНИЕМ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ С ДВИЖИТЕЛЯМИ, ДИСКРЕТНО ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИМИ С ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ<sup>13</sup>

*ВолгГТУ, г. Волгоград, dtm@vstu.ru*

### Аннотация

Рассматриваются движители: роторно-ортогональный движитель, заклинивающе-скользящий движитель, заклинивающе-поворотный движитель, якорно-тросовый движитель. Для каждого из них определены возможные области применения, поставлены наиболее актуальные задачи управления движением.

Ключевые слова: мобильные роботы, движители, управление движением.

### Введение

Наиболее широкое распространение среди движителей наземных мобильных роботов получили колесные и гусеничные [1], непрерывно взаимодействующие с опорной поверхностью. Однако известны движители и дискретно взаимодействующие с опорной поверхностью, например, шагающие, которые по целому ряду показателей их превосходят [2]. Вместе с тем, в отличие от колесных и гусеничных, кинематические схемы шагающих движителей отличаются существенным разнообразием [3], идет поиск и непрерывно предлагаются новые типы движителей, дискретно генерирующих движущие силы, на основе различных физических эффектов вызывающих движение мобильных роботов: змеевидные, использующие эффект асимметрии сил трения и движение внутренних масс для перемещения по ровным поверхностям, движители с присосками для перемещения по вертикальным поверхностям, движители типа «рыбьего плавника» для перемещения в водной среде и др. [4, 5, 6]. Таких движителей пока еще не много, каждый конкретный описывается своими уравнениями, требует специфического управления и применяется в определенных условиях.

### 1. Постановка задачи

Ставится задача описания способов управления перспективными, по мнению авторов, типами движителей, возможных областей их применения и сопутствующих физических эффектов при движении мобильных роботов с такими движителями.

### 2. Роторно-ортогональный движитель

Особенность роторно-ортогонального движителя состоит в том, что основным приводом курсового движения является привод, совершающий в маршевом режиме однонаправленное вращательное движение ведущих звеньев (кривошипов)  $N$  механизмов шагания [7]. Роторно-ортогональный

движитель является развитием ортогонально-поворотного движителя шагающей машины «Ортоног» [8].

Управление курсовым движением роторно-ортогонального движителя осуществляется за счет изменения угловой скорости вращательного движения ведущего кривошипа и изменения размеров ведущих кривошипов механизмов шагания как за счет управления их длиной (рис. 1, а), так и за счет введения поворотной направляющей (рис. 1, б) в соответствии с уравнениями (1), описывающими движение того из них, который опирается на поверхность (условно первый механизм шагания):

$$\dot{\rho} = -V_0 \cos(\psi + \varphi), \quad \dot{\varphi} = \frac{V_0}{\rho} \sin(\psi + \varphi), \quad (1)$$

где  $\rho$  – длина кривошипа,  $\varphi$  – угол поворота приводного двигателя,  $\psi$  – угол поворота машины,  $V_0$  – скорость точки корпуса машины, в которой закреплен движитель (рис. 1).

Законы движения  $\rho_2(t)$  и  $\rho_3(t)$ , обеспечиваемые приводами коррекции, определяются в зависимости от критерия оптимальности движения. В общем случае критерий оптимальности движения  $I$  может состоять из нескольких показателей  $H_j$  и определяется их суммой с весовыми коэффициентами  $k_j$  [9]. Например, если рассмотреть показатель статической уравновешенности движителя  $H_2$

$$H_2 = \frac{1}{S^2 \tau} \int_0^\tau \sum_{j=1}^N (\rho_{C_{xj}}^2 + \rho_{C_{yj}}^2) dt \quad (2)$$

где  $\rho_{C_{xj}}, \rho_{C_{yj}}$  – координаты центра масс каждого из механизмов шагания, то его минимум при  $N = 3$  будет при  $\rho_{C_{xj}} = \rho_{C_{yj}} = 0$ , что обеспечивается выполнением условий

$$\begin{cases} \rho_3 = (h \sin \varphi - S \cos \varphi) + \sqrt{3}(h \cos \varphi - S \sin \varphi) \\ \rho_2 = (h \sin \varphi - S \cos \varphi) - \sqrt{3}(h \cos \varphi - S \sin \varphi) \end{cases}, \quad (3)$$

где  $h$  – расстояние от относительной траектории опорной стопы (следа) до оси поворота движителя,  $S$  – длина шага (следа).

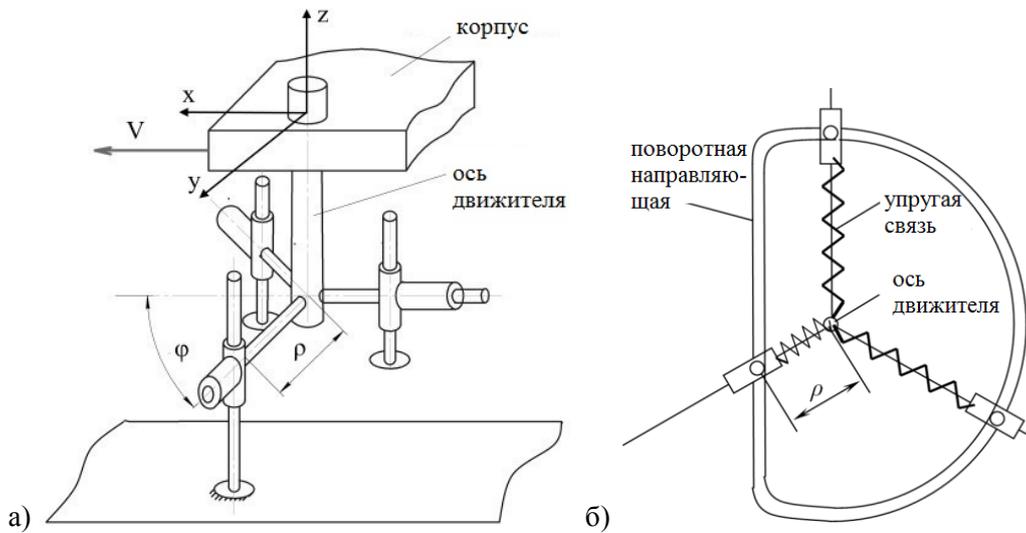


Рисунок 1 – Роторно-ортогональный движитель с управляемой длиной звеньев (а) и направляющая для звеньев (б)

### 3. Заклинивающе-скользящий движитель

Движители такого типа основаны на развитии метода перемещения механической системы твердых тел по шероховатым поверхностям за счет периодической остановки некоторых из них, вызываемой превышением сил трения движущих сил над активными силами и последующим их движением при превышении движущих сил над силами трения [10].

Принцип движения и схема действующих сил при движении по вертикальному стержню представлены на рис. 2 при покоящейся нижней втулке и движущейся вверх верхней. Движение верхней втулки возможно, если выполняются условия

$$\begin{cases} P - G - 2F_{\max} > 0 \\ Pb - Ga \pm Nh = 0 \end{cases}, \quad (4)$$

где  $F_{max}=fN$ ,  $P$  – усилие в приводе,  $G$  – вес робота,  $a$ ,  $b$  – геометрические размеры. Знак « $\rightarrow$ » соответствует перекосу верхней втулки против хода часовой стрелки, знак « $\leftarrow$ » соответствует перекосу верхней втулки по ходу часовой стрелки.

Уравнения движения одной из втулок в фазе отсутствия заклинивания имеют вид

$$\begin{cases} m\ddot{x} = P - G - 2f(P\beta - G\alpha), \text{ если } P\beta - G\alpha > 0 \\ m\ddot{x} = P - G - 2f(G\alpha - P\beta), \text{ если } P\beta - G\alpha < 0 \end{cases} \quad (5)$$

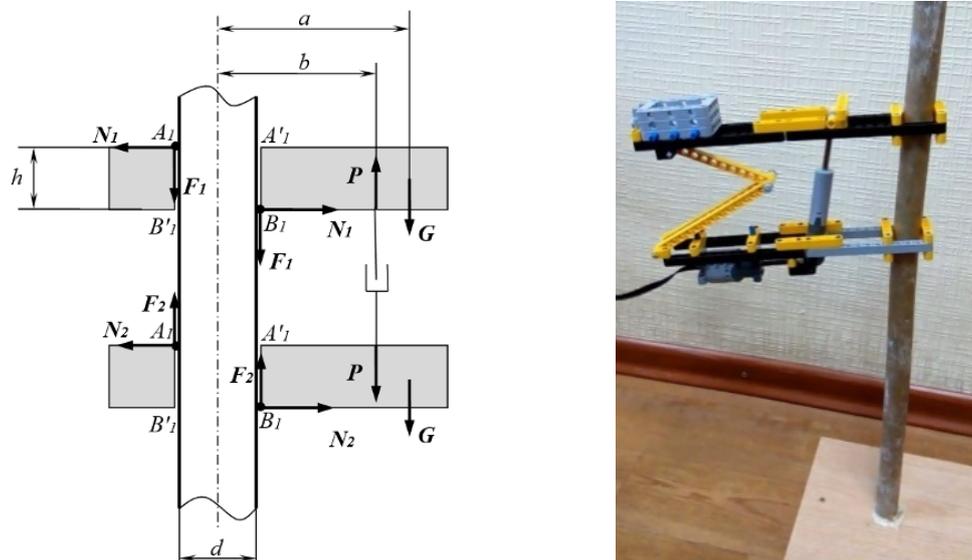


Рисунок 2 – Заклинивающе-скользящий движитель

Особенность уравнений (5) проявляется в структуре их правой части: силы сопротивления движению явно зависят от действующей движущей силы  $P$ . Выбор оптимального программного движения зависит от критерия оптимальности, который может быть составлен из нескольких показателей. Одним из важных показателей является уровень тепловых потерь  $I$  в двигателе [11], который определяется как

$$I = \gamma \int_0^{\tau} P^2 dt, \quad (6)$$

где  $\gamma$  – коэффициент, характеризующий двигатель,  $\tau$  – время движения.

Если учесть начальные условия  $x(0) = 0$ ;  $\dot{x}(0) = 0$ , и требование перемещения втулки за время  $\tau$  на величину  $l$ , то для оптимального режима из уравнений Эйлера-Лагранжа [12] движения получаем

$$x = 2lt^2/\tau^2. \quad (7)$$

Экспериментальные исследования (рис. 2) подтвердили [13] работоспособность описанного способа и простоту управления таким движением, по сравнению с роботом с шагающими движителями, например, с шагающими инсектоморфными движителями при движении по вертикальному столбу [14].

#### 4. Заклинивающе-поворотный движитель

Актуальность разработки и исследования таких движителей обусловлена такой их важной особенностью, как отсутствие необходимости непосредственно взаимодействовать с опорной поверхностью при перемещении по ней. Естественными объектами, жестко связанными с опорной поверхностью (грунтом), которые для этой цели могут быть использованы, являются, например, деревья, а областью применения таких движителей – лесозаготовки. Тогда отсутствует необходимость иметь тяговые движители (например, колеса и гусеницы) для такой машины. Вместо опор используются неповаленные деревья. Поэтому снимаются задачи обеспечения устойчивости машины при перемещении по грунту, экологические проблемы взаимодействия движителей с грунтом, и задачи профильной и грунтовой проходимости, появляется возможность работы на крутых склонах (рис. 3).

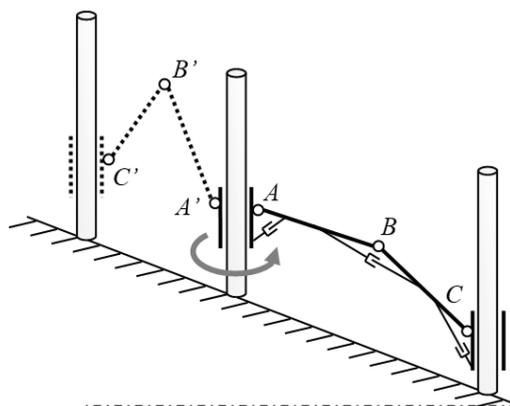
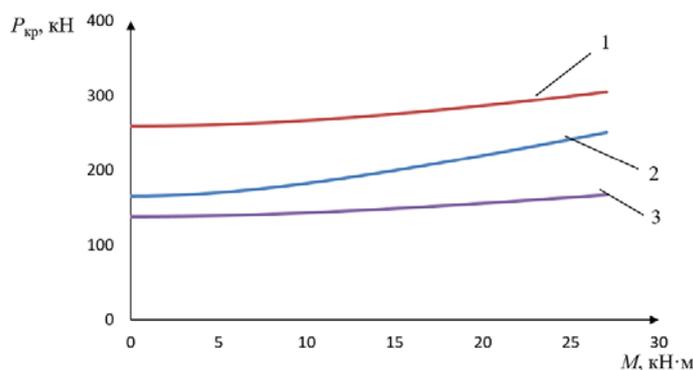


Рисунок 3 – Заклинивающе-поворотный движитель

Рассматривается задача определения усилия  $P$  обеспечивающего надежное заклинивание втулок (рис. 3) в зависимости от их и стрелы движителя геометрических параметров ( $h, \alpha=a/h, \beta=b/h$ ), диаметра опорной стойки (дерева)  $d$ , его веса совместно с весом поворотной части стрелы  $G$ . Метод решения основан на составлении уравнений равновесия втулки стрелы движителя с учетом сил трения между стойкой и втулкой. Расчетная схема для решения поставленной задачи представлена на рис. 2.



1 –  $G=6250\text{Н}, d=0,5\text{м}, f=0,3$ ; 2 –  $G=4000\text{Н}, d=0,4\text{м}, f=0,3$ ; 3 –  $G=6250\text{Н}, d=0,5\text{м}, f=0,5$ .

Рисунок 4 – Зависимость критического распорного усилия  $P_{кр}$  от момента  $M$

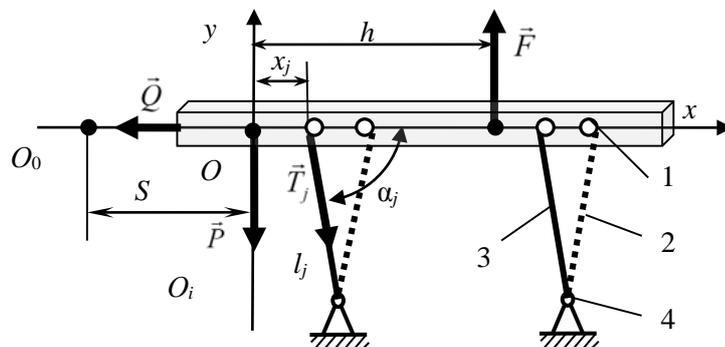
Основным результатом решения поставленной задачи является определение величины  $P_{кр}$  при  $4f^2\beta^2 > 1$  и  $4f^2\alpha^2 > 1$ . На рисунке 4 представлена зависимость  $P_{кр}=P_{кр}(M, G)$  при различных геометрических параметрах заклинивающе-поворотного движителя.

### 5. Якорно-тросовый движитель

Актуальность разработки движителей, способных осуществлять перемещения технологического оборудования в придонных областях мирового океана, обусловлена растущей потребностью освоения его недр. Перемещение оборудования обеспечивается изменением длины тросов, прикрепленных к якорям в соответствии с программным движением. Перенос якорей осуществляется согласованной работой приводов барабанов, а занимаемые ими фактические положения определяются ориентацией и длиной тросов.

Рассматривается задача определения мест установки приводов тросов на технологическом оборудовании, обеспечивающих оптимальность движения по формируемым показателям качества. Например, при поступательном движении технологического оборудования с прямолинейным движением центра масс, моделируемого прямолинейным стержнем (рис. 5), уравнения равномерного движения имеют вид

$$\sum_{j=1}^N T_j \cos \alpha_j - Q = 0, \quad - \sum_{j=1}^N T_j \sin \alpha_j + F - P = 0, \quad - \sum_{j=1}^N T_j x_j \sin \alpha_j + Fh = 0 \quad (8)$$



1 – управляемые барабаны, 2 – ослабленный трос, 3 – нагруженный трос, 4 – якорь  
Рисунок 5 – Якорно-тросовый движитель

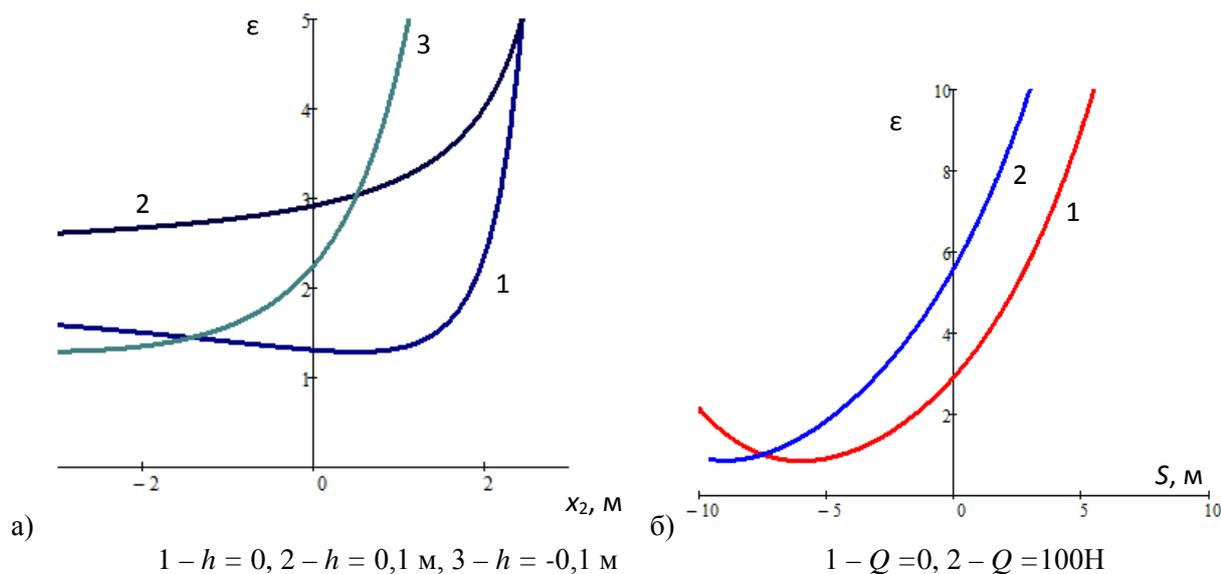
При движении углы наклона тросов меняются с  $\alpha_{j0}$  на  $\alpha_j$  в зависимости от пройденного пути  $S$ :

$$\operatorname{tg} \alpha_j = l_j \sin \alpha_{j0} / (l_j \cos \alpha_{j0} - S). \quad (9)$$

Если критерием  $I$  оптимального программного движения является минимум тепловых потерь [9] в двигателях, управляющих длиной  $l_j$  тросов, то должно выполняться условие:

$$\delta I = \delta \sum_0^S \int \varepsilon(S) dS = 0, \quad \varepsilon = \sum_{j=1}^N T_j^2 / \left( N \sum_{j=1}^N (m_j g - F_j) \right), \quad (10)$$

где  $\varepsilon$  – относительные тепловые потери,  $F_j$  – действующая на якорь выталкивающая сила.



1 –  $h = 0$ , 2 –  $h = 0,1$  м, 3 –  $h = -0,1$  м  
Рисунок 6 – Зависимость относительных тепловых потерь  $\varepsilon$  от положения крепления троса якоря при разном значении приложения выталкивающей силы (а) и горизонтального перемещения объекта при разном значении силы сопротивления среды (б)

Зависимость относительных тепловых потерь  $\varepsilon$  от положения  $x_2$  крепления троса якоря на объекте при разном значении  $h$  приложения выталкивающей силы  $F$  (рис. 6, а) и горизонтального перемещения  $S$  объекта при разном значении силы сопротивления среды (рис. 6, б), рассчитана при значениях параметров  $N = 3$ ,  $m_j g - F_j = 130$  Н,  $P = 4905$  Н,  $F = 5200$  Н,  $x_1 = -5$  м,  $x_3 = 5$  м.

Также должно выполняться условие неподвижности каждого  $j$ -го якоря на дне водоема:

$$T_j \sin \alpha_j - m_j g + F_j < 0, \quad T_j \cos \alpha_j - T_{jy} < 0, \quad (11)$$

где  $F_j$  – выталкивающая сила,  $T_{jy} = k(mg - P)$  – сила сцепления (держущая сила) якоря с грунтом,  $k = 1,5 \dots 12$  – коэффициент держущей силы, зависящий от типа якоря и грунта [15].

**Вклад авторов.** Брискин Е.С. – постановка задачи, методы решения, Шаронов Н.Г. – решение и анализ задач, Калинин Я.В. – анализ энергоэффективности якорно-тросового движителя (грант

Президента РФ МК-1493.2017.1), Малолетов А.В. – программирование кинематики роторно-ортогонального движителя (грант РФФИ № 16-48-340957 p\_a), Серов В.А. – конструкторская проработка.

1. Основы робототехники / Е.И. Юревич // 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: БХВ Петербург, 2005. - 416 с.
2. Концепция проектирования, динамика и управление движением шагающих машин. Ч.3. Алгоритмы управления движением шагающих машин серии "Восьминог" и экспериментальные исследования / Е.С. Брискин и др.// Мехатроника, автоматизация, управление. - 2005. - №7. - С. 13-18.
3. Павловский В.Е. О разработках шагающих машин // Препринты ИПМ. 2013. № 101. 32 с.
4. Черноушко Ф.Л., Шундерюк М.М. Влияние сил трения на динамику двузвенного мобильного робота//Прикладная математика и механика. 2010. Т. 74, Вып. 1. С. 22-36.
5. Мобильные роботы: проблемы управления и оптимизации движений / Черноушко Ф.Л., Болотник Н.Н., Градецкий В.Г.//В сборнике: XII ВСПУ-2014 ИПУ РАН. -2014. -С. 67-78.
6. Исследование работы плавникового движителя гидробионта / Цыфанский С.Л., Виба Я.А., Якушевич В.А., Круусмаа М., Мегилл В. //Динамика виброударных (сильно нелинейных) систем DYVIS-2009: Сб. тр. М.: РАН, 2009. С. 385-392.
7. Development of Rotary Type Movers Discretely Interacting with Supporting Surface and Problems of Control Their Movement / Е.С. Брискин, А.В. Малолетов, Н.Г. Шаронов, С.С. Фоменко, Я.В. Калинин, А.В. Леонард // ROMANSY 21 – Robot Design, Dynamics and Control: Proceedings of the 21st CISM-IFTOMM Symposium (Udine, Italy, June 20-23, 2016) / ed. by V. Parenti-Castelli, W. Schiehlen. – [Switzerland]: Springer International Publishing, 2016. – P. 351-359. – (Ser. CISM International Centre for Mechanical Science. Courses and Lectures; Vol. 569).
8. Об управлении движением шагающей машины со сдвоенными ортогонально-поворотными движителями / Е.С. Брискин, И.П. Вершинина, А.В. Малолетов, Н.Г. Шаронов // Известия РАН. Теория и системы управления. - 2014. - № 3. - С. 168-176
9. Об оценке эффективности цикловых механизмов / Е.С. Брискин, Я.В. Калинин, А.В. Малолетов // Известия РАН. Механика твёрдого тела. - 2017. - № 2. - С. 13-19.
10. Черноушко Ф. Л., Болотник Н. Н. Мобильные роботы, управляемые движением внутренних тел//Тр. ИММ УрО РАН, 2010, т. 16, № 5, с. 213-222.
11. Об энергетической эффективности цикловых механизмов / Е.С. Брискин, Я.В. Калинин, А.В. Малолетов, В.В. Чернышев // Известия РАН. Механика твёрдого тела. - 2014. - № 1. - С. 18-25.
12. Оптимизация структуры, параметров и режимов движения шагающих машин со сдвоенными движителями / А.В. Малолетов, Е.С. Брискин; ВолгГТУ. - Волгоград, 2015. - 174 с.
13. Лазающий робот с движителем, работающим на эффекте периодического «динамического заклинивания» / В.С. Майстренко, Р.А. Темин, А.В. Малолетов // МИКМУС – 2016: сб. тр. конф., ИМАШ РАН. - Москва, 2017. - С. 260-263.
14. Голубев Ю.Ф., Корянов В.В. Построение движений инсектоморфного робота, преодолевающего комбинацию препятствий с помощью сил кулоновского трения//Известия РАН, Теория и системы управления. № 3, 2005. С. 143-155.
15. Справочник по управлению кораблем / Под ред. Александрова А.А. // М. Воениздат - 1974г. 512 с.

*V. P. Andreev, V. L. Kim*

## **THE TRANSPORT MODULE MOTION ORGANIZATION IN THE COMPOSITION OF THE HETEROGENEOUS MODULAR MOBILE ROBOT<sup>XV</sup>**

*MSUT “STANKIN”, International Laboratory “Sensorika”, International Institute of the New Educational Technologies, RSUH, Moscow, andreevvipa@yandex.ru, top7733@gmail.com*

### **Abstract**

In this paper the main features of the information interaction between the transport module and the supervisory module of the heterogeneous modular mobile robot are considered. This heterogeneous modular robot consists of the functional complete modules. The interaction is considered by the example of mobile robotics typical tasks. We propose the new method for the modular robot smooth motion control using the so called artificial forces. This method allows the robot to move along the trajectories that similar to B-splines without their preparatory definition.

Keywords: heterogeneous modular robot, functional completeness, trajectory tracking, motion planning, distributed control, mobile robot control system.

### Introduction

At the present time the modular approach to robots design actively develops and applying. Modular robots are universal and flexible systems that are characterized by a variety of properties individualizing them among the wide diversity of other robotic systems.

Existing modular mobile robots (MR) are divided on two main types: homogeneous and heterogeneous [1]. In this paper we consider the heterogeneous modular MR. The main feature of the heterogeneous modular robots is the *differentiation of the modules by their functions*. Therefore modules of that kind of systems are unequal.

**The purpose of this study** is to develop the method of the transport module (TM) motion organization upon receipt of the control objectives from the supervisory module in heterogeneous modular MR. Design of the heterogeneous modular MR called FCMBot (robot with functional complete modules) is considered in the framework of the concept which main propositions were contemplated in [2, 3]. Some specific features of TM design were outlined in [4].

#### The main research objectives:

1. Consider the application of the principle of the distributed control to analyze the nature of the interaction of the transport module and the supervisory module.
2. Determine the sequence of actions for implementing information exchange between the transport module and the supervisory module.
3. Develop the control method for the smooth TM motion near reference points.

#### The project concept is defined by next main principles:

1. Each module is a functionally complete electronic or mechatronic device with its own information-measuring and control system (IMCS) – principle of the distributed control.
2. The robot IMCS is constructed as a local area network, the nodes of which are modules.

#### The distributed robot control

The distributed control is based on the principle of the functional completeness of modules, which means that each module performs the given task from the module-supervisor (control module) by itself. Supervisor gives control goal but verifies only result of the module working and not the process (except for emergency situations). Therefore a module design and its IMCS can differ according to a module implementation. This is the main distinction between the FCMBot and the most of the heterogeneous robots where supervisory modules control all modules with the low-level commands. The proposed distributed control design simplifies the language of the inter-modular communication and reduces the inter-modular information flows.

Consider the sequence of actions for implementing information exchange between the transport module and the supervisory module by the next example. Let the MR consists of the next modules: the supervisory module, the wheeled transport module, sensor modules and power supply module (fig. 1a).

The supervisory module sends control goal to the TM – the vector of the desired robot position  $[X_G, Y_G, \varphi_G]^T$ , where  $X_G, Y_G$  - the robot characteristic point coordinates with respect to the fixed world coordinate frame,  $\varphi_G$  - robot orientation angle. The wheeled TM must arrive to the desired position **by itself** using the data from the short-range sensor module (SRSM).

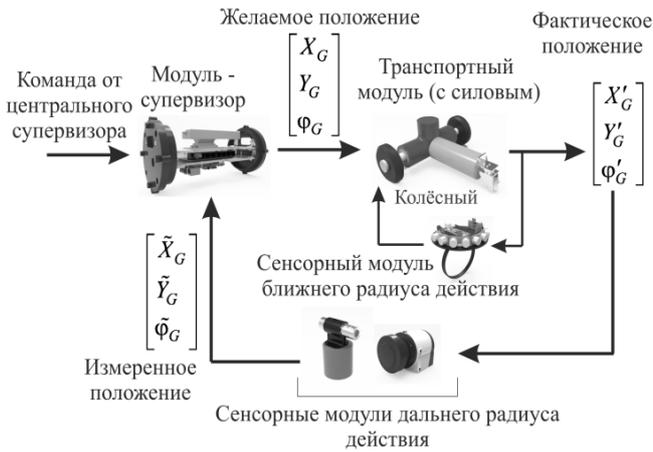


Figure 1a – Example of the functional completeness of the wheeled TM

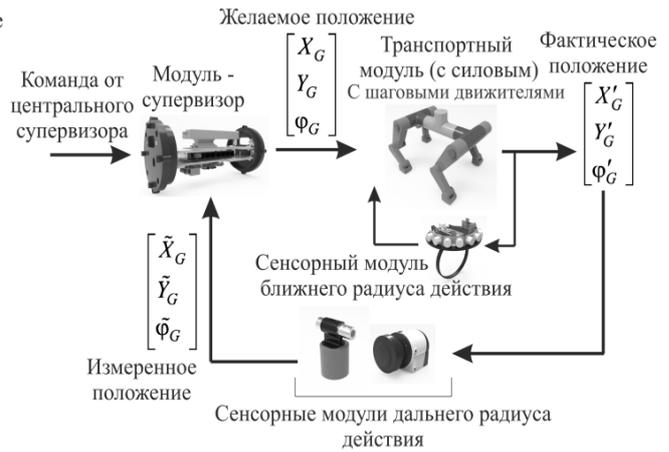


Figure 1b – Example of the functional completeness of the legged TM

Since the TM uses the sensor module with restricted operating zone its actual position defined by vector  $[X'_G, Y'_G, \phi'_G]^T$  is diverged from desirable. Considering that the TM position defines whole MR position, quality of the control goal accomplishment is verified by the supervisory module with the help of the long-range sensor modules (LRSM). The supervisory module compares the vector of measured position  $[\tilde{X}_G, \tilde{Y}_G, \tilde{\phi}_G]^T$  with desirable and corrects actual robot position (sets the new control goal for example).

The same modular system but with the legged TM is shown in fig. 1b. This TM has another design and the IMCS along with the other motion control methods. *But this TM also must carry out the control goal given by the supervisory module.*

In our system the robot IMCS is designed as a local area network, the nodes of which are modules. Therefore the supervisory module that performs the robot control function must organize the local area network. Put it differently the supervisory module is the network control module (NCM).

### Interaction between modules in case of the robot motion organization

Consider the interaction procedure between the TM and the NCM by the example of typical motion task. The modular robot must go to the goal position from the initial position in two cases: if the NCM doesn't have an environment map (fig. 2a) and if the NCM has an environment map (fig. 2b).

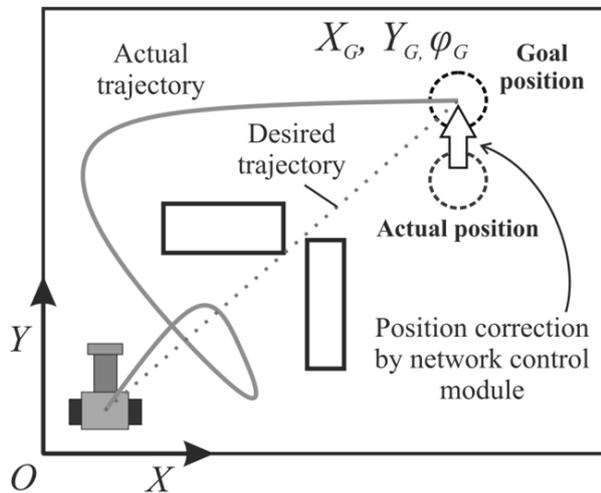


Figure 2a – The robot motion in the unknown environment

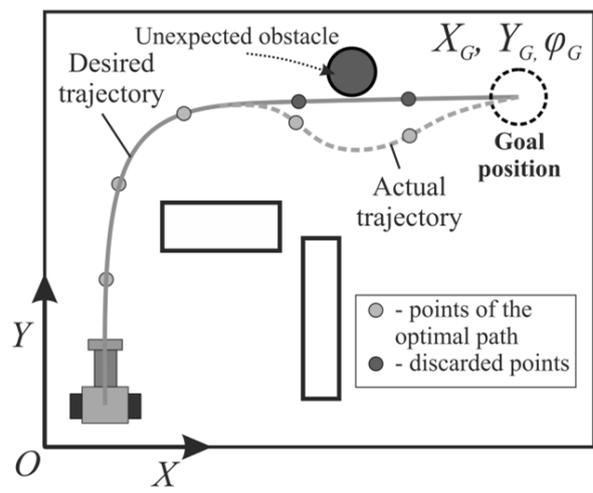


Figure 2b – The robot motion in the known environment with an unexpected obstacle

In both cases the interaction between the TM and the NCM is defined by the next sequence of actions:

1. The NCM and the TM establishing the connection and begin to exchange with initial data (IP addresses of the TM and the NCM in the shared robot network, used interfaces, data conversion method in the TM etc.).
2. The NCM sends to the TM the data about the goal position as set of three numbers:  $X_G, Y_G$  - coordinates of the goal position in the world coordinate frame ( $OXY$ ),  $\phi_G$  - orientation angle at the goal position.
3. The TM goes to the goal position and avoids obstacles using for this the data from the SRSM.

4. If the goal position is reached (or not reached) the TM stops and sends to the NCM information about the robot actual position and the message that the task was completed (or not completed).

When the robot doesn't have information about an environment (fig. 2a) the robot motion is not optimal and the arrival to the goal position is not guaranteed. In this case the NCM corrects a robot position error. If the robot motion occurs in the known environment but with an unexpected obstacle the NCM can define optimal path as the set of the goal positions (fig. 2b). The robot must consequently visit each position to get to the main goal. If the unexpected obstacle obstructs the robot motion then the TM is trying to avoid it by itself requesting the new goal position from the NCM at the same time. This new goal position must satisfy a rebuilt optimal path.

Interaction between the SRSM and the TM is a one-way communication. While the robot moves to the goal the SRSM preprocesses the sensor data and sends it to the TM. For the localization in the environment the TM uses the sensor data from the SRSM and the encoder data.

### The control method for smooth robot motion using the artificial forces

**The general problem definition.** Let the NCM has defined a set of the nodal points for the robot motion -  $(X_1, Y_1), \dots, (X_i, Y_i), \dots, (X_n, Y_n) = (X_G, Y_G)$ , where  $(X_G, Y_G)$  - the goal position coordinates. Let us assign the neighborhood (circle) of the acceptable deviation with the radius  $\varepsilon_i$  to the  $i^{th}$  nodal point ( $i = \overline{1, n}$ ). The TM takes the set of the nodal points from the NCM. After that the TM must visit every neighborhood of the each  $i^{th}$  nodal point for the desired path following and arrival to the goal position .

**The main idea of the method.** Let us assign the artificial attractive force  $F_i$  in every nodal point applied to the robot. The force magnitude is defined by the two-dimensional Gauss function:

$$F_i = F_0 \cdot e^{-\left[ (w_{x_i} (X'_i - X'_{c_i}))^2 + (w_{y_i} (Y'_i - Y'_{c_i}))^2 \right]},$$

where  $F_0$  - the attractive force basis magnitude,  $X'_i, Y'_i$  - the robot coordinates with respect to the turned Gauss function coordinate frame -  $O_i x_i y_i$ ,  $w_{x_i}, w_{y_i}$  - real numbers that define the width of the Gauss function along  $x_i$  and  $y_i$  axes of the  $O_i x_i y_i$  respectively,  $X'_{c_i}, Y'_{c_i}$  - coordinates of the Gauss function center with respect to the  $O_i x_i y_i$ . The every Gauss function is turned through the angle  $\gamma_i$  with respect to the  $OX$  axis of the world coordinate frame, where  $\gamma_i$  is the angle between the line segment connecting the  $i-1$  and  $i$  nodal points and  $OX$  axis.

For the smooth robot motion near the nodal points the artificial orbital and repulsive forces are used. That forces act around the special points – barycenters. In this research the barycenters are the nodal points. The  $j^{th}$  artificial orbital force magnitude is defined by:

$$F_{orb_j} = s_j F_{orb_0} \cdot e^{-\left[ (w_j^o (X_r - X_j^b))^2 + (w_j^o (Y_r - Y_j^b))^2 \right]} \quad (1)$$

where  $s_j$  - the orbital force direction defining variable ( $s = \pm 1$ ),  $F_{orb_0}$  - the orbital force basis magnitude,  $w_j^o$  - the real value that defines the orbital and the repulsive force area of action with the center at the barycenter,  $X_j^b, Y_j^b$  - the  $j^{th}$  barycenter coordinates with respect to the world coordinate frame. The  $j^{th}$  repulsive force magnitude  $F_{rep_j}$  is defined by the formula similar to the (1):

$$F_{rep_j} = -F_{rep_0} \cdot e^{-\left[ (w_j^o (X_r - X_j^b))^2 + (w_j^o (Y_r - Y_j^b))^2 \right]}$$

where  $F_{rep_0}$  - the repulsive force basis magnitude.

The linear velocity of the robot  $V$  is proportional to the projection of the total force applied to the robot onto an  $O'x$  axis of the robot coordinate frame. The angular velocity of the robot is proportional to the projection of the total force applied to the robot onto an  $O'y$  axis:

$$V = \frac{K_v}{M_r} F_x, \quad \omega = \frac{K_\omega}{J_r} F_y,$$

where  $K_v$  - the linear velocity gain,  $M_r$  - the modular robot mass,  $F_x$  - the total force projection onto an  $O'x$  axis,  $K_\omega$  - the angular velocity gain,  $J_r$  - the modular robot moment of inertia around the vertical axis of rotation,  $F_y$  - the total force projection onto an  $O'y$  axis.

Using this method the robot trajectory is defined not only by the nodal points, but also by the parameters  $F_0, w_{x_i}, w_{y_i}, F_{orb_0}, w_j^o, F_{rep_0}$ . In this research these parameters were obtained by experiments.

From the analysis of the simulation results it is clear that the robot motion nearby the nodal points can be successfully performed without using the orbital and repulsive forces (fig. 3a). The robot trajectory is smooth, linear and angular velocities change continuously (fig. 3b)

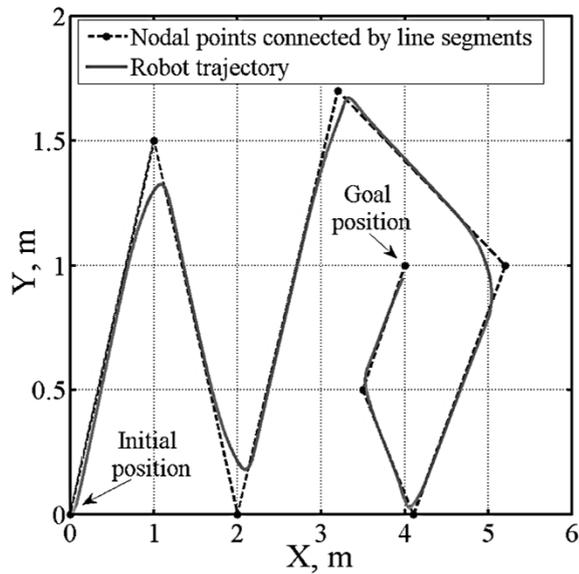


Figure 3a – The robot motion nearby the nodal points

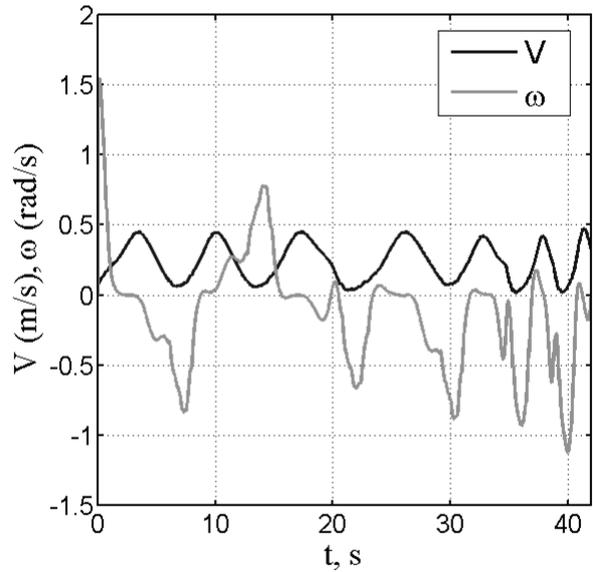


Figure 3b – The linear and angular velocities of the robot

The orbital and repulsive forces provide an opportunity to make robot trajectories similar to B-splines for example. The simulation result of the robot motion with all acting forces is shown in fig. 4a. One can see from the plot that the robot trajectory is similar to **B**-spline. The corresponding linear and angular velocities are shown in fig. 4b.

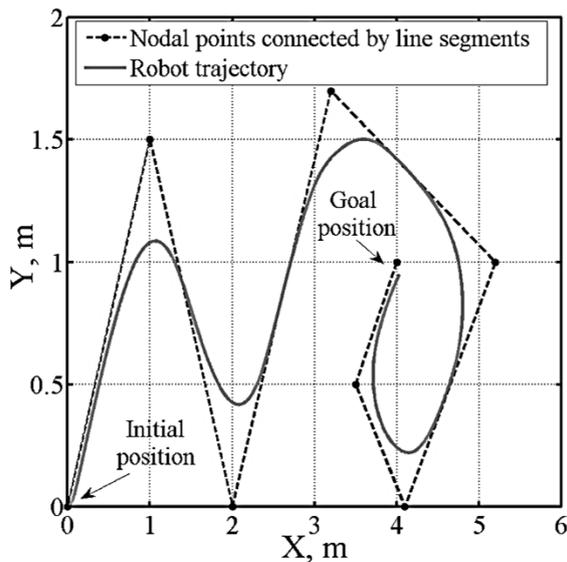


Figure 4a – The robot motion along trajectory similar to **B**-spline

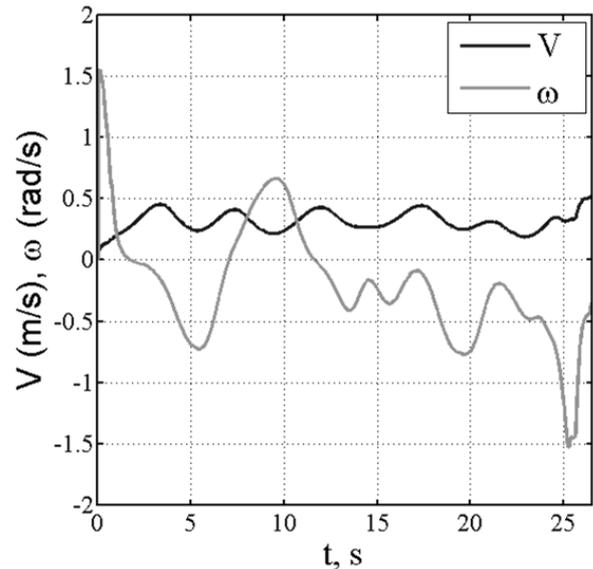


Figure 4b – The corresponding linear and angular velocities of the robot

Notice that the velocities change smoothly and when the angular velocity increases in modulus the linear velocity drops to enable the robot to make the turn.

Consider the following example. The modular robot must pass through the door by consequently visiting the set of nodal points given by NCM: (1, 1.5), (2.3, 1.5), (2.3, 0.4). Fig. 5a shows the trajectory of the robot, fig. 5b shows the velocities of the robot and the path curvature (reduced 4 times in accordance with a scale).

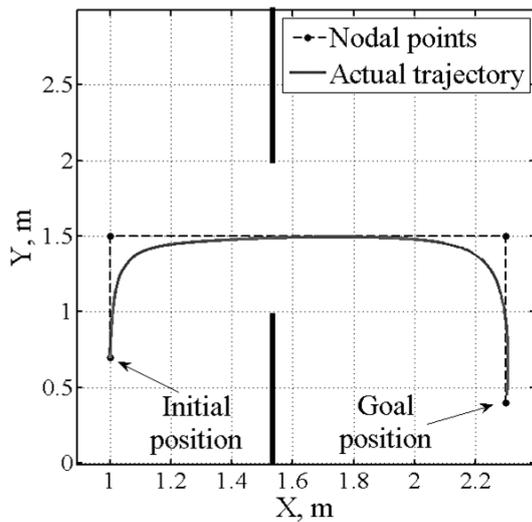


Figure 5a – The robot trajectory as it goes through the door

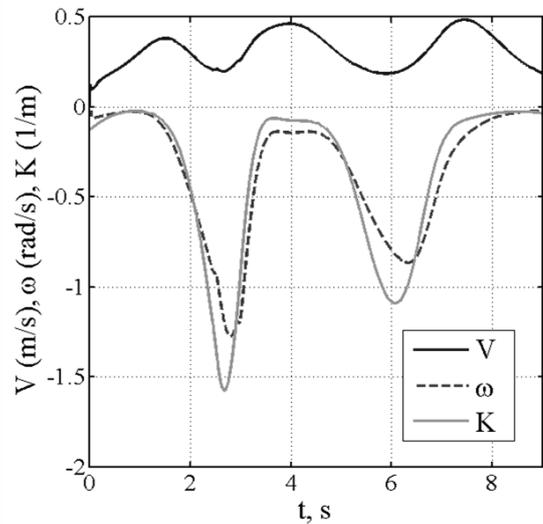


Figure 5b – The linear and angular velocities of the robot and the path curvature

Notice how the linear velocity drops at higher curvature values in modulus. It means that robot slows down at turns and accelerates at straight-line segments of the robot path.

**The main advantage of the proposed method** – *the robot can move along the complex trajectories without their preparatory definition*. In that case there is no need to use the complex control laws for path following that used for example in [5 - 7]. The proposed method allows the mobile robot to move along the smooth and continuous paths. Future work consists of implementation of this method in the laboratory prototype of the modular mobile robot.

### Conclusion

The necessary procedures for the information interaction between the transport module and the network control module were defined. The features of inter-modular communication in the system with distributed control and full functionality modules were considered by the example of mobile robotics motion tasks in an environment with obstacles. The new method for mobile robot motion planning nearby the nodal points with the artificial forces was introduced. The method allows the mobile robot to move along the smooth and continuous paths that similar to  $B$ -splines.

This work is supported by the Russian Foundation for Basic Research: grant 16-07-00811a, 16-07-00935a и 16-07-01264a.

1. Fitch R.C. Heterogenous Self-Reconfiguring Robotics: PhD thesis proposal. - New Hampshire (USA), Hanover: Dartmouth College, 2004. – 31 pp.
2. Andreev V. Network-based Design of Heterogeneous Modular Mobile Robotic Systems / Andreev, V. & Poduraev, Y. // 27th International DAAAM Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation 2016, Proceedings of a meeting held 26-29 October 2016, Mostar, Bosnia and Herzegovina, B. Katalinic (Ed.), ISBN 978-1-5108-3300-5. Curran Associates, Inc., NY 12571 (Jan 2017). – pp. 0004-0009.
3. Andreev, V.P. The network solutions in architecture of heterogeneous modular mobile robots / Andreev V.P., Kim V.L., Poduraev Y.V. // Robotics and technical Cybernetics. ISSN 2310-5305. – 2016. – №3(12). – P. 23-29.
4. Andreev V.P., Kim V.L. Development of functional units of a heterogeneous modular mobile robot // In Proceedings of the International Scientific and Technical Conference “Extreme Robotics”. – St. Petersburg, 2016. – C. 363 – 369.
5. Gulati S., Kuipers B. High performance control for graceful motion of an intelligent wheelchair // Proc. 2008 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA, May 2008), pp. 3932–3938.

6. Lapiere L. Nonsingular path following control of unicycle in the presence of parametric modeling uncertainties/ Lapiere L., Soetanto D., Pascoal A. // International Journal of Robust Nonlinear Control. – 2006. – N 16. – pp. 485 – 503.
7. Nefedov G.A. Movement stabilization along the given path for the two-wheeled robot with a differential drive // Scientific periodical of the Bauman MSTU “Science and education” electronic journal. - 2013. - № 4. – С. 131 – 140.

**В.П. Андреев, В.Л. Ким**

## **ОРГАНИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ТРАНСПОРТНОГО МОДУЛЯ В СОСТАВЕ ГЕТЕРОГЕННОГО МОДУЛЬНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА<sup>14</sup>**

*МГТУ «СТАНКИН», МЛ «Сенсорика», МИНОТ РГГУ, Москва  
andreevvipa@yandex.ru, top7733@gmail.com*

### **Аннотация**

В работе рассмотрены особенности информационного взаимодействия транспортного модуля с модулем-супервизором для случая полной функциональности модулей, составляющих гетерогенный модульный мобильный робот. Взаимодействие рассматривается на примере типовых задач мобильной робототехники. В работе предложен новый метод управления для осуществления плавного движения модульного робота с использованием, так называемых, искусственных сил. Метод позволяет роботу двигаться по траекториям, близким к **B**-сплайнам, без их предварительного построения.

Ключевые слова: мобильный робот, модульный робот, гетерогенный модульный робот, транспортный модуль, система управления, распределённое управление.

### **Введение**

В настоящее время модульный принцип построения робототехнических систем активно развивается и применяется. Модульные роботы универсальны, обладают функциональной гибкостью и характеризуются рядом отличительных свойств, выделяющих их из широкого разнообразия робототехнических систем.

Существующие модульные мобильные роботы (МР) разделяются на два типа: гомогенные и гетерогенные [1]. В данной работе рассматривается гетерогенный модульный МР. Отличительной особенностью гетерогенных роботов является *дифференциация модулей по их функциям*, поэтому модули в гетерогенных системах неравноправны.

**Цель настоящей работы** – разработка метода организации движения транспортного модуля (ТМ) при получении целей управления от модуля-супервизора в гетерогенном модульном МР. Разработка данного гетерогенного модульного МР (назовём его FCMBot – roBot with Functional Complete Modules) осуществляется в рамках концепции, основные положения которой рассматривались в [2, 3]. Некоторые особенности конструкции и системы управления ТМ были изложены в [4].

### **Основные задачи исследования:**

1. Рассмотреть применение принципа распределённого управления для анализа информационного взаимодействия транспортного модуля и модуля-супервизора.
2. Определить последовательность действий при реализации информационного обмена между транспортным модулем и модулем-супервизором.
3. Разработать метод плавного движения транспортного модуля вблизи заданных опорных точек.

### **Концепция проекта определяется следующими основными принципами:**

1. Каждый модуль является функционально-завершённым электронным или мехатронным устройством со своей собственной информационно-измерительной и управляющей системой (ИИУС) – *принцип распределённого управления*.
2. ИИУС робота строится как локальная вычислительная сеть, узлами которой являются *модули*.

### **Распределённое управление**

В основе распределённого управления лежит принцип функциональной завершённости, который заключается в том, что каждый модуль робота самостоятельно выполняет задачу, поставленную перед

ним модулем-супервизором (модулем общего управления). Супервизор выдаёт цель управления, но контролирует лишь *результат* её достижения модулем-исполнителем, а не процесс (за исключением экстренных ситуаций). Отсюда следует, что в зависимости от вариантов исполнения модуля конструкция и ИИУС модуля могут быть различными. Это является **основным отличием** робота FSMBot от большинства гетерогенных роботов, где модули-супервизоры контролируют работу всех модулей на *исполнительном уровне*. Данное решение упрощает язык межмодульного общения и существенно сокращает межмодульные информационные потоки.

Рассмотрим последовательность действий при реализации информационного обмена между ТМ и модулем-супервизором на следующем примере. Пусть МР включает в себя следующие модули: модуль-супервизор, колёсный транспортный модуль, сенсорные модули и модуль электропитания (силовой модуль) (рис.1а).

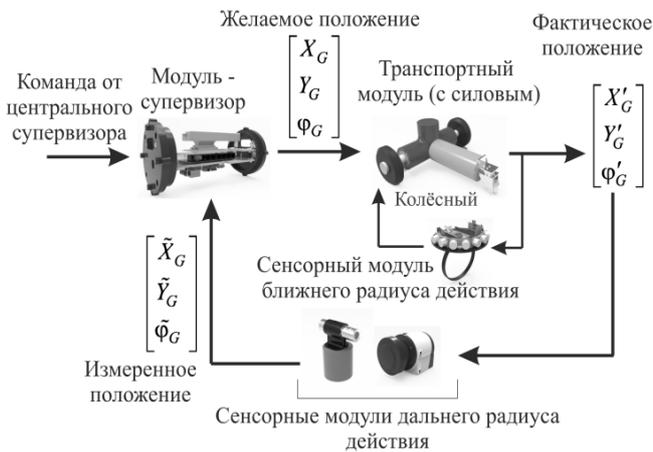


Рисунок 1а – Пример функциональной завершенности колёсного ТМ

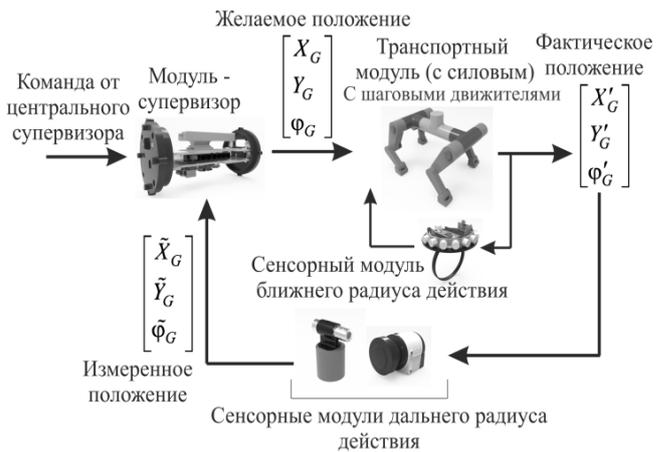


Рисунок 1б – Пример функциональной завершенности шагающего ТМ

Модуль-супервизор отправляет в ТМ цель управления – вектор желаемого положения робота  $[X_G, Y_G, \varphi_G]^T$ , где  $X_G, Y_G$  – координаты характеристической точки робота относительно базовой системы координат (БСК),  $\varphi_G$  – угол его ориентации. Колёсный ТМ должен **самостоятельно** достичь это целевое положение, используя информацию, получаемую от *сенсорного модуля ближнего радиуса действия* (СМБД). Так как ТМ использует сенсорный модуль с ограниченной областью действия, его фактическое положение, определяемое вектором  $[X'_G, Y'_G, \varphi'_G]^T$ , отличается от желаемого. Поскольку положение ТМ определяет положение всего МР, точность отработки цели управления контролирует модуль-супервизор при помощи *сенсорных модулей дальнего радиуса действия*. Сравнивая вектор измеренного положения  $[\tilde{X}_G, \tilde{Y}_G, \tilde{\varphi}_G]^T$  с желаемым, модуль-супервизор при необходимости корректирует реальное положение робота (например, задавая новую цель управления).

На рис.1б. представлена та же модульная система, но с шагающим ТМ. Этот ТМ имеет другую конструкцию и иное решение ИИУС, и реализует иные методы управления. *Но этот ТМ, так же, как и колёсный, должен обрабатывать заданную модулем-супервизором цель управления.*

В нашем случае ИИУС робота строится как локальная вычислительная сеть, узлами которой являются модули. Тогда на модуль-супервизор, выполняющий функцию общего управления функционированием робота, дополнительно возлагается функция организации сети. Иными словами, модуль-супервизор это модуль сетевого управления – МСУ.

### Взаимодействие модулей при организации движения робота

Рассмотрим процедуру взаимодействия ТМ и модуля сетевого управления на примере типовой задачи перемещения робота из начального положения в целевое для случая отсутствия карты местности у МСУ (рис.2а), и в случае её наличия у МСУ (рис.2б).

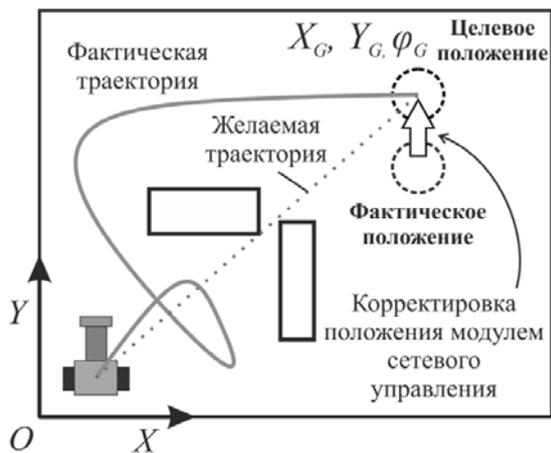


Рисунок 2а – Движение модульного робота в неизвестной среде

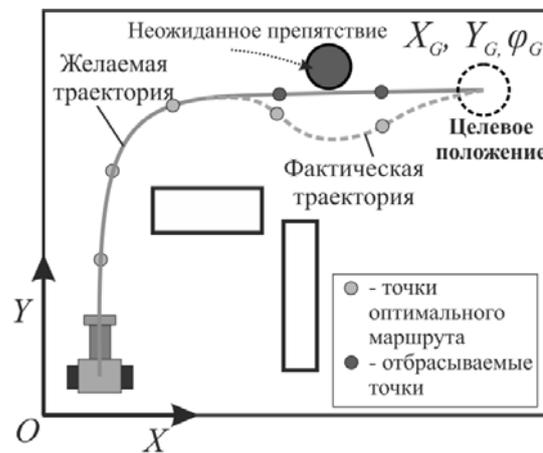


Рисунок 2б – Движение модульного робота в известной среде с неожиданным препятствием

В обоих случаях взаимодействие МСУ и ТМ описывается следующей последовательностью действий:

1. МСУ и ТМ устанавливают соединение и обмениваются первоначальными данными (IP-адреса модулей ТМ и МСУ в общей сети робота, используемые интерфейсы, способ преобразования данных в ТМ и т.д.).
2. МСУ отправляет в ТМ информацию о целевом положении в виде трёх чисел:  $X_G$ ,  $Y_G$  – координаты целевой точки в БСК ( $OXY$ ) и  $\varphi_G$  – угол ориентации в этой точке.
3. ТМ перемещается в целевое положение, при необходимости объезжая препятствия, для обнаружения которых использует данные СМБД.
4. Если целевое положение достигнуто (или не достигнуто), ТМ останавливается и отправляет в МСУ информацию о своём фактическом положении и сообщение о выполненном задании (или о невыполнении задания и причинах).

Когда информация об окружающей среде неизвестна (см. рис.2а), движение робота неоптимальное, и точное прибытие в целевую позицию не гарантируется. В этом случае МСУ корректирует позиционную ошибку робота. Если движение происходит в известной среде, но с неожиданным препятствием (см. рис.2б), МСУ может формировать оптимальный маршрут в виде набора целевых точек, которые последовательно должен посетить робот для достижения главного целевого положения. При возникновении неожиданного препятствия ТМ пытается самостоятельно его объехать, запрашивая при этом новую целевую позицию у МСУ, которая удовлетворяла бы перестроенному оптимальному маршруту.

Взаимодействие СМБД с ТМ является односторонним: СМБД в процессе движения робота осуществляет *предобработку сенсорных данных* и отправляет их в ТМ. Для локализации в среде ТМ использует сенсорные данные СМБД и одометрические данные энкодеров.

### Организация плавного движения робота с использованием метода управления, основанного на искусственных силах

**Общая постановка задачи.** Пусть в МСУ определён некоторый набор узловых (опорных) точек движения робота –  $(X_1, Y_1), \dots, (X_i, Y_i), \dots, (X_n, Y_n) = (X_G, Y_G)$ , где  $(X_G, Y_G)$  – координаты целевого положения. И пусть каждой  $i$ -й точке ( $i = 1, \dots, n$ ) поставлена в соответствие окрестность (окружность) допустимого отклонения от этой точки с радиусом  $\varepsilon_i$ . Транспортный модуль, получив от МСУ этот набор точек, должен последовательно посетить каждую  $i$ -ю точку в пределах её окрестности  $\varepsilon_i$  для того, чтобы пройти желаемый путь и достичь целевое положение.

**Суть метода.** Каждой узловой точке робота ставится в соответствие искусственная сила притяжения  $F_i$ , которая действует на робот. Величина силы определяется двумерной функцией Гаусса:

$$F_i = F_0 \cdot e^{-\left[ (w_{x_i} (X'_i - X'_G))^2 + (w_{y_i} (Y'_i - Y'_G))^2 \right]},$$

где  $F_0$  – базовое значение силы притяжения,  $X'_i, Y'_i$  – координаты робота в системе координат, связанной с повернутой функцией Гаусса ( $O_i x_i y_i$ ),  $w_{x_i}, w_{y_i}$  – вещественные числа, определяющие

ширину функции Гаусса вдоль осей  $x_i$  и  $y_i$  системы координат  $O_i x_i y_i$  соответственно,  $X'_{c_i}, Y'_{c_i}$  – координаты центра функции Гаусса в системе координат  $O_i x_i y_i$  (обычно  $Y'_{c_i} = 0$ ).

Каждая функция Гаусса повернута на угол  $\gamma_i$  относительно оси  $OX$  БСК, где  $\gamma_i$  – угол между отрезком прямой, соединяющей  $i-1$  и  $i$  узловые точки, и осью  $OX$  базовой системы координат.

Для сглаживания движения робота вблизи узловых точек дополнительно используются искусственные орбитальные и отталкивающие силы, действующие вокруг специально подобранных точек – *барицентров*. В настоящей работе этими точками являются сами узловые точки. Величина  $j$ -й ( $j = \overline{1, n-1}$ ) искусственной орбитальной силы определяется выражением:

$$F_{orb_j} = s_j F_{orb_0} \cdot e^{-\left[ (w_j^o (X_r - X_j^b))^2 + (w_j^o (Y_r - Y_j^b))^2 \right]}, \quad (1)$$

где  $s_j$  – переменная, определяющая направление действия орбитальной силы ( $s = \pm 1$ ),  $F_{orb_0}$  – базовое значение орбитальной силы,  $X_r, Y_r$  – координаты робота в БСК,  $w_j^o$  – вещественная величина, определяющая область действия орбитальной силы и силы отталкивания от барицентра,  $X_j^b, Y_j^b$  – координаты  $j$ -го барицентра, заданные относительно БСК.

Величина силы отталкивания  $F_{rep_j}$  от  $j$ -го барицентра определяется по формуле, аналогичной формуле (1):

$$F_{rep_j} = -F_{rep_0} \cdot e^{-\left[ (w_j^o (X_r - X_j^b))^2 + (w_j^o (Y_r - Y_j^b))^2 \right]},$$

где  $F_{rep_0}$  – базовое значение силы отталкивания.

Линейная скорость  $V$  робота пропорциональна проекции равнодействующей всех приложенных к роботу сил на ось  $O'x$  системы координат, связанной с роботом, угловая скорость  $\omega$  пропорциональна проекции равнодействующей всех сил на ось  $O'y$ :

$$V = \frac{K_v}{M_r} F_x, \quad \omega = \frac{K_\omega}{J_r} F_y,$$

где  $K_v$  – коэффициент усиления линейной скорости,  $M_r$  – масса модульного робота,  $F_x$  – проекция равнодействующей всех сил на ось  $O'x$ ,  $K_\omega$  – коэффициент усиления угловой скорости,  $J_r$  – момент инерции модульного робота относительно вертикальной оси вращения,  $F_y$  – проекция равнодействующей всех сил на ось  $O'y$ .

При использовании данного метода траектория движения робота определяется не только узловыми точками, но и параметрами  $F_0, w_{x_i}, w_{y_i}, F_{orb_0}, w_j^o, F_{rep_0}$ , которые на данном этапе исследования подбирались экспериментально.

Моделирование показало, что движение робота вблизи узловых точек успешно выполняется и без использования орбитальных сил и сил отталкивания (рис.3а). Траектория движения является гладкой, линейная и угловая скорости изменяются плавно (рис.3б).

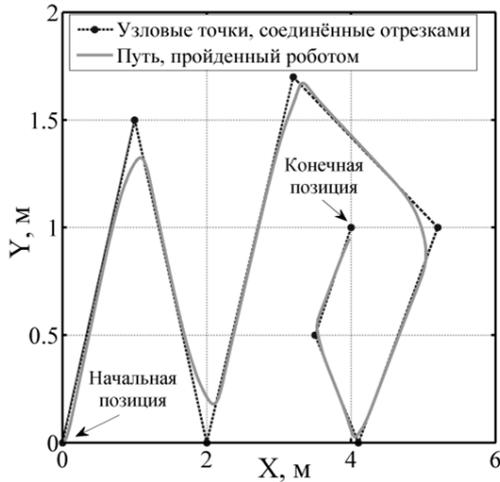


Рисунок 3а – Движение робота вдоль отрезков

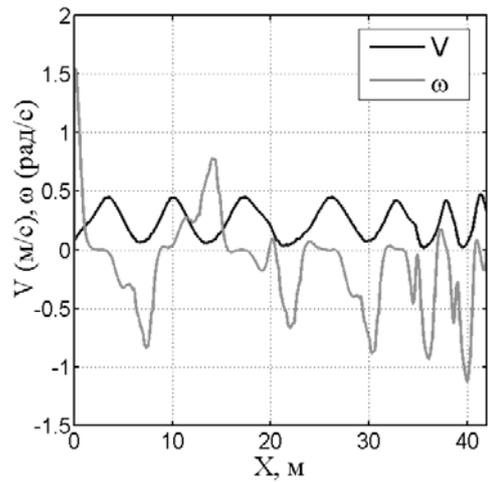


Рисунок 3б – Линейная и угловая скорости робота при движении по отрезкам

Орбитальные и отталкивающие силы необходимы для того, чтобы траектория движения робота была подобна, например, **B**-сплайну. На рис.4а представлен результат моделирования движения робота при действии всех сил. Видно, что траектория близка к **B**-сплайну. Соответствующие графики изменения линейной и угловой скорости робота при движении робота по сплайну показаны на рис.4б.

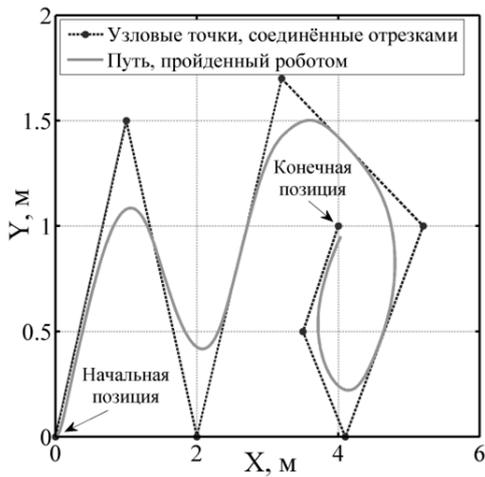


Рисунок 4а – Движение робота по траектории, подобной **B**-сплайну

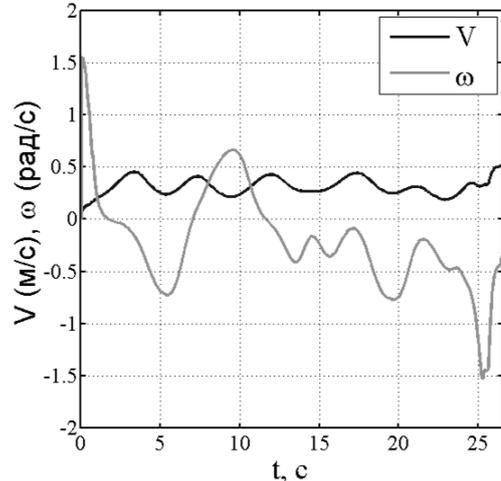


Рисунок 4б – Линейная и угловая скорости робота при движении по сплайну

Из графиков видно, что скорости изменяются плавно, причём в те моменты времени, когда угловая скорость увеличивается по модулю, линейная скорость уменьшается.

Рассмотрим пример, в котором модульный робот должен проехать через дверной проём, последовательно обходя заданный МСУ набор точек: (1, 1.5), (2.3, 1.5), (2.3, 0.4). На рис.5а показана траектория, по которой двигался робот, на рис.5б – графики изменения скоростей  $V$  и  $\omega$ , а также величина кривизны траектории (уменьшена в 4 раза для соответствия масштабу).

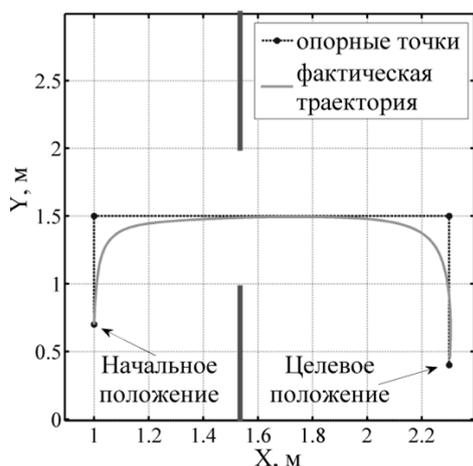


Рисунок 5а – Траектория робота при прохождении через дверной проём

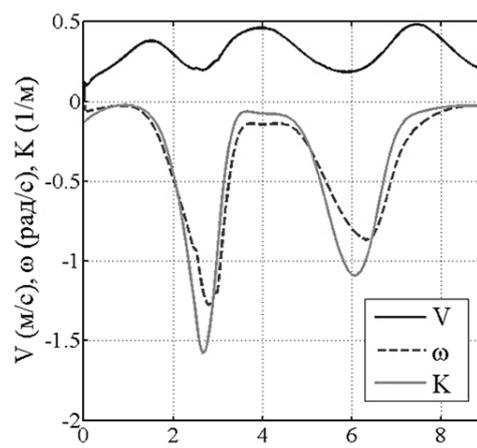


Рисунок 5б – Линейная и угловая скорости робота и кривизна траектории

В те моменты времени, когда величина кривизны по модулю возрастает, величина линейной скорости убывает, т. е. робот замедляется на поворотах и ускоряется на прямолинейных участках.

**Основное преимущество** предложенного метода заключается в том, что *можно осуществлять движение по сложным траекториям без их предварительного построения*. Тогда отпадает необходимость в использовании сложных законов управления для отслеживания этих траекторий, как, например, в [5 - 7]. Используемый метод позволяет получить гладкий и непрерывный закон управления движением мобильного робота. В дальнейшем планируется реализовать предложенный метод на реальном прототипе гетерогенного модульного мобильного робота.

### Заключение

Определены необходимые процедуры для реализации информационного взаимодействия транспортного модуля и модуля сетевого управления в составе гетерогенного модульного мобильного робота. Особенности межмодульной коммуникации в системе с распределённым управлением для варианта полной функциональности модулей рассмотрены на примере типовых задач движения мобильного робота в среде с препятствиями. Предложен метод планирования движения робота вблизи узловых точек с использованием искусственных сил. Метод позволяет роботу осуществлять плавное движение по гладким траекториям без их предварительного построения.

Работа выполняется при частичной поддержке РФФИ: гранты 16-07-00811а, 16-07-00935а и 16-07-01264а.

1. Fitch R.C. Heterogenous Self-Reconfiguring Robotics: PhD thesis proposal. – New Hampshire (USA), Hanover: Dartmouth College, 2004. – 31 pp.
2. Andreev, V. & Poduraev, Y. Network-based Design of Heterogeneous Modular Mobile Robotic Systems / 27th International DAAAM Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation 2016, Proceedings of a meeting held 26-29 October 2016, Mostar, Bosnia and Herzegovina, B. Katalinic (Ed.), ISBN 978-1-5108-3300-5. Curran Associates, Inc., NY 12571 (Jan 2017), – P. 0004-0009.
3. Андреев В.П. Сетевые решения в архитектуре гетерогенных модульных мобильных роботов / Андреев В.П., Ким В.Л., Подураев Ю.В. // Робототехника и техническая кибернетика. ISSN 2310-5305. – 2016. – №3(12). – С.23-29.
4. Андреев В.П., Ким В.Л. Разработка функциональных узлов гетерогенного модульного мобильного робота // Экстремальная робототехника. Труды международной научно-технической конференции. – Санкт-Петербург, 2016. – С. 363 – 369.
5. Gulati S., Kuipers B. High performance control for graceful motion of an intelligent wheelchair / Proc. 2008 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA, May 2008), pp. 3932–3938.
6. Lapiere L. Nonsingular path following control of unicycle in the presence of parametric modeling uncertainties/ Lapiere L., Soetanto D., Pascoal A. // International Journal of Robust Nonlinear Control. – 2006. – N 16. – pp. 485 – 503.
7. Нефедов Г.А. Стабилизация движения двухколесного робота с дифференциальным приводом по заданному пути / Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электронный журнал - 2013. - № 4. – С. 131 – 140.

## INTERMODULAR COMMUNICATION METHOD FOR HETEROGENEOUS MODULAR ROBOT<sup>XVI</sup>

MSTU "STANKIN", IL "Sensorika", IINET RSUH, Moscow,  
andreevvipa@yandex.ru, cpp.create@gmail.com

### Abstract

In this paper, we present approaches for creating a specification for the method of intermodular interaction, based on the principles of ROS while taking into account the principle of full functionality of modular mobile robot construction. The software and hardware complex and program interfaces of intermodule communication are described, the results of experiments are given.

Keywords: mobile robot, modular robot, control system, local area network, intermodular communication.

### Introduction

This work is the part of the research work on creation of a heterogeneous modular mobile robot (MR) for a wide range of purposes. The heterogeneous modular MR is a system of individual functional devices that, when connected to one of a finite number of configurations, constitute a synergetic system - a mobile robot with executive, tactical and strategic control levels.

In 1987, Japanese specialists introduced the CEBOT modular robot [1]. This is the first of the known mobile robots, which is heterogeneous and fully modular, implying the unity of interfaces. Modular robots are divided into *homogeneous* and *heterogeneous*.

**Homogeneous** robots consist of many identical modules. Each module contains all the components necessary for it to function - motors, propellers, batteries, control systems, etc. In fact, a homogeneous modular robot is a superposition of a set of individual identical robots. An example of such robots is the modular robot M-TRAN [2]. Despite the simplicity of the movements carried out by one module, many modules, built into a certain structure, can perform complex coordinated movements. M-TRAN, as well as other homogeneous robots, for example, ATRON [3] and TRANSMOTE [4], have a common feature - all of them, even having united in the general structure, *do not form a common full-fledged distributed control system*. Each of the modules is independent, but all of the modules are controlled by one module-supervisor via *execution level commands*. The difficulty for a supervisor to control such modules directly is worth noting as it is necessary to develop additional software that translates the supervisor commands into a sequence of motion commands for individual modules, and, in general, this software runs on an external computer, rather than being embedded in the modules themselves.

**Heterogeneous** robots consist of a finite set of modules of different functionality that are connected to each other through unified mechanical and electrical interfaces. Unlike homogeneous, the modules of heterogeneous robots, in general, cannot function normally without each other.

SMART [5] and Thor [6] are heterogeneous robots. Each of these robots is a set of different modules and submodules (separate mechanical components of modules). The Thor robot is the direct successor of the homogeneous ODIN modular robot [7], including intermodular communication both robots use RS-485 bus. The SMART robot is slightly different - one of its modules, connected via a Bluetooth wireless channel to the supervisor, becomes the master on the CAN bus through which it manages other modules, relaying commands received from the supervisor and the data from the other modules back to the supervisor via Bluetooth. In other words, all modules are driven by one module-supervisor on executive level only. Like homogeneous robots, they do not implement *a full-fledged distributed control system*.

The most advanced in the field of intermodular interaction are the previously mentioned CEBOT and a modular robot for space research [8]. For them it is stated that all modules communicate with every other module - the modules have additional horizontal connections, which, for example, allowed the automatic configuration in the CEBOT modules

For each of the listed robots, developers have created special software that allows building the CS intended only for this design, which does not allow the use of third-party modules in the design. This, in turn, makes it very difficult to implement such a modular robot property as **operational reconfiguration**, which is especially important in cases of maximum uncertainty of the conditions of forthcoming works, i.e. in case of extreme situations, accidents, disasters and active counteractions, when it is not possible to determine in advance the composition and configuration of the necessary robotics [9].

The task of creating a *full-fledged distributed control system* for modular robots that is capable of dynamically changing its structure and incorporating third-party modules into the robot design is **topical**.

The *intermodular communication* method is being developed on top of functional-modular principle of modular mobile robot construction [10]:

1. Each module is a *functionally completed* electronic or mechatronic device with its own information measuring and control system (IMCS) - *the principle of distributed control*.
2. IMCS of a robot is a local area network with modules as nodes.
3. Incorporation of any mechatronic device in the network structure of a robot is done using special software – *drivers*.

*Functional completeness* is a property of every module to be able to execute on its own the task that is given to it by a module-supervisor (some general control system) [11]. Then a distributed control system is a system with mostly independent control processes, distributed between modules' computers, interacting with each other via intermodular communication method. Therefore, the **aim** of this paper is to develop an appropriate language (method) for intermodular communication (application program interfaces (API) of interaction).

The following tasks were completed in order to achieve this aim:

1. The type and topology of the communication network is selected.
2. The method of interaction of modules is developed.
3. The hardware and software requirements for the modules are defined.
4. Modules' systems of commands were developed.
5. New network protocols were developed and well-known network protocols were modified to implement the inter-module communication API.

#### Communication networks: choosing type and topology

Modern modular robots, both homogeneous and heterogeneous, to achieve better modules' miniaturization and minimization of the number of mechanical interfaces' contacts, use *different serial busses*:

- CAN – robots M-TRAN and SMART;
- IrDA (in fact RS-232) – robot ATRON;
- RS-485 – robots Thor and Odin;
- TRANSMOTE robot uses ZigBee interface – a serial bus in a wider meaning.

From the above review it is clear that communication in known modular robots is most often based on a topology of the "bus" type with local branches (Fig. 1). Topology "bus" most fully reflects the structure of the modular robot - each module has several "neighbors" through which it interacts with the rest of the system. The disadvantage of such buses is their low throughput. But in the above constructions, the bandwidth is sufficient, since such robots have, in fact, two ways to function: (1) execute a set of simple rules that the authors placed in the microcontroller ROM in each of the modules, and (2) execute the commands from an external computer, supplied through a module to the bus of which (and, hence, to the common bus of the all connected modules) this computer is connected. This means that the role of the intermodular interaction system is small and, in fact, reduces only to the most rapid and efficient transmission of executive or tactical level commands and the readings of the sensors. Then the information flow in the process of intermodular interaction is small, since each module have either none or just a few of sensors and, in fact, it is necessary to transmit only executive level commands.

Many companies are now using the Ethernet standard. Its expansion for real-time operation EtherCAT has become the new standard among industrial field busses due to the versatility of the Ethernet standard [12]. A comparison of the various existing networks is given in Table 1.

Table 1. Different networks' features

Features	RS-485	CAN	Ethernet	EtherCAT
Real time	Hard <sup>(1)</sup>	Hard	Soft	Hard
Main topologies	Bus	Bus	Point-to-pont, various <sup>(2)</sup>	Point-to-pont, bus, various <sup>(3)</sup>
Top bandwidth (on certain connection length)	10 Mbit/s at 10 m	1 Mbit/s at 40 m	100 Mbit/s, 1 Gbit/s at 100 m	100 Mbit/s at 100 m

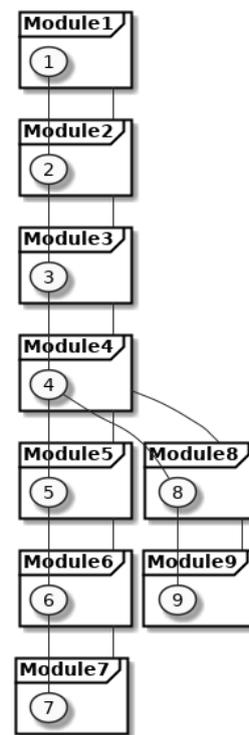


Figure 1 – «Bus» topology

Features	RS-485	CAN	Ethernet	EtherCAT
Collisions handling	Not defined	CR <sup>(4)</sup>	CD <sup>(4)</sup>	Master-Slave <sup>(5)</sup>
Service data length, bit	80 <sup>(6)</sup>	44 or 64 <sup>(7)</sup>	464 or 336 <sup>(8)</sup>	160
Max data length, бит	2088 <sup>(9)</sup>	64	11536 or 11664 <sup>(8)</sup>	11888
Prevalence of equipment	High	Average	Very high	Low
Equipment cost	From low to average	From average to high	From low to average	High

Notes: (1) – implementation dependent, standard does not defines this variable; (2) – topology can be both bus and star, depending on devices used; (3) – can have any topology, but most devices support bus topology; (4) - CAN is a synchronous bus with Collision Resolving (CR), (not Collision Detect (CD) as in Ethernet), it transmits messages deterministically; (5) – use a special frame format made by master device, which are read from and written to by slave devices, this ensures synchronicity of bus at all times; (6) – for MODBUS implementation; (7) – regular and extended frame format; (8) –TCP and UDP protocols respectively; (9) –MODBUS implementation strictly regulates length of a message.

The principle of functional completeness of the modules eliminates the need to send executive level commands – only upper (tactical and strategic) level commands are transmitted. In this case, the “softer” requirements to the delivery time of messages and the use of interfaces with "soft real time" are acceptable. In our case, we are going to use in the robot’s sensor system a large number of different sensors and a multi-camera system of technical vision. Therefore, the intermodule communication channel must be broadband. According to the data in table 1, Ethernet is the most high-speed interface, and the wide prevalence of the corresponding equipment ensures its low cost. In the case of EtherCAT, all intermodule communication must occur via the "master" of the bus, which reduces the efficiency of direct inter-module communication. Although Ethernet cannot be considered as a hard real-time protocol, but, as noted above, there is no need.

Ethernet is not a bus by definition – it uses “one-to-one” connections. One can make it as one by installing switches between nodes enabling “one-to-many” connections. This design enables both bus and star topologies.

Fig. 1 and Fig. 2 show the topologies "bus" and "star" superimposed on the topology of a modular robot. The choice of topology must be made on the basis of the requirements for the desired frequency of messaging, requirements for assembly and economic indicators, as well as taking into account the limitations of the network functioning of a particular topology. A comparison of these topologies is presented in table 2.

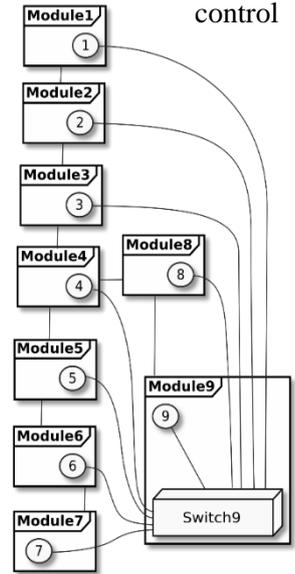


Figure 2 – “Star” topology for Ethernet

Table 2. Topologies comparison

Features	Bus	Star
Centralization	Decentralized	Centralized
Switch count	$n$ switches with $s + m_i$ $s + m_i$ interfaces	1 switch with $\sum_{i=1}^n m_i$ interfaces
Ethernet lines, passing though each module	$s + m_i$ lines from switch to other modules	In the worst case ( $\sum_{i=1, i \neq i_c}^n m_i$ ) – $m_k$ lines, where $i_c$ $i_c$ – module with a switch
Additional restrictions	Max 4 switches on the path of “point-to-point” connection to minimize collisions	None

Variables, used in table 2:  $n$  – count of modules in a robot;  $m_i$   $m_i$  – count of Ethernet connections per module (in most cases  $m_i = 1$ );  $s$  – count of potential module neighbors (in most cases either 2 or 6).

As can be seen from the table, both topologies have drawbacks – The “bus” requires either to use a large number of switches, or to integrate several Ethernet interfaces into each device (similar to EtherCAT), whereas the “star” causes a much larger number of wires to be laid. The latter, in our case, does not have a significant value, since the wired system of the local computer network is located within the small dimensions of the robot design. Therefore, it is proposed to use the topology “star”.

### **Communication networks: intermodular communication method**

One of the most known intermodular communication method is ROS (Robotics Operation System) framework [13]. To use ROS, one needs a computer with a Linux-like operating system (OS), for which there is a port of ROS. Also, a large number of visualization, simulation and debugging tools were developed for it. At the moment ROS has several disadvantages it was not designed to work directly on microcontrollers and it requires installation of a quite complex and voluminous software. Therefore, it is necessary to develop such a system so that it would be, on one hand, compatible with ROS and, on the other hand, convenient to implement on embedded systems.

Previous approach, proposed in [14], was based in Internet-laboratory library (zmq\_robot)[15]. It is built on top of ZMQ library [16] and allows creation of both modules' control systems and supervisor client software. This library has the same disadvantages as ROS – it requires installation of complex software, which only works on full-fledged OS, but not on embedded systems.

Intermodular communication method specification was created to solve this problem. It takes into account full functionality property of modules. For communications it is proposed to use ZMQ library instead of zmq\_robot. In addition to ZMQ it is proposed to use UDP protocol with broadcast messages.

### **Hardware and software requirements for control systems' implementation**

Hardware and software of module's control system, in a minimum implementation, must have a computing device capable of working in the Ethernet through UDP protocol and with computing power sufficient to realize functional purpose of the module. It should have minimal possible cost, sizes and mass. As it was noted earlier, a distributed robot's CS as a whole is formed from the hardware and software of all modules. Due to the distribution of calculations between the microprocessors of the CS modules, the robot has a higher performance compared to conventional control systems that are built on a single computer. The analysis of microcomputers of various manufacturers was carried out, among which a multicriteria Pareto optimization was carried out. The optimal candidates for hardware are Arduino Uno with Ethernet Shield, Arduino Mega with Ethernet Shield, Taijiuno Due Pro R3, Seeeduino Cloud, 86duino ZERO, 86duino One and Raspberry Pi B Plus.

### **Modules' command systems**

Based on the principle of full functionality of the modules, it is possible to distinguish **transport, energy, information, communication, technological, auxiliary** functions and the **general control** function. Within the developed specification of the intermodule communication system, command systems have been developed for the following functional modules of the modular MR:

1. Transport module provides movement of the robot (transport function).
2. Power module provides power supply to electronic and electromechanical components of the robot, and their safe switching on and off (energy function).
3. Sensor system: short-range and long-range sensor modules - modules provide search for obstacles and objects of manipulation at different distances and provide sensory information to other modules (information function).
4. The network management module – provides control of the robot as a whole, synchronizes information interaction of all modules, performs information processing and setting of tasks coming from the external supervisor of the robot, generates and distributes tasks between modules, being thus a supervisor for them, creates and controls The operation of the radio channel (communication function and the function of the general control system).

### **Conclusion**

To study the efficiency of the developed method of intermodular communication, a working model of a modular MR was created, consisting of: a wheeled transport module (Arduino Yun running OpenWRT), a power module (Arduino Mega with an Ethernet Shield module) and a network management module (Raspberry Pi B+ running Arch Linux ARM). Control programs for the IMCS of modules were created on top of the above specification. For the power module, as the least productive part of the system, it was possible to achieve a message exchange rate of up to 500 Hz. The experiments showed the effectiveness of the proposed solutions.

The work is carried out with the partial support of the RFBR: grants 16-07-00811a, 16-07-00935a and 16-07-01264a.

1. Concept of cellular robotic system (CEBOT) and basic strategies for its realization / Toshio Fukuda, Tsuyoshi Ueyama, Yoshio Kawauchi, Fumihito Arai // Computers Elect Engng Vol. 18, №1, - C. - 11-39

2. Development of a Self-Reconfigurable Modular Robotic System / Kohji Tomita, Satoshi Murata, Eiichi Yoshida, Haruhisa Kurokawa, Akiya Kamimura and Shigeru Kokaji // *Sensor Fusion and Decentralized Control in Robotic Systems III*, Proceedings of SPIE, Vol. 4196, pp. 469-476, 2000.
3. Modular ATRON: Modules for a self-reconfigurable robot / Morten Winkler JBrgensen, Esben Hallundbaek Bstergaard, Henrik Hautop Lund // *Proceedings 01 2004 IEEEIRSI International Conference on Intelligent Robots and Systems* – P. 2068-2073.
4. Design of Transmote: a Modular Self-Reconfigurable Robot with Versatile Transformation Capabilities / Guifang Qiao, Guangming Song, Jun Zhang, Hongtao Sun, Weiguo Wang, Aiguo Song // *Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics* - P.1331-1336.
5. Baca J. A heterogeneous modular robotic design for fast response to a diversity of tasks / J. Baca, M. Ferre, and R. Aracil // *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 60, no. 4, pp. 522–531, 2012.
6. On sub-modularization and morphological heterogeneity in modular robotics / Lyder A.H., Stoy K., Mendoza-Garcia R.-F., Larsen J.C., and Hermansen P. // *Intelligent Autonomous Systems 12*, volume 193 of *Advances in Intelligent Systems and Computing*, pp. 649-661. Springer Berlin Heidelberg, 2013.
7. Reusable Electronics and Adaptable Communication as Implemented in the Odin Modular Robot / Ricardo Franco Mendoza Garcia, Andreas Lyder, David Johan Christensen and Kasper Stoy // *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation* – P. 1152-1158.
8. Hancher M. D., Hornby G. S. "A modular robotic system with applications to space exploration" / *2nd IEEE International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology (SMC-IT'06)* Pasadena, CA, 2006, P. 8-132.
9. Lopota A.V., Yurevich E.I. Stages and prospects for the development of a modular principle for the construction of robotic systems / *St. Petersburg State Polytechnical University Journal*. – n.1, 2013 // *Informatics. Telecommunications. Control*. - SPb.: Publishing house of Polytechnic University, 2013. - C.98 - 103.
10. Andreev, V.P. The network solutions in architecture of heterogeneous modular mobile robots / Andreev V.P., Kim V.L., Poduraev Y.V. // *Robotics and technical Cybernetics*. ISSN 2310-5305. – 2016. – №3(12). – P. 23-29.
11. Andreev V.P. The principle of the full functionality of modules in heterogeneous modular mobile robots / V.P. Andreev, V.L.Kim, P.F.Pletenev // *Extreme robotics. Proceedings of international scientific-technical conference of ER-2017*. – SPb (this volume).
12. EtherCAT Technology Group, Industrial Ethernet Technologies, URL: [https://www.ethercat.org/download/documents/Industrial\\_Ethernet\\_Technologies.pdf](https://www.ethercat.org/download/documents/Industrial_Ethernet_Technologies.pdf) (access date: 17.03.2016).
13. ROS: an open-source Robot Operating System / Morgan Quigley, Brian Gerkey, Ken Conley, Josh Faust, Tully Foote, Jeremy Leibs, Eric Berger, Rob Wheeler, Andrew Ng // *ICRA workshop on open source software*. – 2009. – T. 3. – №. 3.2. – C. 5.
14. Andreev V.P. Pletenev P.F. Developing inter-modular communication for heterogeneous mobile robot / *Extreme robotics. Proceedings of international scientific-technical conference of ER-2017*. - SPb: OOO “A4Print”, 2016. – C.250 – 255.
15. Kirsanov K. Software architecture of control system for heterogeneous group of mobile robots. 25th DAAAM Int. Symp. on Intelligent Manufacturing and Automation, 2014. *Procedia Engineering* (2015) ISSN 1877-7058, 2015. – V.100. – P.216 – 221.
16. Hintjens, Pieter. "OMQ - The Guide." 2011. URL: <http://zguide.zeromq.org/page:all>. (access date: 17.03.2016).

## **МЕТОД МЕЖМОДУЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ГЕТЕРОГЕННОМ МОДУЛЬНОМ МОБИЛЬНОМ РОБОТЕ<sup>15</sup>**

*МГТУ «СТАНКИИ», МЛ «Сенсорика», МИНОТ РГГУ, Москва,  
andreevvipa@yandex.ru, cpp.create@gmail.com*

### **Аннотация**

В настоящей работе представлены подходы для создания спецификации метода межмодульного взаимодействия, основанные на принципах ROS и учитывающие принцип полной функциональности модулей гетерогенного модульного мобильного робота. Описаны программно-аппаратный комплекс и программные интерфейсы межмодульного общения, приведены результаты экспериментов.

Ключевые слова: мобильный робот, модульный робот, система управления, локальная вычислительная сеть, межмодульное взаимодействие.

### **Введение**

Настоящая работа является частью научно-исследовательской работы по созданию гетерогенного модульного мобильного робота (МР) широкого назначения. Гетерогенный модульный МР – это конструкция из отдельных функциональных устройств, которые, будучи соединены в одну из конечного числа конфигураций, составляют синергетическую систему – мобильный робот с исполнительным, тактическим и стратегическим уровнями управления.

В 1987 японские специалисты представили модульный робот SEVOT [1]. Это первый из известных МР, который является гетерогенным и полностью модульным, подразумевающим единство интерфейсов. Модульные роботы разделяют на *гомогенные* и *гетерогенные*.

**Гомогенные** роботы состоят из множества одинаковых модулей. Каждый модуль содержит в себе все необходимые для работы компоненты – двигатели, движители, аккумуляторы, системы управления и т.д. По сути, гомогенный модульный робот – это суперпозиция множества отдельных одинаковых роботов. Примером таких роботов является модульный робот M-TRAN [2]. Несмотря на простоту выполняемых одним модулем движений, множество модулей, построившись в некую структуру, могут выполнять сложные согласованные движения. M-TRAN, как и другие гомогенные роботы, например, ATRON [3] и TRANSMOTE [4], имеют общую особенность – все они, даже объединившись в общую структуру, *не образуют полноценную распределённую систему управления (СУ)*. Несмотря на то, что каждый из модулей независим, управление работой всех модулей осуществляется модулем-супервизором на *исполнительном уровне*. Также стоит отметить сложность управления супервизором модулями напрямую – необходимо разрабатывать дополнительное программное обеспечение (ПО), которое переводит команды супервизора в последовательности команд движения для отдельных модулей, причём, как правило, это ПО работает на внешнем компьютере, а не заложено в сами модули.

**Гетерогенные** роботы состоят из конечного набора модулей различной функциональности, которые соединяются друг с другом через унифицированные механические и электрические интерфейсы. В отличие от гомогенных, модули гетерогенных роботов, как правило, не могут нормально функционировать друг без друга.

К классу гетерогенных относятся роботы SMART [5] и Thor [6]. Каждый из данных роботов – это набор различных модулей и субмодулей (отдельных механических компонент модулей). Робот Thor является прямым наследником гомогенного модульного робота ODIN [7], включая системы взаимодействия – в обоих роботах используется шина RS-485. Робот SMART несколько отличается – один из его модулей, подключённый по беспроводному каналу сети Bluetooth к супервизору, становится ведущим на шине CAN, через которую он управляет другими модулями, транслируя полученные от супервизора команды, а полученные от остальных модулей данные отсылает через радиоканал супервизору. Иными словами, управление работой всех модулей осуществляется модулем-супервизором на *исполнительном уровне*. Как и в случае гомогенных роботов, в них не реализована *полноценная распределённая система управления*.

Наиболее развитыми в сфере межмодульного взаимодействия являются упомянутый ранее SEVOT и модульный робот для космических исследований [8]. Для них заявлено, что все модули общаются со всеми – у модулей имеются дополнительные горизонтальные связи, что позволило, например, реализовать автоматическую конфигурацию в модулях SEVOT.

Для каждого из перечисленных роботов разработчики создали специальное ПО, позволяющее строить предназначенную только для данной конструкции СУ, что не позволяет в конструкции использовать разработки сторонних производителей. Это, в свою очередь, существенно затрудняет реализацию такого свойства модульного робота, как **оперативное реконfigurирование**, особенно значимое для использования роботов в случаях максимальной неопределённости условий предстоящих работ, т.е. в случае экстремальных ситуаций, аварий, катастроф и активных противодействий, когда нет возможности заранее определить состав и конфигурацию необходимой робототехники [9].

Задача создания *полноценной распределённой системы управления* для модульных роботов, способной динамично менять свою структуру и включать в конструкцию робота модули сторонних производителей, является **актуальной**.

В основу разрабатываемого *метода межмодульного взаимодействия* положен функционально-модульный принцип построения гетерогенного модульного робота [10]:

1. Каждый модуль является *функционально завершённым* электронным или мехатронным устройством со своей собственной информационно-измерительной и управляющей системой (ИИУС) – *принцип распределённого управления*.
2. ИИУС робота строится как *локальная вычислительная сеть*, узлами которой являются модули.
3. Включение любых мехатронных устройств в сетевую структуру робота осуществляется с помощью специального программного обеспечения – *драйверов*.

*Функциональная завершённость* означает, что каждый модуль робота должен быть способен самостоятельно выполнять задачу, поставленную перед ним модулем-супервизором (некоторым модулем общего управления) [11]. Тогда распределённая система управления – это такая система, процессы управления в которой максимально независимы друг от друга и распределены между вычислителями модулей, а коммуникация процессов происходит через метод сетевого взаимодействия. Поэтому **целью** настоящей работы является разработка соответствующего языка (метода) межмодульного общения (программных интерфейсов взаимодействия).

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Выбраны тип и топология коммуникационной сети.
2. Разработан метод взаимодействия модулей.
3. Определены требования к аппаратно-программному обеспечению модулей.
4. Разработана система команд управления модулями.
5. Разработаны новые и модифицированы известные сетевые протоколы для реализации программных интерфейсов межмодульного взаимодействия.

### Коммуникационные сети: выбор типа и топологии

В современных модульных роботах, как гомогенных, так и гетерогенных, в связи миниатюризацией самих модулей и минимизацией количества контактов на механических интерфейсах, используются различные *последовательные шины*:

- CAN – в роботах M-TRAN, SMART;
- IrDA (по сути RS-232) – в роботе ATRON;
- RS-485 – в роботе Thor, Odin.

Последовательная шина, в широком смысле, используется и на роботе TRANSMOTE – там используется беспроводной интерфейс ZigBee.

Из приведённого обзора видно, что чаще всего коммуникация в известных модульных роботах строится на топологии типа «шина» с локальными ответвлениями (рис.1). Топология «шина» наиболее полно отражает структуру модульного робота – каждый модуль имеет нескольких «соседей», через которых он взаимодействует со всей остальной системой. Недостатком таких шин является их низкая пропускная способность. Но в перечисленных конструкциях пропускной способности достаточно, поскольку у таких роботов есть, по сути, два варианта работы: (1) обрабатывать набор простых правил, которые авторы поместили в ПЗУ микроконтроллера в каждом из модулей, и (2) обрабатывать команды внешнего компьютера, подаваемые модулям через какой-либо один модуль, к шине которого (а значит, и к общей шине соединённых модулей) подключён компьютер. Это означает, что роль системы межмодульного взаимодействия мала и сводится, фактически, только к наиболее быстрой и эффективной

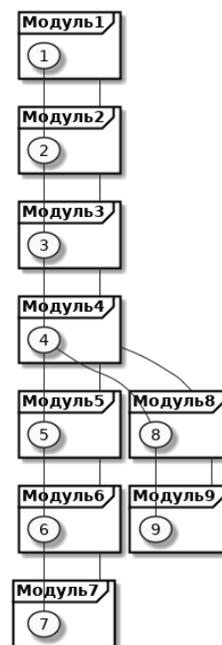


Рисунок 1 – Топология типа

передаче команд исполнительного или тактического уровня и показаний датчиков. Тогда информационный поток в процессе межмодульного взаимодействия невелик, поскольку на каждом модуле либо нет датчиков, либо их установлено не так много и, фактически, необходимо передавать лишь команды исполнительного уровня.

Многие компании в настоящее время переходят к использованию стандарта Ethernet. Его расширение для работы в реальном масштабе времени EtherCAT стало новым стандартом среди промышленных сетей благодаря универсальности стандарта Ethernet [12]. Сравнение различных существующих сетей приведено в таблице 1.

Таблица 1. Свойства различных сетей

Характеристики	RS-485	CAN	Ethernet	EtherCAT
Реальное время	Жёсткое <sup>(1)</sup>	Жёсткое	Мягкое	Жёсткое
Основные топологии	Шина	Шина	Точка-точка, разные <sup>(2)</sup>	Точка-точка, шина, разные <sup>(3)</sup>
Максимальная скорость (на указанной длине соединения)	10 Мбит/с на 10 м	1 Мбит/с на 40 м	100 Мбит/с, 1 Гбит/с на 100 м	100 Мбит/с на 100 м
Механизм борьбы с коллизиями	Не определён	CR <sup>(4)</sup>	CD <sup>(4)</sup>	Master-Slave <sup>(5)</sup>
Служебная информация, бит	80 <sup>(6)</sup>	44 или 64 <sup>(7)</sup>	464 или 336 <sup>(8)</sup>	160
Макс. длина сообщения, бит	2088 <sup>(9)</sup>	64	11536 или 11664 <sup>(8)</sup>	11888
Распространённость оборудования	Высокая	Средняя	Очень высокая	Низкая
Цены на оборудование	От низких до средних	От средних до высоких	От низких до средних	Высокие

*Примечания:* (1) – зависит от реализации, стандарт не определяет этот параметр; (2) – топология может быть как «шина», так и «звезда», зависит от дополнительного оборудования; (3) – может иметь любую топологию, однако большинство устройств поддерживают топологию «шина»; (4) - CAN является синхронной шиной с типом доступа Collision Resolving (CR, разрешение коллизии), который, в отличие от Collision Detect (CD, обнаружение коллизии) в сетях Ethernet, детерминировано обеспечивает доступ на передачу сообщения; (5) – использует специальный формат кадра, который формирует ведущее устройство, а ведомые читают обращённые к ним части кадра и записывают в кадр свои значения, тем самым достигается контроль занятия шины в каждый момент времени; (6) – для реализации MODBUS; (7) - для обычного и расширенного формата кадра; (8) – для протоколов TCP и UDP соответственно; (9) – для реализации MODBUS длина сообщений строго фиксирована.

Использование принципа функциональной завершенности модулей снимает необходимость в передаче команд исполнительного уровня – передаются только команды верхних (тактического и стратегического) уровней. В этом случае допустимы более «мягкие» требования к времени доставки сообщений и использование интерфейсов с «мягким реальным временем». В нашем случае мы планируем использовать в сенсорной системе робота многокамерную систему технического зрения, большое количество разнообразных датчиков. Следовательно, межмодульный коммуникационный канал должен быть широкополосным. Согласно данным таблицы 1, Ethernet является наиболее скоростным интерфейсом, а широкая распространённость соответствующего оборудования обеспечивает его низкую стоимость. В случае EtherCAT всё межмодульное взаимодействие должно происходить через «ведущего» шины, что снижает эффективность прямого межмодульного взаимодействия. Хотя Ethernet не может считаться протоколом жёсткого реального времени, но, как отмечалось выше, в этом нет необходимости.

Сеть Ethernet изначально не является шиной – в ней используются соединения типа «один к одному». Возможно преобразовать её в «шину», установив в узлы сети коммутаторы (switch), которые добавляют

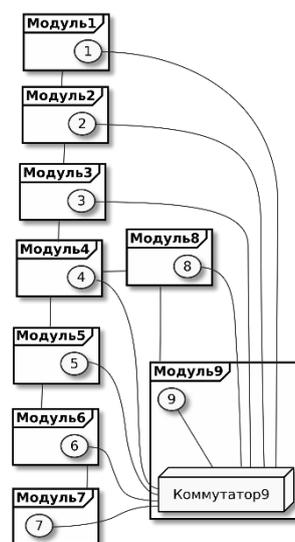


Рисунок 2 – Топология типа «звезда» для сети Ethernet

возможность создания соединений (топологии) типа «один ко многим». Такое решение обеспечивает два варианта топологий сети: «шина» и «звезда».

На рис.1 и рис.2 показаны топологии «шина» и «звезда», наложенные на топологию модульного робота. Выбор топологии необходимо производить на основании требований к желаемой частоте обмена сообщениями, требований к сборочными и экономическим показателям, а также с учётом ограничений функционирования сети той или иной топологии. Сравнение этих топологий представлено в таблице 2.

Таблица 2. Свойства различных топологий

Характеристики	Шина	Звезда
Централизованность	Децентрализованная	Централизованная
Количество коммутаторов	$n$ коммутаторов с $s + m_i s + m_i$ интерфейсами	1 коммутатор с $\sum_{i=1}^n m_i$ интерфейсами
Число линий Ethernet, проходящих через каждый модуль	$s + m_i s + m_i$ проводов от коммутатора до физических интерфейсов	В худшем случае $(\sum_{i=1, i \neq i_c}^n m_i) - m_k$ проводов, где $i_c$ – модуль с коммутатором
Дополнительные ограничения	Максимум 4 коммутатора на пути соединения «один к одному» для минимизации коллизий	нет

Описание переменных, используемых в таблице 2:  $n$  – число модулей в модульном мобильном роботе;  $m_i, m_i$  – число Ethernet-подключений в каждом модуле (чаще всего  $m_i = 1$ );  $s$  – число возможных соседей модуля (чаще всего 2, или 6).

Как видно из таблицы, обе топологии имеют недостатки – «шина» требует либо использовать большое число коммутаторов, либо встраивать в каждое устройство несколько интерфейсов Ethernet (по аналогии с EtherCAT), а «звезда» заставляет прокладывать значительно большее число проводов. Последнее, в нашем случае, не имеет существенного значения, поскольку проводная система локальной вычислительной сети располагается в пределах небольших размеров конструкции робота. Поэтому, *предлагается использовать топологию типа «звезда».*

#### Коммуникационные сети: метод взаимодействия модулей

Одним из самых известных методов межмодульного взаимодействия является программный каркас (framework) ROS (Robotics Operating System) [13]. Для использования ROS необходим компьютер с Linux-подобной операционной системой (ОС), для которой существует порт этой системы. Также для ROS разработано большое количество средств визуализации, симуляции и отладки. ROS на данный момент имеет несколько недостатков – он не ориентирован для работы непосредственно на микроконтроллерах, для работы с ним необходимо устанавливать на устройства довольно сложное и объёмное ПО. Следовательно, требуется создать такую систему, которая была бы совместима с ROS, но при этом была бы удобна для реализации на встраиваемых системах.

Предыдущий подход, предложенный в работе [14], основывался на библиотеке Интернет-лаборатории (zmq\_robot) [15]. Она построена на библиотеке ZMQ [16] и позволяет создавать как ПО для модулей, так и управляющие программы для супервизора. Однако эта библиотека имеет тот же недостаток, что и ROS – для работы с ней необходимо устанавливать на устройства сложное ПО, которое работает только на полноценных ОС, но не работает на встраиваемых системах.

Для решения этой проблемы была создана спецификация на метод межмодульного взаимодействия, учитывающая свойство полной функциональности модулей. Для организации взаимодействий здесь предлагается использовать библиотеку ZMQ, а не модификацию zmq\_robot. В дополнение к ZMQ предлагается использовать протокол UDP с широковещательными сообщениями, который даёт возможность реализовать спецификацию для встраиваемых систем. В отличие от ROS, каждый модуль имеет один общий для всех модулей интерфейс, через который предоставляет общую информацию о себе – имя модуля, его описание, функциональные интерфейсы и пр.

#### Требования к аппаратно-программной реализации системы управления

Аппаратно-программное обеспечение (АПО) системы управления модуля должно иметь, в минимальном исполнении, вычислительное устройство, способное работать в сети Ethernet по протоколу UDP с производительностью, достаточной для реализации функционального назначения

модуля. АПО должно иметь минимальные массогабаритные параметры и минимально возможную стоимость. Как было отмечено ранее, из АПО модулей формируется распределённая СУ робота в целом. За счёт распределения вычислений между микропроцессорами модулей СУ робота имеет более высокую производительность по сравнению с обычными системами управления, которые построены на одном вычислителе. Был выполнен анализ микроЭВМ различных производителей, среди которых была проведена многокритериальная оптимизация по Парето. Оптимальными для АПО являются Arduino Uno с доп. модулем Ethernet Shield, Arduino Mega с доп.модулем Ethernet Shield, Taijiuino Due Pro R3, Seeeduino Cloud, 86duino ZERO, 86duino One и Raspberry Pi B Plus.

### **Системы команд модулей**

По принципу полной функциональности модулей можно выделить **транспортную, энергетическую, информационную, коммуникационную, технологическую, вспомогательную** функции и функцию **общего управления**. В рамках разработанной спецификации системы межмодульного взаимодействия к настоящему времени разработаны системы команд для следующих функциональных модулей модульного МР:

1. Транспортный модуль – обеспечивает перемещение робота (транспортная функция).
2. Силовой модуль – обеспечивает энергоснабжение электронных и электромеханических компонент робота и их безопасное включение и отключение (энергетическая функция).
3. Сенсорная система: модули датчиков ближнего и дальнего радиуса действия – модули обеспечивают поиск препятствий и объектов манипулирования на разных дистанциях и предоставляют сенсорную информацию другим модулям (информационная функция).
4. Модуль сетевого управления – обеспечивает управление роботом в целом, синхронизирует информационное взаимодействие всех модулей, выполняет обработку информации и постановку задач, поступающих от внешнего супервизора робота, формирует и распределяет задания между модулями, являясь, таким образом, для них супервизором, создаёт и контролирует работу радиоканала (коммуникационная функция и функция общей системы управления).

### **Заключение**

Для исследования работоспособности разработанного метода межмодульной коммуникации был создан действующий макет модульного МР, состоящий из: 1 – колёсный транспортный модуль (Arduino Yun, ОС OpenWRT) с сенсорной системой, 2 – силовой модуль (Arduino Mega, Ethernet Shield) и 3 – модуль сетевого управления (Raspberry Pi B+, Arch Linux ARM). Для ИИУС модулей были созданы управляющие программы, работающие на основе представленной выше спецификации. Для силового модуля, как наименее производительной части системы, удалось добиться частоты обмена сообщениями до 500 Гц. Эксперименты показали эффективность предложенных решений.

Работа выполняется при частичной поддержке РФФИ: гранты 16-07-00811а, 16-07-00935а и 16-07-01264а.

1. Concept of cellular robotic system (CEBOT) and basic strategies for its realization / Toshio Fukuda, Tsuyoshi Ueyama, Yoshio Kawauchi, Fumihito Arai // Computers Elect Engng Vol. 18, №1, - С. - 11-39
2. Development of a Self-Reconfigurable Modular Robotic System / Kohji Tomita, Satoshi Murata, Eiichi Yoshida, Haruhisa Kurokawa, Akiya Kamimura and Shigeru Kokaji // Sensor Fusion and Decentralized Control in Robotic Systems III, Proceedings of SPIE, Vol. 4196, pp. 469-476, 2000.
3. Modular ATRON: Modules for a self-reconfigurable robot / Morten Winkler JBrgensen, Esben Hallundbaek Bstergaard, Henrik Hautop Lund // Proceedings 01 2004 IEEEIRSI International Conference on Intelligent Robots and Systems – P. 2068-2073.
4. Design of Transmote: a Modular Self-Reconfigurable Robot with Versatile Transformation Capabilities / Guifang Qiao, Guangming Song, Jun Zhang, Hongtao Sun, Weiguo Wang, Aiguo Song // Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics - P.1331-1336.
5. Baca J. A heterogeneous modular robotic design for fast response to a diversity of tasks / J. Baca, M. Ferre, and R. Aracil // Robotics and Autonomous Systems, vol. 60, no. 4, pp. 522–531, 2012.
6. On sub-modularization and morphological heterogeneity in modular robotics / Lyder A.H., Stoy K., Mendoza-Garcia R.-F., Larsen J.C., and Hermansen P. // Intelligent Autonomous Systems 12, volume 193 of Advances in Intelligent Systems and Computing, pp. 649-661. Springer Berlin Heidelberg, 2013.
7. Reusable Electronics and Adaptable Communication as Implemented in the Odin Modular Robot / Ricardo Franco Mendoza Garcia, Andreas Lyder, David Johan Christensen and Kasper Stoy // 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation – P. 1152-1158.

8. Hancher M. D., Hornby G. S. "A modular robotic system with applications to space exploration" / 2nd IEEE International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology (SMC-IT'06) Pasadena, CA, 2006, P. 8-132.
9. Лопота А.В., Юревич Е.И. Этапы и перспективы развития модульного принципа построения робототехнических систем. Научно-технические ведомости СПбГПУ 1' 2013. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2013. – С.98 – 103.
10. Андреев В.П. Сетевые решения в архитектуре гетерогенных модульных мобильных роботов / Андреев В.П., Ким В.Л., Подураев Ю.В. // Робототехника и техническая кибернетика. ISSN 2310-5305. – Санкт-Петербург: ЦНИИ РТК. – 2016. – №3(12). – С.23-29.
11. Андреев В.П. Принцип полной функциональности модулей в гетерогенных модульных мобильных роботах / Андреев В.П., Ким В.Л., Плетенев П.Ф. // Экстремальная робототехника. Труды международной научно-технической конференции ЭР-2017. – СПб (настоящий сборник).
12. EtherCAT Technology Group, Industrial Ethernet Technologies, URL: [https://www.ethercat.org/download/documents/Industrial\\_Ethernet\\_Technologies.pdf](https://www.ethercat.org/download/documents/Industrial_Ethernet_Technologies.pdf) (дата обращения: 17.03.2016).
13. ROS: an open-source Robot Operating System / Morgan Quigley, Brian Gerkey, Ken Conley, Josh Faust, Tully Foote, Jeremy Leibs, Eric Berger, Rob Wheeler, Andrew Ng //ICRA workshop on open source software. – 2009. – Т. 3. – №. 3.2. – С. 5.
14. Андреев В.П., Плетенев П.Ф. Разработка технологии межмодульного общения в гетерогенном модульном мобильном роботе / Экстремальная робототехника. Труды международной научно-технической конференции, 2016. – Санкт-Петербург: ООО «АП4Принт», 2016. – С.250 – 255.
15. Kirsanov K. Software architecture of control system for heterogeneous group of mobile robots. 25th DAAAM Int. Symp. on Intelligent Manufacturing and Automation, 2014. Procedia Engineering (2015) ISSN 1877-7058, 2015. – V.100. – P.216 – 221.
16. Hintjens, Pieter. "OMQ - The Guide." 2011. URL: <http://zguide.zeromq.org/page:all>. (дата обращения: 17.03.2016).

*D.A. Dobrynin*

## **PRINCIPLES OF LEARNING MANAGEMENT SYSTEM FOR EXOSKELETON CONTROL TASKS**

*Federal research center "Information and control", Russian Academy of Sciences*

### Annotation

The paper describes the basic principles of learning management system for active exoskeleton for rehabilitation. Management system built using dynamic JSM-method.

Keywords: exoskeleton, management system, JSM-method, machine learning.

*Д.А. Добрынин*

## **ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ОБУЧАЕМОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ЭКЗОСКЕЛЕТОМ**

*Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, г. Москва  
minirobot@yandex.ru*

### Аннотация

В работе описаны основные принципы построения обучаемой системы управления активным экзоскелетом для медицинской реабилитации. Система управления построена с использованием динамического ДСМ-метода.

Ключевые слова: экзоскелет, система управления, ДСМ-метод, машинное обучение.

### Введение

Экзоскелеты прочно входят в нашу жизнь и становятся важным инструментом, расширяющим возможности человека. Одной из важных задач является управление активным экзоскелетом для задач

медицинской реабилитации. Следует отметить, что во многих случаях по естественным причинам человек в такой системе является чисто пассивным звеном, например, при атрофии нижних конечностей или недостаточной подвижности. Движение экзоскелета в таких случаях происходит самостоятельно, человек задает желаемый режим движения – встать, подойти, присесть и т.п. К системам такого типа относятся, например, экзоскелет компании REX Bionics из Новой Зеландии и экзоскелет ExoLite Юго-Западного государственного университета из г. Курск (рис. 1). Для эффективного использования подобных систем важно обеспечить плавность движения, безопасность и подстройку движений под каждого конкретного человека.



Рисунок 1 – Экзоскелеты Exolite и REX Bionics

Эта задача может быть решена различными методами: от построения траектории математическими методами до различных методов искусственного интеллекта (ИИ). Так как активный экзоскелет является системой реального времени, то естественно, что при реализации предпочтение будет отдаваться методам, обладающим наименьшей вычислительной сложностью, при сохранении приемлемого качества управления. Одними из перспективных являются методы, основанные на обучении, позволяющие получить требуемый результат и обойтись без построения сложных математических моделей.

### 1. Постановка задачи

Рассмотрим активный экзоскелет, включающий пару ног с несколькими степенями свободы каждая (рис. 2). Для обучения движению можно использовать человека, одетого в конструктивно похожий экзоскелет с датчиками положения звеньев.

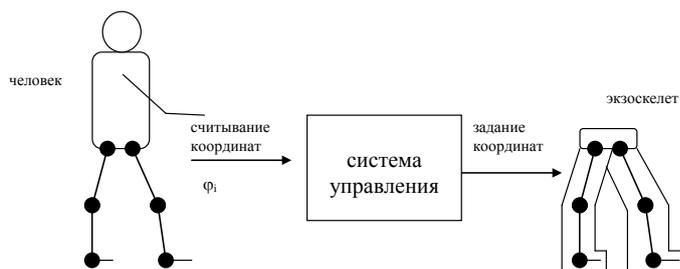


Рисунок 2 – Активный экзоскелет

Каждое звено характеризуется координатой  $\varphi_i$ , определяющей его положение и скоростью  $\dot{\varphi}_i$ . Система управления должна запомнить изменения координат и скорости, чтобы впоследствии выдавать требуемую траекторию для звеньев автономного экзоскелета. Эта задача похожа на задачу планирования траектории с тем отличием, что нужно учитывать силы инерции и положение центра тяжести.

Если рассматривать характер задания координат, то в простейшем случае используется линейная многомерная интерполяция исходных координатных функций с непрерывной первой производной (скоростью). Это связано с необходимостью управления приводами звеньев в мягком режиме – без рывков и резких остановов.

Сложность данной задачи заключается в необходимости одновременного управления многими степенями свободы. В соответствии с минимальными требованиями к экзоскелетам для реабилитации необходимо обеспечить для одной нижней конечности от 2 до 3 степеней свободы. Для двух ног такая система управления должна иметь уже 4-6 степеней свободы. При этом в режимах ходьбы, вставания, удержания равновесия и т.п. необходимо управлять всеми приводами, учитывая положение центра тяжести и силы инерции. Сложность математической модели такой системы достаточно высока, поскольку описывается системами уравнений 8-12 порядка. Для более сложных движений необходимо увеличивать количество степеней свободы, что еще больше усложняет задачу. Решение таких задач «в лоб» путем численного интегрирования в режиме реального времени на сегодняшний день не представляется возможным. Поэтому активно используются различные упрощенные подходы, позволяющие получить приемлемое решение [1].

Одним из методов построения обучаемой системы управления является использование нейронных сетей. Например, в работе [2] рассматривается применение нейронных сетей для планирования траектории сварочного робота-манипулятора с шестью степенями свободы в условиях сложной рабочей зоны с препятствиями. Недостатком использования нейронных сетей является экспоненциальный рост времени обучения при возрастании сложности (повышении точности), что не позволяет их обучать в реальном времени.

Другим перспективным методом, пригодным для построения обучаемой системы управления, является динамический ДСМ-метод [3]. На мобильном роботе «Амур» [4] проводились эксперименты по построению обучаемой системы управления с помощью двух методов: эволюционного моделирования (ЭМ) и динамического ДСМ-метода. В качестве примера было взято движение робота по контрастной полосе, когда робот имеет фотодатчики и двигается по полосе. Требовалось построить управляющую систему, которая бы заставляла робота корректно двигаться по этой полосе. Методы показали адекватность обученных систем поставленной задаче.

## 2. Динамический ДСМ-метод

Для создания системы управления, способной обучаться, можно построить классификатор входных сигналов с помощью ДСМ метода. ДСМ-метод автоматического порождения гипотез [5] является теорией автоматизированных рассуждений и способом представления знаний для решения задач прогнозирования в условиях неполноты информации. Классический ДСМ метод работает с замкнутым множеством исходных примеров, которое формируется экспертом и составляет базу знаний. Каждый пример описывается множеством элементарных признаков и наличием (или отсутствием) целевого свойства. С помощью специальных логических процедур из этой базы знаний ДСМ-система получает гипотезы, которые объясняют свойства исходных примеров из-за наличия или, наоборот, отсутствия в структуре примеров определенной совокупности признаков. Таким образом, ДСМ система выделяет из исходной информации в базе знаний существенные совокупности признаков, т. е. осуществляет автоматическую классификацию. ДСМ метод успешно применим в тех областях знаний, где пример можно представить в виде множества (или кортежа) элементарных признаков.

В отличие от классического ДСМ метода, который работает с замкнутым множеством исходных примеров и заранее определенными их свойствами, динамический ДСМ метод позволяет работать в открытой среде с неизвестным заранее количеством примеров [3].

Динамический ДСМ работает в двух режимах:

- режим обучения, когда происходит заполнение базы фактов (множество обучающих примеров) и генерируются гипотезы, составляющие базу знаний;
- рабочий режим, когда полученные ранее гипотезы используются для выработки сигналов управления.

Множество обучающих примеров – это множество пар вида

$$E = \{e_i\} = \{(\mathbf{X}_i, u^i)\},$$

где  $\mathbf{X}_i$  - вектор сигналов рецепторов,  $u^i$  – вектор управления (состояние исполнительных механизмов). Элементы векторов сигналов и управления представляются парами двоичных значений:

включено = {01}, выключено = {10}

не важно = {00}

Такое представление необходимо для корректного выполнения операций пересечения и вложения над битовыми строками.

Операция пересечения (нахождения общей части) двух объектов при использовании битовых строк реализуется с помощью логической функции «побитовое И». Операция вложения, отвечающая на

вопрос – входят ли все компоненты объекта А в объект В, реализуется как «побитовое И» элементов объектов А и В, а затем сравнение результата с элементами вкладываемого объекта А.

Гипотезы представляются в виде множества пар вида:

$$G = \{g_i\} = \{\{x_i, y^i\}\},$$

где  $x_i$  – часть вектора сигналов рецепторов,  $y^i$  – требуемый вектор управления (необходимое действие). Гипотезы существуют двух видов: положительные гипотезы определяют, при каком входном воздействии выполнять действия, приводящие к положительному результату; отрицательные гипотезы определяют, какие действия не нужно делать при данном входном воздействии.

В режиме обучения для формирования обучающих примеров используется внешняя система – так называемый «учитель». Данная система получает на вход информацию от рецепторов и вырабатывает управляющие сигналы, необходимые для адекватного поведения робота. Совокупность сигналов рецепторов и выработанных для них управляющих воздействий определяет один обучающий пример. Этот пример проверяется на уникальность и заносится ДСМ системой в базу фактов. После занесения каждого нового примера во множество обучающих примеров производится поиск гипотез. На полученные гипотезы могут накладываться дополнительные ограничения, например, запрет на контрпримеры, когда положительная гипотеза не должна вкладываться в отрицательные примеры и наоборот. Эти ограничения определяются используемым ДСМ-методом [5].

Полученное множество гипотез будет содержать все возможные пересечения (общие части) обучающих примеров. Далее среди них отбираются минимальные гипотезы, то есть такие, которые вкладываются в остальные. Тем самым количество «полезных» гипотез резко сокращается. Полученные минимальные гипотезы проверяются на уникальность и заносятся в базу знаний.

Обучение должно производиться до тех пор, пока база знаний не перестанет пополняться новыми гипотезами. Очевидно, что в этом случае обучающий алгоритм перебрал все возможные варианты входных воздействий, на которые он способен реагировать, и можно считать, что база фактов достаточно полна.

В рабочем режиме ДСМ система получает на вход сигналы рецепторов, из которых формируется тестовый вектор. Принятие решения происходит путем проверки вложения гипотез в этот вектор. Если в тестовый вектор сигналов рецепторов вкладывается гипотеза, то робот должен действовать в соответствии с ней. Если же ни одной гипотезы не найдено, то это неизвестное состояние, для которого нужно сформировать случайный вектор управления (или ничего не делать, например).

### 3. Обучение движению

Для обучения движению ДСМ-системы необходима внешняя система управления (учитель), которая принимает информацию от датчиков положения, их скорости и формирует управляющие воздействия (управляет двигателями) как показано на рис. 3.

В качестве такого учителя может выступать как сам человек, так и любая другая управляющая система. Например, в работе [6] рассматривалось обучение с помощью нечеткой системы управления.

Основным требованием к обучающей системе управления является непротиворечивость команд управления. В противном случае, такие противоречивые команды могут «ввести в заблуждение» обучаемую систему, что приводит к игнорированию противоречивых входных сигналов, и соответственно, снижению качества обучения.

Сам процесс обучения ДСМ-системы выглядит следующим образом:

- «учитель» получает входную информацию и вырабатывает управляющие воздействия. Вся эта информация подается в ДСМ-систему, при этом формируется т.н. «обучающий пример», который ДСМ-система заносит в базу фактов. Если в этой базе фактов такой пример уже есть, то ничего не происходит.

- если появляется новый обучающий пример, ранее не встречающийся в базе фактов, то в этом случае он передается ДСМ-решателю, который формирует с его помощью новую гипотезу. Если полученная гипотеза удовлетворяет критериям непротиворечивости, то она добавляется в базу гипотез.

- пополнение базы фактов и получение новых гипотез производится до тех пор, пока работает режим обучения.

Критерием завершения обучения может служить тот факт, что перестает пополняться база гипотез. Это означает, что на вход обучаемой системы не поступает новая информация. После окончания режима обучения ДСМ-система имеет набор гипотез, которые в дальнейшем используются для работы обученной системы управления.

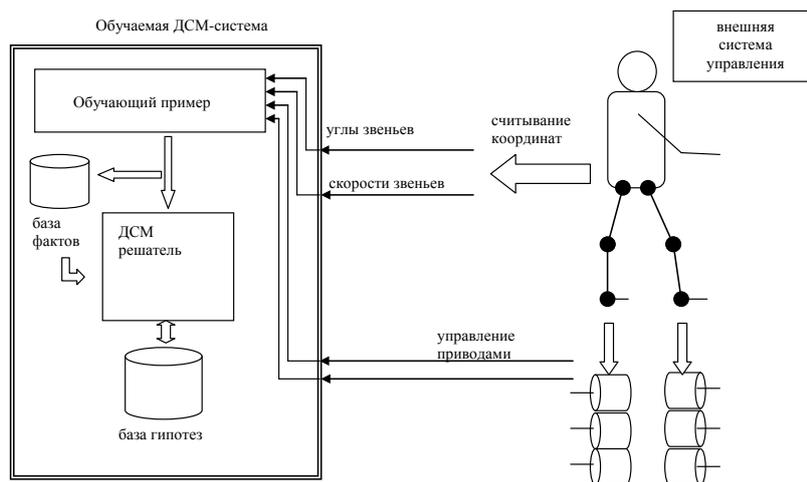


Рисунок 3 – Обучение ДСМ-системы

Работа обученной таким способом системы управления описана выше.

Эксперименты на компьютерных симуляторах и натурные эксперименты на мобильных роботах показывают, что внешние отличия в характере движения робота между работой системы-учителя и обученной с ее помощью ДСМ-системы практически отсутствуют. Это говорит о высоком качестве работы обученной системы управления.

### Заключение

Ввиду высокой сложности математических моделей многосвязных механизмов, к которым относятся активные экзоскелеты, перспективным является использование обучения как метода ИИ для построения систем управления такими устройствами.

При реализации практических алгоритмов встает проблема ограниченности вычислительных ресурсов системы управления активного экзоскелета. Это связано как с ограничением стоимости экзоскелета, так и с требованиями низкого энергопотребления. Если нейронные сети требуют весьма больших временных и емкостных затрат, то для работы ДСМ метода достаточно небольших вычислительных ресурсов. Высокая скорость обучения и нетребовательность к вычислительным ресурсам, позволяют выделить динамический ДСМ-метод как один из основных претендентов для построения обучаемой системы управления для роботов. Ограничением использования данного метода является необходимость представления входных данных в виде дискретного множества. Разбиение на интервалы исходных непрерывных значений позволяет только частично решить эту проблему, поскольку для увеличения точности необходимо уменьшать шаг дискретизации, а при этом быстро растет размерность внутреннего представления данных и снижается быстродействие.

1. С.Ф. Яцун, С.И. Савин, А.С. Яцун, А.В. Мальчиков Изучение управляемого движения экзоскелета во фронтальной плоскости в режиме восстановления равновесия//Труды Международной научно-технической конференции ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА-2016– Санкт-Петербург: ООО «АП4Принт», 2016, С. 240-245.
2. Кожевников М. М., Господ А. В. Планирование траекторий промышленных роботов на основе нейронных сетей // Исследования наукограда, 2012, № 1 (1), С. 37–41.
3. Добрынин Д.А. Динамический ДСМ-метод в задаче управления интеллектуальным роботом.// Десятая национальная конференция по искусственному интеллекту КИИ-2006, 25-28 сентября 2006 г., Обнинск, Труды конференции, М:Физматлит 2006, т.2.
4. Добрынин Д.А., Карпов В.Э. Моделирование некоторых форм адаптивного поведения интеллектуальных роботов.// Информационные технологии и вычислительные системы, Москва, №2, 2006.
5. Финн В.К. Правдоподобные рассуждения в интеллектуальных системах типа ДСМ //Итоги науки и техники. Сер. «Информатика». Т. 15. - М.: ВИНТИ, 1991.
6. Волкова Т.А., Добрынин Д.А. Сравнение системы нечеткого вывода и обучаемой ДСМ-системы при планировании движения мобильного робота// V-международная научно-практическая конференция «Интегрированные модели и мягкие вычисления», 20-30 мая 2009 г., г. Коломна, М.:Физматлит, 2009., Т1.

*S.V. Manko, S.A.K. Diane, V.M. Lokhin, A.K. Novoselsky*

## **GROUP CONTROL OF ROBOTS FOR DEBRIS REMOVAL AND CONSTRUCTION DISASSEMBLY IN THE ATOMIC INDUSTRY<sup>XVII</sup>**

*Moscow Technological University MIREA, Moscow, cpd@mirea.ru*

### **Abstract**

We present models and algorithms for planning actions in multi-stage applied problems with implicitly-specified execution scenario, including the analysis of debris or the labyrinth exploration with an unknown map on the basis of scenario models described in terms of finite state machines. The proposed algorithm automatically generates multi-stage scenario for the solution of complex problems with task updates performed in real-time after the completion of scenario intermediate stages. These stages can be related, for example, to identifying the structure of the next layer of blockage as soon as the previous one was removed, or with the discovery of the undiscovered corridors when approaching the new intersection of a labyrinth, etc. The results of MIREA model and field experiments fully confirm the possibility and the efficiency of performing tasks related to debris removal and disassembly of nuclear facilities with the use of autonomous robots and multi-agent robotic systems.

**Keywords:** task planning, multi-stage problems, finite-state automata, group control, autonomous robots, implicitly defined scenarios, multi-robot systems.

### **Introduction**

It is known that the nuclear plant operation is accompanied by hazards, potentially dangerous to humans. For half a century history of nuclear energy domain a considerable experience was accumulated for the use of robots in conditions of radiation. Unfortunately, the industrial disasters became the catalyst for the development of robotics in this domain. Currently, the robots allow producing maps of radioactive contamination, clearing the area of radioactive contamination, etc. The robots used for the solution of these tasks are generally remote-controlled. At the same time, the world's leading firms, such as, for example, KUKA, highlight necessity to increase the autonomy of robotic systems and conduct appropriate research and development.

Emergency operations efficiency can be greatly enhanced through the use of autonomous robots and multi-agent robotic systems (MRS). In this paper, we address issues of group control of robots in the problems of debris removal and disassembly of nuclear facilities.

One of the obvious approaches to planning collective actions of a group of robots involves an analysis of some a priori known scenario model of a multi-stage problem. Problems of this type can be solved with a sequentially-parallel execution of necessary operations [1, 2], each of which is described as a finite-state automaton (FSA) [5]. Good examples of multi-stage problems of this kind are the construction of complex engineering facilities and the assembly of modular structures with the use of multi-agent robotic systems. The order of MRS actions in such tasks is determined by operation progress and results of its constituting robots [3, 4].

The existing variety of applied problems with an implicitly defined execution scenario also allows action planning within a group of robots based on the use of models described in terms of finite automata. Tasks of this type include debris utilization or exploration of labyrinths with an unknown map. However, unlike in the previous case, scenario models for these tasks should be automatically generated directly during the problem-solving process with account for the completion of their intermediate stages, e.g. structure identification of the next layer of the blockage as soon as the previous one was removed, or discovery of unexplored corridors near a new intersection of the inspected labyrinth, etc.

### **Scenario models of multi-stage problems**

Models of applied problems solved with multi-robot systems according to some known scenario can be represented as a network consisting of typical finite-state automata, each of which corresponds to a specific technological operation. In this case, relationships structure and the current state of each FSA should reflect the feasible sequence and the execution stage of the technological operations within the given scenario [5, 6] (Fig. 1 (a)).

Thus a typical element describing the technological operation in part of a multi-stage scenario model for an applied problem may be represented in the form of a finite-state automaton:

$$K^o = \{ U^o, X^o, Y^o, f^o, h^o \}, \quad (1)$$

where  $U^o = ( u_0^o, u_1^o, u_2^o )$  is an input alphabet;  $u_0^o$  is an input signal of existing non-finished operations prior to the current one;  $u_1^o$  is an input signal of absence of non-finished operations prior to the current;  $u_2^o$  is an input signal of completion of the current operation;

$X^o = ( x_0^o, x_1^o, x_2^o )$  is an alphabet of task states;  $x_0^o$  denotes «operation is not finished» state;  $x_1^o$  denotes «operation is transferred for execution» state;  $x_2^o$  corresponds to «operation is finished» state;

$Y^o = ( y_0^o, y_1^o, y_2^o )$  is an output alphabet;  $y_0^o$  is an output signal confirming that the operation was not yet finished;  $y_1^o$  is an output signal confirming that the operation is submitted for execution;  $y_2^o$  is an output signal confirming that the operation was finished;

$f^o, h^o$  are state-transition and output functions defined by the diagram in Fig. 1 (b).

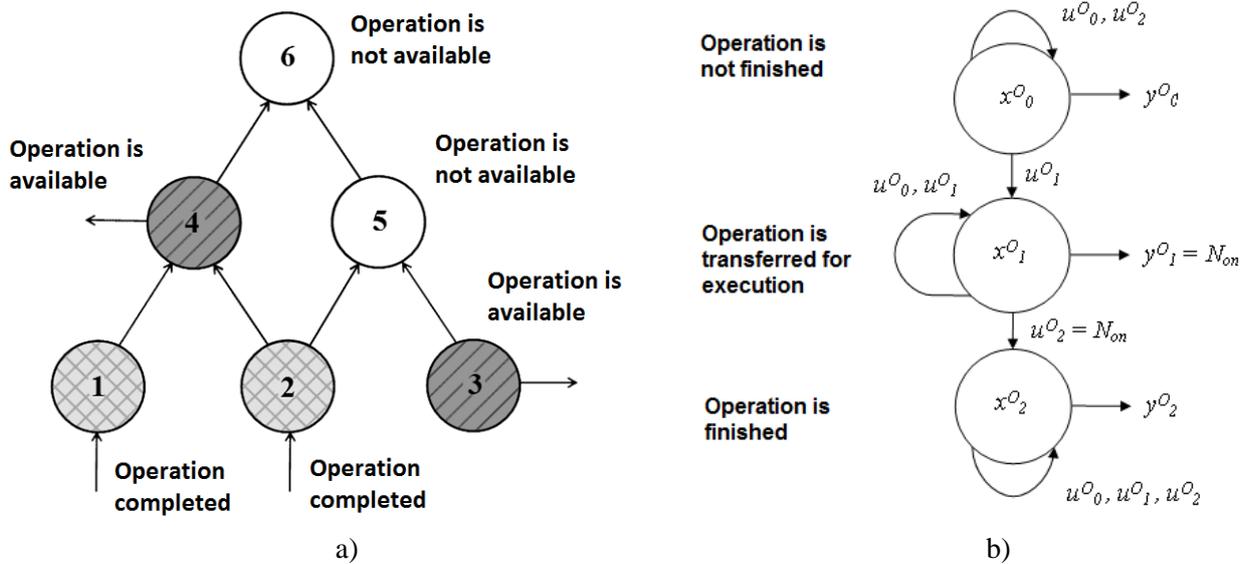


Figure 1 – Detection of technological operations available for execution as a result of fulfilling preceding ones: a) scenario graph; b) typical control element model

### Planning algorithm for problems with implicitly defined execution scenario

The planning of MRS actions based on the analysis of FSA states in the scenario graph of the multi-stage applied problem is quite effective under conditions when the list and feasible execution order of the technological operations to be performed are known in advance.

Concerning this, the challenge of creating multi-agent robotic systems oriented for a wide class of applied problems with implicitly specified scenario models acquires particular importance and urgency. One of the promising approaches to its solution is to develop mechanisms for the automatic construction of scenario models.

Models of this type may be represented as a network of typical FSA of the type (1), which would reflect the set of MRS technological operations (sub-tasks) and their interrelationships. These sub-tasks are detected directly during MRS functioning based on sensory information processing about peculiarities of the working environment.

Practical implementation of this approach to the organization of group control for robots in tasks with implicitly defined execution scenarios assumes a cyclic repetition of three key steps:

1. Analysis of visual (and / or other sensory) information  $I$  to detect the set of available action objects  $O = \{ o_1, \dots, o_N \}$ , accounting for the target functional of the MRS, and then formation the corresponding mapping  $O = F_1(I)$ .

2. Analysis of the relationships between the found objects and the formation of a refined scenario plan, that is specified by the mapping  $P = F_2(O)$  and regulates the current stage of the performed task.

3. Planning and performing necessary actions as well as taking control decisions for the execution of the scenario according to the formed plan:  $U = F_3(P)$ .

The corresponding generalized algorithm for planning actions in a group of robots to solve problems with an implicitly defined execution script based on the finite automata theory will have the following form:

1. The beginning. Set the initial value of the cycle counter:  $i = 0$ .
2. Transition to the next stage of the applied problem with an implicitly defined scenario:  $i = i + 1$ .
3. Detection of new action objects by means of processing data gathered from information-measuring devices of autonomous robots in the MRS.
4. Aggregation of data on the set of available action objects  $O_i$  within the group of robots.
5. Verification of completion conditions for MRS operation related to execution of the assigned applied task. If  $O_i = \emptyset$ , then the algorithm terminates.
6. Formation of the scenario planning model for the current stage of the task in accordance with the chosen technique for constructing a network from typical finite state machines.
7. Distribution of tasks within the group of robots on the basis of the generated scenario model of the current stage of the complex applied problem.
8. Performing tasks to implement the necessary operations on the entire set of action objects  $O_i$ .
9. If group task is not finished, transition to step 3 of the algorithm, else the algorithm terminates.

It should be noted that the formation of the scenario model of the current stage of the applied problem can be carried out in accordance with various techniques for constructing a network of typical finite state machines for automatic planning and monitoring of robots actions.

Within the conducted series of experiments, the efficiency of the presented models and algorithms was evaluated for the group control of robots in multi-stage problems with implicitly defined execution scenarios described in terms of finite automata theory (Fig. 2).

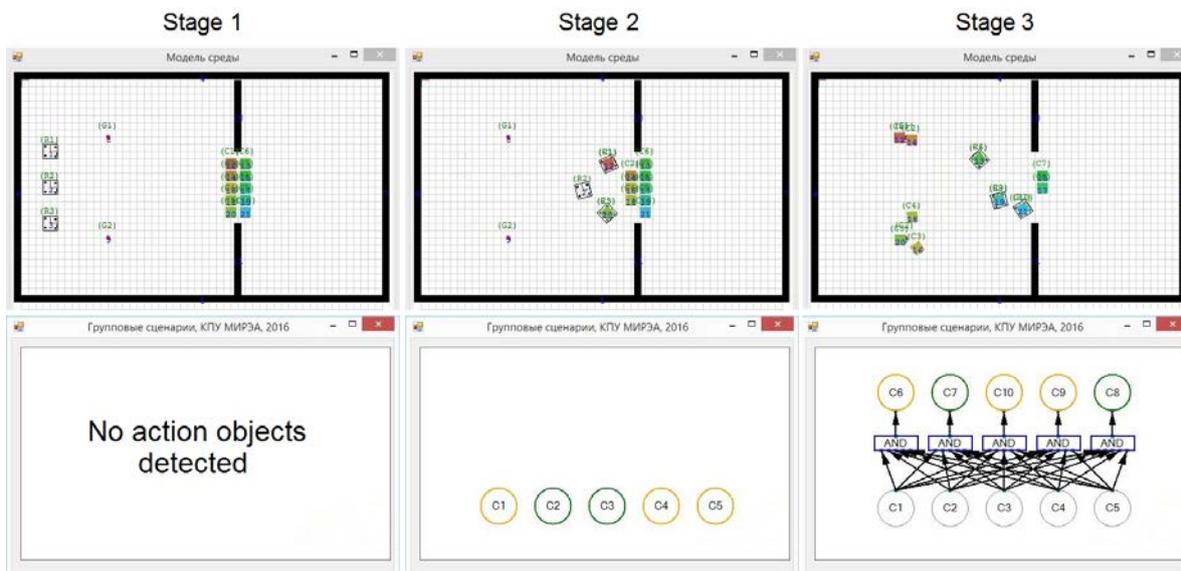


Figure 2 – Simulation of a multi-robot system for debris utilization

### Automated scenario formation based on 3D scene analysis

The multi-stage operation scenario may be formed and dynamically updated on the basis of real-time analysis of the incoming sensory information. Let us consider a more realistic example of debris utilization problem, when target object parameters are perceived with a 3D sensor positioned on a robot, which can be simulated in VREP virtual environment (Fig. 3 (a)).

The algorithm proposed in our paper analyzes the input point cloud  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$  to obtain the structure of the debris. We employ cluster analysis to retrieve separate objects from the 3D scene. The algorithm consists of the following steps:

1. Point cloud primary processing. At this step the input data is filtered and meaningful objects are distinguished from a background scene. RANSAC algorithm is used to delete large plane surfaces [7].
2. Cluster extraction based on “Difference of Normals” algorithm [8] and k-means algorithm, which allow to distinguish between separate objects in a debris stack.
3. Cluster geometry analysis. At this step cluster centers  $c_i = \{x_i, y_i, z_i\}$  are determined, object edges are recognized using RANSAC algorithm and cluster size is calculated along X, Y, Z dimensions to provide a description of a corresponding technological operation.

4. Sorting an array of clusters  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$  in descending order by the Z coordinate. After this step, the indices of the clusters represent priorities for the execution of the associated technological operations.
5. Grouping clusters into layers according to the following rule: for every pair  $\{c_i, c_{i+1}\}$  if  $z_i - z_{i+1} < \Delta z$  clusters are associated to the same layer index  $g_i$ , else the clusters are differentiated to layers  $g_i$  and  $g_{i+1}$  respectively. Threshold value  $\Delta z$  is calculated as an average cluster height.
6. Establishing operation precedence relations between elements of adjacent layers with many-to-many association. Thus, none of the operations in layer  $g_{i+1}$  may be processed before competition of operations in layer  $g_i$ .

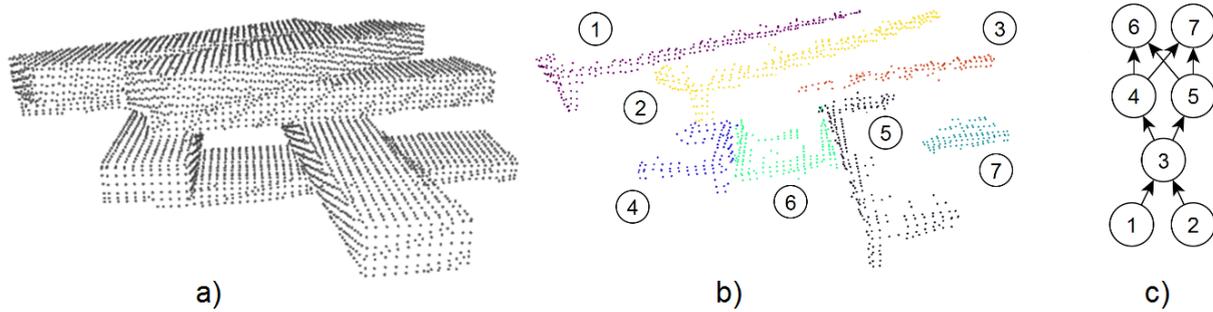


Figure 3 – Cluster analysis results: a) 3D point cloud; b) 3D point clusters; c) formed scenario

The resulting object distribution in layers and the priorities of their removal may be described with the scenario model, as shown in Fig. 3 (c).

It may be noted that the clusterization result in Fig. 3 (b) is not absolutely correct. Clusters 6 and 7 represent one and the same object, but they are separately identified due to the fact that this object is partially occluded by the debris element 5. Thus, with no prior knowledge on object visual appearance, mistakes of this type may be frequent. Moreover, some of the objects may not be visible at all from the specific point of view.

However the planning algorithm proposed in the previous section is resilient to such inaccuracies due to its ability to update the list of the upcoming technological operations dynamically at every stage of MRS functioning. Thus, description of elements that were partially or fully occluded at the first stages of debris utilization will be refined during further system operation.

It should be noted that the results of the experiments conducted in MIREA in virtual and physical environments confirm the capabilities and the efficiency of presented algorithms for debris removal and construction disassembly in the atomic industry using autonomous robots and MRS (Fig. 4).

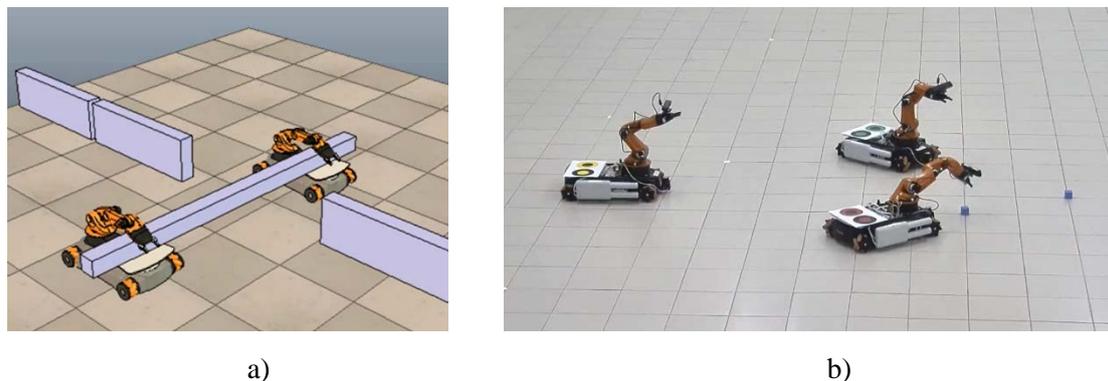


Figure 4 – Debris removal simulations using multi-robot systems

The work is partially supported by RFBR grant no. 16-29-04379.

1. Z. Yan, N. Jouandeau and A. A. Cherif, “A survey and analysis of multi-robot coordination”, International Journal of Advanced Robotic Systems, vol. 10, pp. 1-18, 2013

2. M. M. Quottrup, T. Bak, and R. Izadi-Zamanabadi, "Multi-robot motion planning: A timed automata approach", in Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, New Orleans, LA, 2004, pp. 4417–4422.
3. S. Sariel, T. Balch, N. Erdogan, "Robust multi-robot cooperation through dynamic task allocation and precaution routines", in Proc. of the 3rd International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO), Setubal, Portugal, 2006
4. W. Chen, R. Levy, K. Decker, "An integrated multi-agent coordination including planning, scheduling, and task execution", in Proc. of the Workshop of Coordinating Agent's Planning and Scheduling (CAPS) at the Sixth AAMAS, Hawaii, USA, 2007
5. Gill, A., Introduction to the theory of finite-state machines. McGraw—Hill, New York, 1962.
6. V.M. Lokhin, S.V. Manko, M.P. Romanov, S.A.K. Diane, "Approaches to knowledge representation and functioning aspects of multi-robot systems", Mechatronics, Automation, Control, no. 1, pp. 36-39, 2014.
7. Fischler M. A., Bolles R. C. Random Sample Consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. // Communications of the ACM, 24 (6), P. 381\_395, 1981
8. Ioannou Y., Taati B., Harrap R., Greenspan M. Difference of Normals as a Multi-scale Operator in Unorganized Point Clouds. // In Proc. of the Second International Conference on 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization and Transmission, P. 501\_508, 2012.

*С.В. Манько, С.А.К. Диане, В.М. Лохин, А.К. Новосельский*

## **ГРУППОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ РОБОТАМИ В ЗАДАЧАХ РАЗХБОРА ЗАВАЛОВ И ДЕМОНТАЖА ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ<sup>16</sup>**

*Московский технологический университет МИРЭА, Москва, cpd@mirea.ru*

### **Аннотация**

Представлены модели и алгоритмы планирования действий для решения многоэтапных прикладных задач с неявно-заданным сценарием выполнения, включая разбор завалов или исследование лабиринтов с неизвестной картой на основе использования сценарных моделей, описываемых в терминах конечных автоматов. Предложен алгоритм автоматического формирования многоэтапного сценария для решения комплексной задачи в режиме реального времени по итогам завершения ее промежуточных этапов. Эти этапы могут быть связаны, например, с выявлением структуры очередного слоя завала по мере разбора предыдущего, или с обнаружением необследованных коридоров при приближении к новому перекрестку изучаемого лабиринта и т.д. Результаты проводимых в МИРЭА модельных и натуральных экспериментов полностью подтверждают возможность и эффективность выполнения задач по разбору завалов и демонтажу объектов атомной отрасли с использованием автономных роботов и многоагентных робототехнических систем.

Ключевые слова: планирование действий, многоэтапные задачи, конечные автоматы, неявно-определенные сценарии, групповое управление, автономные роботы, многоагентные робототехнические системы.

### **Введение**

Известно, что работа АЭС сопровождается проявлением вредных факторов, потенциально опасных для человека. За полувековую историю атомной энергетики накоплен значительный опыт применения роботов в условиях радиации. К сожалению, катализатором развития робототехники в этой отрасли стали аварии. В настоящее время роботы позволяют составлять карты радиоактивного заражения, производить расчистку территории от радиоактивных загрязнений и т.д. Роботы, применяемые для решения этих задач, как правило, являются дистанционно-управляемыми. В то же время, ведущие мировые фирмы, такие как, например, КУКА, выдвигают тезис о необходимости повышения автономности средств робототехники и ведут соответствующие разработки.

Эффективность выполнения аварийных работ можно существенно повысить за счет применения автономных роботов и многоагентных робототехнических систем (МАРС). В данной работе решаются вопросы организации группового управления роботами в задачах разбора завалов и демонтажа объектов атомной отрасли.

Один из очевидных подходов к планированию коллективных действий группы роботов предполагает анализ априорно-известной сценарной модели решаемой прикладной задачи с последовательно-параллельной очередностью выполнения необходимых операций [1, 2], описываемых

на уровне конечных автоматов [5]. Примером задачи такого рода служит возведение сложных инженерных конструкций и сооружений блочно-модульного типа с помощью многоагентной робототехнической системы, порядок действий которой определяется по ходу и результатам функционирования отдельных исполнителей из ее состава [3, 4].

Существующая разновидность прикладных задач с неявно-заданным сценарием выполнения, включая разбор завалов или исследование лабиринтов с неизвестной картой, также допускает планирование действий по своему выполнению с помощью группы роботов на основе использования сценарных моделей, описываемых в терминах конечных автоматов.

Однако, в отличие от предыдущего случая, подобная сценарная модель должна автоматически формироваться непосредственно в процессе решения комплексной задачи по итогам завершения ее промежуточных этапов. Эти этапы могут быть связаны, например, с выявлением структуры очередного слоя завала по мере разбора предыдущего, или с обнаружением необследованных коридоров при приближении к новому перекрестку изучаемого лабиринта и т.д.

Сценарные модели многоэтапных прикладных задач

Модели многоэтапных прикладных задач, решаемых с использованием МАРС согласно некоторому известному сценарию, могут формироваться в виде сети конечных автоматов, каждый из которых ставится в соответствие отдельным технологическим операциям [5, 6] (Рис. 1 (а)).

Так, типовой элемент для описания технологической операции в составе сценарной модели решаемой прикладной задачи может быть представлен конечным автоматом следующего вида:

$$K^o = \{ U^o, X^o, Y^o, f^o, h^o \}, \quad (1)$$

где

$U^o = ( u_0^o, u_1^o, u_2^o )$  – входной алфавит;  $u_0^o$  – входной сигнал о наличии невыполненных операций, предшествующих данной;  $u_1^o$  – входной сигнал об отсутствии невыполненных операций предшествующих данной;  $u_2^o$  – входной сигнал о завершении данной конкретной операции;

$X^o = ( x_0^o, x_1^o, x_2^o )$  – алфавит состояний;  $x_0^o$  – состояние «операция не выполнена»;  $x_1^o$  – состояние «операция передана на выполнение»;  $x_2^o$  – состояние «операция выполнена»;

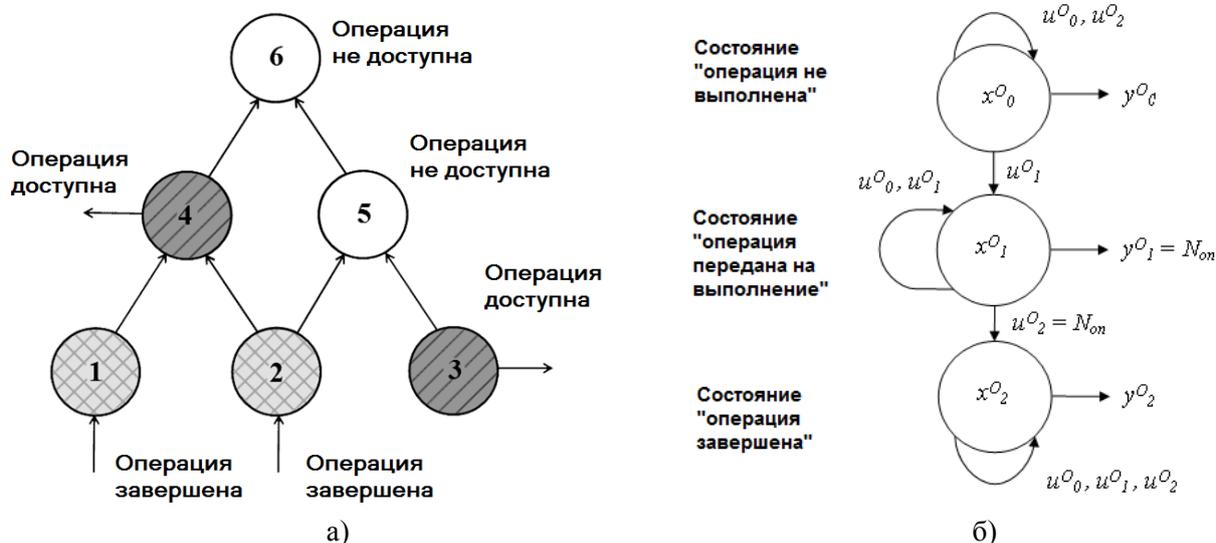


Рисунок 1 – Выявление доступных для исполнения операций по мере завершения предыдущих: а) сценарный граф; б) модель типового элемента в составе сценария

$Y^o = ( y_0^o, y_1^o, y_2^o )$  – выходной алфавит;  $y_0^o$  – выходной сигнал, подтверждающий, что операция находится в состоянии «не выполнена»;  $y_1^o$  – выходной сигнал, подтверждающий, что операция передана на выполнение;  $y_2^o$  – выходной сигнал, подтверждающий, что операция выполнена;

$f^o, h^o$  – функции переходов и выходов, задаваемые диаграммой на Рис. 1 (б).

#### Алгоритм планирования для решения неявно-определенных задач

Планирование действий в многоагентных робототехнических системах, основанное на анализе состояний конечных автоматов в сценарном графе прикладной задачи, достаточно эффективно в условиях, когда перечень и допустимые варианты очередности подлежащих выполнению технологических операций являются заблаговременно известными.

В данной связи, особую важность и актуальность приобретает вопрос о создании многоагентных робототехнических систем, ориентированных на выполнение широкого класса прикладных задач с неявно-заданными сценарными моделями.

Один из перспективных подходов к решению подобных задач заключается в разработке механизмов автоматического построения сценарных моделей, как сети типовых конечных автоматов вида (1), которая отражает множество и взаимосвязи необходимых для выполнения технологических операций или подзадач, выявляемых непосредственно в процессе функционирования МАРС по результатам обработки сенсорной информации об особенностях рабочей обстановки. Практическая реализация этого подхода к организации группового управления роботами в задачах с неявно-определенными сценариями выполнения предполагает циклическое повторение трех ключевых шагов.

1. Анализ визуальной (и/или иной сенсорной) информации  $I$  для обнаружения множества доступных объектов действий  $O=\{o_1, \dots, o_N\}$  исходя из целевого функционала многоагентной робототехнической группировки с последующим формированием соответствующего отображения  $O=F_1(I)$ .

2. Анализ взаимосвязей между найденными объектами целевого интереса и формирование уточненного сценарного плана, задаваемого отображением  $P=F_2(O)$  и регламентирующего текущую стадию выполнения поставленной прикладной задачи.

3. Планирование и контроль совершаемых действий с принятием управляющих решений для выполнения сценария согласно сформированного плана:  $U=F_3(P)$ .

Соответствующий алгоритм планирования действий в группе роботов при решении задач с неявно-определенным сценарием выполнения на основе аппарата конечных автоматов в обобщенной форме представления будет иметь следующий вид:

1. Начало. Установка исходного значения счетчика циклов:  $i:=0$ .

2. Переход к очередной стадии выполнения прикладной задачи с неявно-определенным сценарием:  $i:=i+1$ .

3. Обнаружение новых объектов действий на основе обработки данных с информационно-измерительных средств автономных роботов из состава объединенной группировки.

4. Комплексирование данных о множестве доступных объектов действий  $O_i$  по всей группе роботов.

5. Проверка условий завершения работы многоагентной робототехнической группировки по выполнению поставленной прикладной задачи. Если  $O_i=\emptyset$ , то завершение алгоритма.

6. Формирование сценарной модели текущей стадии выполнения поставленной задачи в соответствии с априорно выбранной методикой построения сети из типовых конечных автоматов для автоматического планирования и контроля действий роботов.

7. Распределение заданий в группе роботов на основе сформированной сценарной модели текущей стадии выполнения поставленной задачи.

8. Выполнение заданий по реализации необходимых операций по всему множеству объектов действий  $O_i$ .

9. Если групповая задача не завершена, то переход к п. 3, иначе конец алгоритма.

Следует отметить, что в общем случае множество основных альтернатив формирования сценарной модели включает последовательное и варианты последовательно-параллельного сопряжения автоматов в зависимости от особенностей рассматриваемой прикладной задачи, а также специфических требований к порядку следования технологических операций по ее выполнению.

В рамках серии экспериментов проводилась опытная оценка работоспособности и эффективности моделей и алгоритмов группового управления роботами при решении задач с неявно-определенными сценариями выполнения на основе применения аппарата конечных автоматов (Рис. 2).

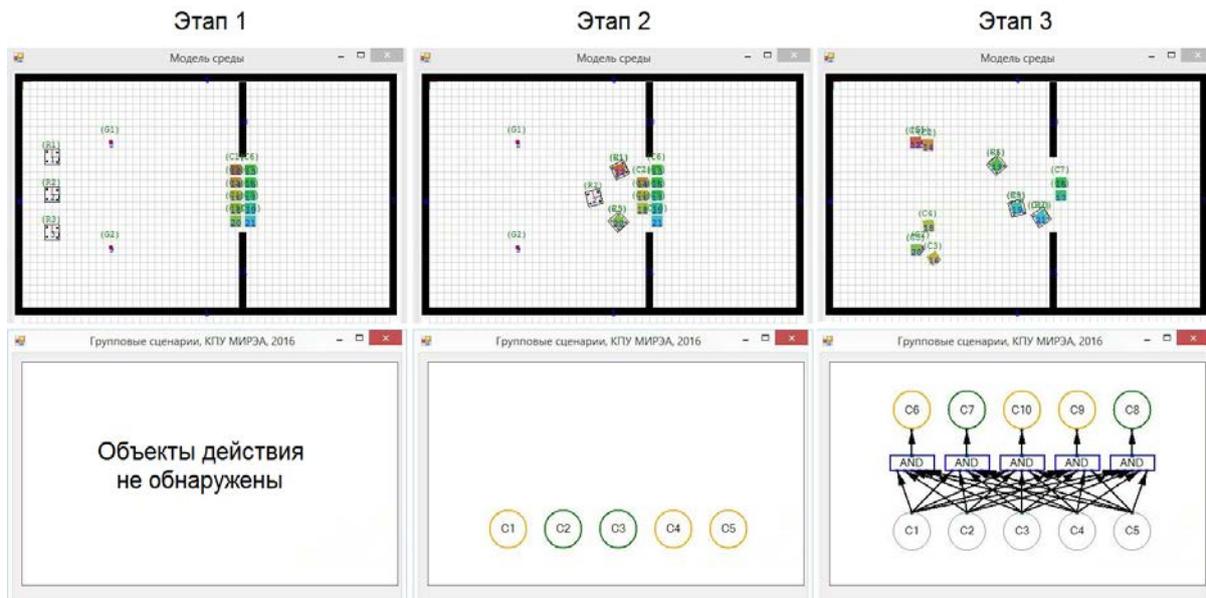


Рисунок 2 – Моделирование процессов группового управления роботами при разборе завала

### Автоматическое формирование сценария на основе анализа трехмерных сцен

Многоэтапный сценарий функционирования может быть сформирован на основе анализа сенсорной информации в режиме реального времени.

Рассмотрим более детально задачу разбора завала на примере, когда параметры целевых объектов воспринимаются с использованием 3D-датчика, закрепленного на роботе (рис. 3 (а)).

Разработанный алгоритм анализирует подаваемое на вход облако точек  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ , для выявления структуры завала. Он основывается на кластерном анализе, который позволяет выделить отдельные объекты из трехмерной сцены. Алгоритм состоит из следующих шагов:

1. Предварительная обработка облака точек. На данном этапе входные данные фильтруются – значимые объекты отделяются от остальных элементов сцены на основе алгоритма RANSAC [7], который позволяет удалить протяженные участки плоскостей.

2. Выявляются кластеры точек на основе алгоритма анализа нормалей [8] и алгоритма k-средних, что позволяет различить отдельные объекты в завале.

3. Анализируется геометрия кластеров. Вычисляются центры кластеров  $c_i = \{x_i, y_i, z_i\}$ , определяются параметры ребер объектов с использованием алгоритма RANSAC и рассчитывается размер кластеров вдоль осей X, Y, Z в целях описания соответствующей технологической операции.

4. Производится сортировка массива кластеров  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$  в порядке убывания по координате Z. Отсортированные индексы кластеров соответствуют приоритетам выполнения соответствующих технологических операций.

5. Кластеры группируются в слои согласно следующему правилу: для каждой пары  $\{c_i, c_{i+1}\}$  если  $z_i - z_{i+1} < \Delta z$ , то кластеры определяются в один и тот же слой  $g_i$ , иначе в слои  $g_i$  и  $g_{i+1}$  соответственно. Пороговое значение  $\Delta z$  определяется как средняя высота кластера.

6. Устанавливаются отношения очередности между элементами смежных слоев таким образом, что ни одна из операций в слое  $g_{i+1}$  не может быть выполнена раньше, чем все операции будут завершены в слое  $g_i$ .

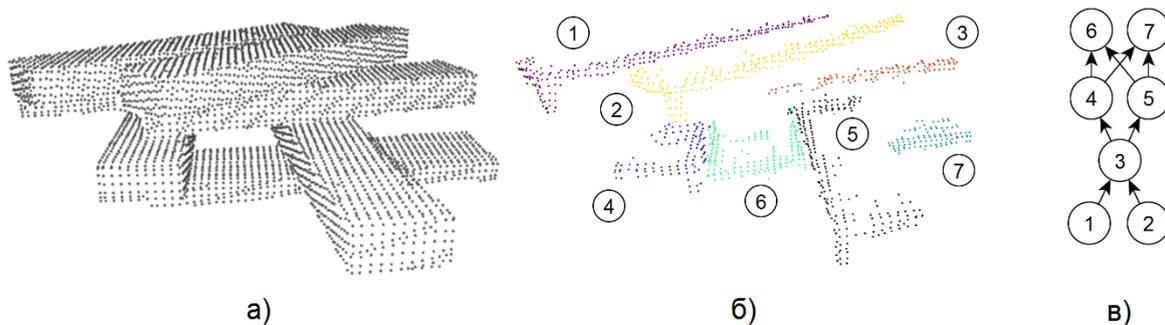


Рисунок 3 – Результаты кластерного анализа: а) 3D-облако точек; б) кластеры 3D-точек; в) сформированный сценарий

Результирующее распределение обломков по слоям и приоритеты их утилизации могут быть описаны в виде сценарной модели, как показано на рис. 3 (в).

Можно заметить, что результат кластеризации на рис. 3 (б) несколько отличается от ожидаемого. Кластеры 6 и 7 относятся к одному и тому же объекту, однако идентифицированы по отдельности. Это обусловлено тем, что данный объект частично загорожен элементом завала 5.

Таким образом, без априорного знания о внешнем виде кластеризуемых объектов ошибки такого рода могут случаться довольно часто. Более того, некоторые объекты могут быть полностью загорожены при рассмотрении завала с определенных ракурсов.

Однако алгоритм планирования действий, предложенный в предыдущем разделе, устойчив к подобным ошибкам, поскольку сценарий функционирования MAPC уточняется на каждом шаге ее функционирования.

Следует отметить, что результаты проводимых в МИРЭА модельных и натурных экспериментов полностью подтверждают возможность и эффективность выполнения задач по разбору завалов и демонтажу объектов атомной отрасли с использованием автономных роботов и многоагентных робототехнических систем (Рис. 4).

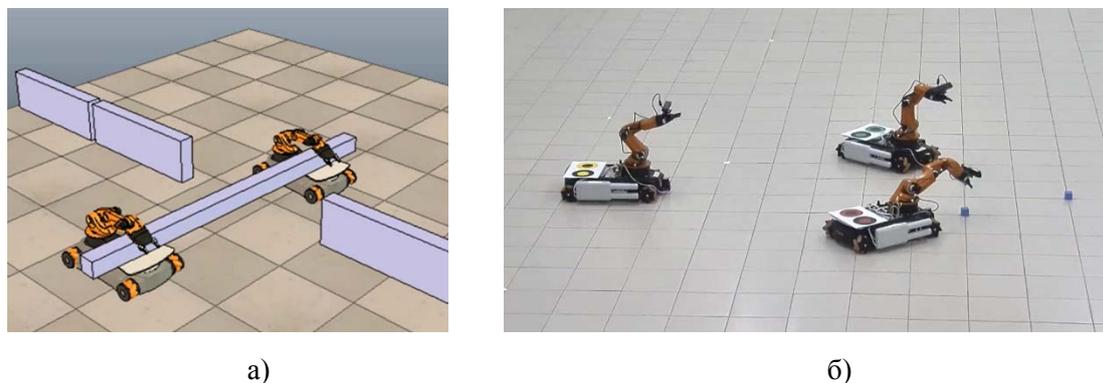


Рисунок 4 – Фрагменты экспериментов по разбору завалов с использованием MAPC

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект №16-29-04379.

1. Z. Yan, N. Jouandeau and A. A. Cherif, "A survey and analysis of multi-robot coordination", International Journal of Advanced Robotic Systems, vol. 10, pp. 1-18, 2013
2. M. M. Quottrup, T. Bak, and R. Izadi-Zamanabadi, "Multi-robot motion planning: A timed automata approach", in Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, New Orleans, LA, 2004, pp. 4417-4422.
3. S. Sariel, T. Balch, N. Erdogan, "Robust multi-robot cooperation through dynamic task allocation and precaution routines", in Proc. of the 3rd International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO), Setubal, Portugal, 2006
4. W. Chen, R. Levy, K. Decker, "An integrated multi-agent coordination including planning, scheduling, and task execution", in Proc. of the Workshop of Coordinating Agent's Planning and Scheduling (CAPS) at the Sixth AAMAS, Hawaii, USA, 2007
5. Варшавский В. И. Коллективное поведение автоматов. М.: Наука, 1973

6. Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П., Диане С.А.К. Способы представления знаний и особенности функционирования мультиагентных робототехнических систем // Мехатроника, автоматизация, управление. М.: Новые технологии, 2014. №1. С. 36–39.
7. Fischler M. A., Bolles R. C. Random Sample Consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. //Communications of the ACM, 24 (6), P. 381\_395, 1981
8. Ioannou Y., Taati B., Harrap R., Greenspan M. Difference of Normals as a Multi-scale Operator in Unorganized Point Clouds. // In Proc. of the Second International Conference on 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization and Transmission, P. 501\_508, 2012.

*S.R. Eprikov, V.E. Pryanichnikov*

## **TECHNOLOGY OF MULTI-AGENT CONTROL OF ROBOTARIUM AND PRODUCTION CELLS WITH SIMULTANEOUS SIMULATION**

*International Laboratory «Sensorika», Moscow, troksid@yandex.ru  
MSTU “Stankin”, INET RSUH, KIAM Russian Academy of sciences, v.e.pr@yandex.ru*

Keywords: building a network of robotarium, distributed control of mobile robots and their simulation.

When developing intelligent robots, one of the problems is the lack of effective software to create systems of group control. For example, in the well-known software packages (ROS, MRS, and others) does not included specific development tools for control of distributed mechatronic systems, especially in remote mode. They also have a common disadvantage, that is the unreasonably high costs associated with installing, upgrading and maintaining equipment and working in this software environment.

This paper presents the results of the development and testing of the new software-information platform to provide the user with unified access to the software environment to control a variety of robots, including operational and remote changes of executing programs during their functioning. This enables the following: reducing the cost of setting up executing programs; implementation of operational adjustments during operation of the robots; improving the efficiency of the developed technical tools for teaching and learning processes of the students, specialised in robotics and IT- industry, by increasing the use of training equipment due to the paralleling of the access to it.

Developed simulators and usage of the actor model were the base for creating the technological platforms for distributed software control, providing the simultaneous access of several users to a group of mobile robots and their virtual models. It's the first time, then under a single software platform are combined programming and control in parallel of virtual models of mobile robots and their real prototypes. Platform allows you to quickly and remotely reprogram systems and significantly reduce requirements to the level of training of specialists-software developers, to ensure the scalability of each component system on physically distributed computers. Thus, significantly decrease the costs of adaptation programs for specific tasks, and radically simplifies development of control systems and user interfaces.

This approach was tested on mobile robots with different kinematic schemes, different types of microprocessor control with the use of sensors operating on different physical principles. Testing was conducted on robots: AMUR-105, AMUR-107, three Robotino robots and two small mobile robots, placed in three laboratories-robotariums, as well as the simultaneous launch with 80 virtual simulators, operating in real-time. The experiments confirm all these advantages.

Future plans include the expansion of the use of these approaches for teaching and scientific experiments and development of a network of robotarium created by MINOT Russian State University Humanitas, Chair of Sensory and control systems MGTU "STANKIN" (basic department with KIAM Russian Academy of Sciences) jointly with universities in Russia, Croatia (Zadar University) and Austria (Vienna technical University), including the association with the educational network "Synergy" (project of Concern "Festo"). It is also envisaged to improve further characteristics of embedded in the software platform physical engine, as well as the testing platform in the development of the system production processes with integrated logical control, for example, in automation workshop, implements the concept of "Industry 4.0".

## **ТЕХНОЛОГИИ МНОГОАГЕНТНОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТАРИУМАМИ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ ЯЧЕЙКАМИ С ОДНОВРЕМЕННОЙ СИМУЛЯЦИЕЙ.**

*Международная лаборатория «Сенсорика», troksid@yandex.ru  
МГТУ "Станкин", МИНОТ РГГУ, ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, Москва, v.e.pr@yandex.ru*

Ключевые слова: построение сети роботариумов, распределенное управление мобильными роботами и их симуляторами.

При разработке интеллектуальных роботов одной из проблем является отсутствие эффективного программного обеспечения для создания систем группового управления. Например, в известных программных пакетах (ROS, MRS и другие) не предусмотрены специальные средства разработки управления распределенными мехатронными системами, тем более, в дистанционном режиме. Они также обладают общим недостатком - неоправданно высокими затратами, связанными с установкой, обновлением и поддержанием работоспособности оборудования и работающего на нём программного окружения.

В данной работе представлены результаты разработки и тестирования новой программно-информационной платформы, позволяющей предоставлять пользователю унифицированный доступ к программной среде для управления различными роботами, включая оперативную и удаленную смену программ управления во время их функционирования. Это даёт следующие возможности: уменьшение затрат на создание программ управления; выполнение оперативных корректировок, в том числе непосредственно во время работы роботов; повышение эффективности использования разработанных технических средств для улучшения образовательных процессов у студентов робототехнических и IT-специальностей, увеличение коэффициента использования учебного оборудования за счет распараллеливания доступа к роботам.

Применение разработанных симуляторов-тренажеров, акторной модели к созданию информационно-технологической платформы для распределенного программного управления, обеспечили одновременный доступ нескольких пользователей к группе мобильных роботов и к их виртуальным моделям. Впервые в рамках единой программной платформы совмещено программирование и управление параллельно работающими виртуальными моделями мобильных роботов и их реальными прототипами. Платформа позволяет оперативно и дистанционно перепрограммировать системы, существенно уменьшить требования к уровню квалификации специалистов-разработчиков программного обеспечения, обеспечить возможность масштабирования каждого компонента системы по физически распределенным компьютерам. Таким образом, существенно снижаются затраты на адаптацию программ под конкретные задачи, радикально упрощается разработка систем управления и интерфейсов пользователей.

Данный подход был опробован на мобильных роботах с разными кинематическими схемами, разными типами микропроцессорного управления и с применением датчиков, работающих на разных физических принципах. Тестирование проводилось на роботах АМУР-105, АМУР-107, трех роботах Robotino и двух малогабаритных мобильных роботах, размещенных в трех лабораториях-роботариумах, а также при одновременном запуске 80 виртуальных симуляторов, работающих в режиме реального времени. Эксперименты подтвердили все перечисленные преимущества.

Дальнейшие планы предусматривают расширение использования этих подходов для учебно-научных экспериментов и развития сети роботариумов, созданных МИНОТ РГГУ, кафедрой Сенсорных и управляющих систем МГТУ «СТАНКИН» (базовая кафедра при ИПМ им. М.В.Келдыша РАН) совместно с университетами России, Хорватии (Задарский университет) и Австрии (Венский технический университет), в том числе путем объединения с учебной сетью «Синергия» (проект концерна «Фесто»). Предусматривается также дальнейшее улучшение характеристик, встраиваемых в программную платформу физических движков, тестирование платформы при разработке системы управления производственными процессами со встроенными средствами логического контроля на примере автоматизации цеха, реализующего концепцию «Индустрии 4.0».

## **DISTRIBUTED PROBLEM SAVING IN MULTI-AGENT ROBOTIC SYSTEM**

*Bauman Moscow State Technical University, Moscow  
avn@bmstu.ru , 982696853@163.com*

### **Abstract**

The main approaches to the construction of models for the distribution of tasks among agents in complex systems are analyzed. The article devoted to this rapidly developing field of interdisciplinary research based on numerous works. Compared different approaches based on a large number of references, mainly from the point of view of their practical applications. Examples of the organization of collective actions of robots are presented and comparative analysis of algorithms is checked.

Keywords: multi-Agent system (MAS), static and dynamic distribution, swarm intelligence, ant colony algorithm, genetic algorithm.

*А.В. Назарова, Мэйсинь Чжай*

## **РАСПРЕДЕЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ В МНОГОАГЕНТНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ**

*МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва  
avn@bmstu.ru , 982696853@163.com*

### **Аннотация**

Проанализированы основные подходы к построению моделей распределения задач между агентами в сложных системах. В основу статьи легли многочисленные работы, посвященные этой стремительно развивающейся области междисциплинарных исследований. На основе большого числа источников выполнено сравнение различных подходов, в основном, с точки зрения их практических приложений. Представлены примеры организации коллективных действий роботов и проверен сравнительный анализ алгоритмов.

Ключевые слова: многоагентная система, статическое и динамическое распределение, роевой интеллект, муравьиный, генетический алгоритм, алгоритм аукциона.

### **Введение**

За последние два десятилетия, роль многоагентных систем (МАС) многократно возросла, особенно в контексте достижений в области искусственного интеллекта и распределенного решения задач. Свойства агентов, такие как автономность и реактивность, а также их навыки динамического взаимодействия, делают МАС предметом серьезного научного интереса. Часто выполнение сложных задач требует от агентов автономной работы без какого-либо вмешательства извне, что обуславливает высокую надежность и адаптивность подобных систем. В предложенной статье рассматриваются различные подходы к проблеме распределения задач между агентами с целью достижения оптимального результата при минимальных временных затратах и отсутствии конфликтов в системе. Для корректного выполнения задачи агенты должны вести сложные переговоры, сотрудничать и координировать друг с другом свои действия. Функционирование членов команды в изменяющейся окружающей среде невозможно без динамического перераспределении задач между агентами.

В статье представлена классификация распределения задач по типу управления: централизованный, децентрализованный и гибридный. Затем рассматриваются и оцениваются различные подходы к распределению, такие, как роевой интеллект, эволюционный метод, принципы рыночной экономики и другие.

### **1. Постановка задачи**

Рассмотрим проблему распределения на некотором количестве задач; цель распределения – обеспечить наименьшую затрату ресурсов и отсутствие конфликтов между агентами. Для описания поставленной задачи введем следующие обозначения:  $M = \{m_1 m_2 m_3 \dots m_k\}$  - множество задач (может меняться в процессе выполнения задания),  $N = \{n_1 n_2 n_3 \dots n_p\}$  – множество агентов (также может изменяться). Кроме того, заданы матрицы  $Q$  и  $R$  размерностью  $k \times p$ , где  $Q=[q_{ij}]$  – вознаграждение при выполнении подзадачи  $i \in \{1 \dots k\}$  агентом  $j \in \{1 \dots p\}$  (Табл. 1.), а  $R=[r_{ij}]$  – затраченные при этом ресурсы

(Табл.2.) и матрицу  $L[l_{ij}]$ , характеризующую возможность выполнения задачи  $i$  роботом  $j$ ,  $l_{ij} \in \{0,1\}$  (Табл.3.). Необходимо распределить задачи  $M$  между агентами  $N$ , так, чтобы выигрыш  $C = \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^k (l_{ij} \times (q_{ij} - r_{ij}))$  был максимальным.

Таблица 1

Агенты $j$	1	2	3	...	$p$
Задачи $i$					
1	$q_{11}$	$q_{12}$	$q_{13}$	...	$q_{1p}$
2	$q_{21}$	$q_{22}$	$q_{23}$	...	$q_{2p}$
...	...	...	...	...	...
$k$	$q_{k1}$	$q_{k2}$	$q_{k3}$	...	$q_{kp}$

Таблица 2

Агенты $j$	1	2	3	...	$p$
Задачи $i$					
1	$r_{11}$	$r_{12}$	$r_{13}$	...	$r_{1p}$
2	$r_{21}$	$r_{22}$	$r_{23}$	...	$r_{2p}$
...	...	...	...	...	...
$k$	$r_{k1}$	$r_{k2}$	$r_{k3}$	...	$r_{kp}$

Таблица 3

Агенты $j$	1	2	3	...	$p$
Задачи $i$					
1	$l_{11}$	$l_{12}$	$l_{13}$	...	$l_{1p}$
2	$l_{21}$	$l_{22}$	$l_{23}$	...	$l_{2p}$
...	...	...	...	...	...
$k$	$l_{k1}$	$l_{k2}$	$l_{k3}$	...	$l_{kp}$

После установления соответствия «задача-агент» при работе робототехнической системы могут появиться новые задачи или меняется количество агентов, что приводит к необходимости динамического перераспределения задач. Таким образом, в МАС возможны два типа распределения задач: статическое и динамическое. Кроме того, по типу организации системы управления, они делятся на централизованные [1], децентрализованные и гибридные [2]. Централизованное распределение предполагает наличие в команде центра управления, роль которого может играть либо член команды, либо отдельный управляющий орган, который контролирует процессы и агентов, а также обладает глобальной информацией. При появлении новой задачи центр управления формирует ценовой массив, содержащий предполагаемые затраты робота-агента (к примеру, время или расстояние), затем, в зависимости от функциональных возможностей, распределяет задачи между роботами таким образом, чтобы свести затраты к минимуму [3]. При этом в основе распределения могут лежать такие подходы, как методы перебора, алгоритмы поиска, линейное программирование, роевой интеллект [4], [5] и т.д. При децентрализованном типе распределения отсутствует единый центр управления и лидеры среди объектов. В распределении задач участвуют все агенты, которые, в процессе взаимодействия, согласуют свои действия, конкурируют и совместно решают сложные задачи. Для данного типа распределения используются методы теории игр, Марковские решения, распределение задач на основе аукциона [6], [7], [8], [9], [10] и т.д. Гибридный тип является комбинацией двух вышеупомянутых типов

и заключается в разбиении коллектива на группы с учетом специфики решаемых задач и назначении или выборе лидеров внутри групп.

С увеличением сложности выполняемых заданий большими коллективами роботов наибольшую актуальность приобретают бионические и интеллектуальные алгоритмы распределения. Поэтому в данной статье рассматриваются методы роевого интеллекта, а также оценивается возможность применения «рыночных» механизмов в распределении задач.

## 2. Распределение задач на основе методов роевого интеллекта

Понятие роевого интеллекта (Swarm Intelligence) было введено Херардо Бени и Ван Цзином (Gerardo Beni and Jing Wang) в 1989 году [11]. Под роевым интеллектом понимают самоорганизующуюся многоагентную систему, в которой взаимодействие агентов с окружающей средой регулируется простыми правилами поведения, а их взаимодействие между собой определяет коллективную адаптацию роя. Примерами таких взаимодействий могут служить муравьиный алгоритм, алгоритм роя частиц, генетический алгоритм. Данные принципы применяются для централизованного типа распределения задач и являются лучшими примерами бионического подхода.

### 2.1 Муравьиный алгоритм

Муравьиный алгоритм [12][13], в основе которого лежит модель поведения колонии муравьев, был предложен Марко Дориго (англ. Marco Dorigo) в середине 90-х годов XX века. Этот алгоритм является одним из вариантов решения задачи коммивояжера и сохраняет свою актуальность уже более 20 лет.

Колония муравьев способна быстро находить кратчайший путь от муравейника до источника питания (рис. 1), при этом коллектив адаптируется к изменяющимся условиям окружающей среды и способен при необходимости найти новый оптимальный путь.

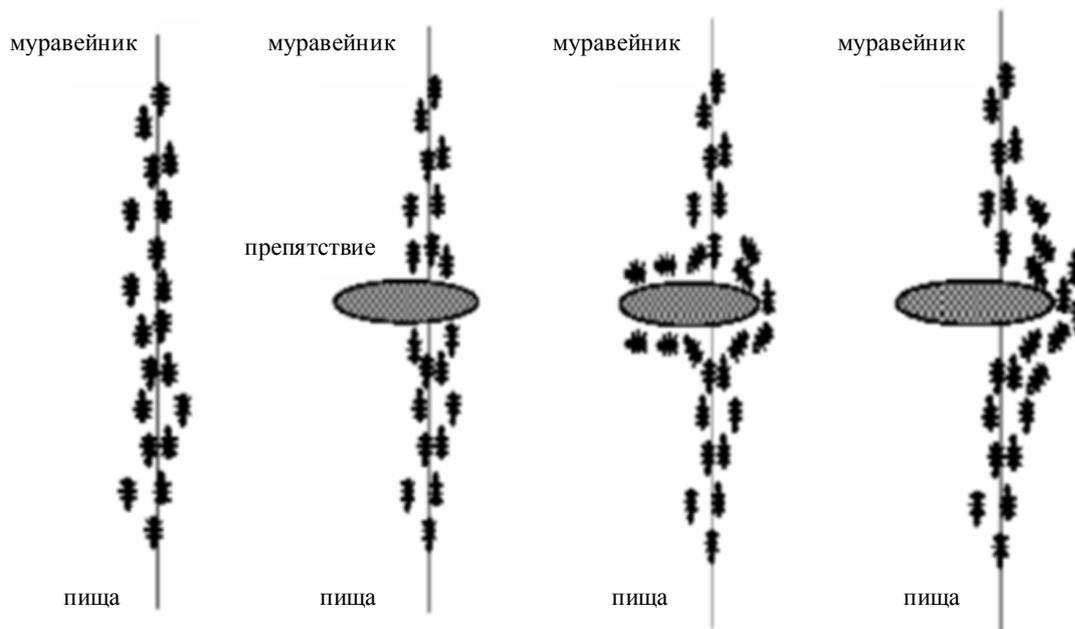


Рисунок 1 – Кратчайший путь от муравейника до источника питания

Это возможно благодаря тонкому взаимодействию между особями в группе, которое осуществляется посредством специального химического вещества - феромона. Каждый муравей при выборе пути руководствуется не только своими желаниями, но и опытом других особей, знание о котором он получает, оценивая «дорожки» феромонов на каждом пути. Поскольку концентрация феромона разнится на каждом пути, можно вычислить наиболее «привлекательный» вариант. Поскольку движение к цели и обратно занимает относительно немного времени, след феромона вдоль короткого пути остается ярче, и заставляет все новых и новых особей выбирать именно его, что в конечном итоге определяет однозначную приоритетность конкретного пути, который и является оптимальным.

При распределении задач в данном методе учитываются следующие параметры: пространство поиска пищи, численность колонии (набор эффективных решений в пространстве поиска),

концентрация феромона, варианты пути от муравейника к источнику пищи, единственный оптимальный путь.

В технических системах формирование пути первоначально происходит по «жадному» алгоритму, который обеспечивает принятие локально оптимальных решений на каждом этапе поиска, допуская, что конечное решение также окажется оптимальным. Далее итерационно выбирается более короткий путь. Этот метод отличается высокой устойчивостью, глобальностью поиска, в нем используются параллельное и распределенное вычисления, кроме того, он хорошо комбинируется с другими алгоритмами, а также характеризуется быстрой и легкой сходимостью, что ускоряет процесс оптимизации. Однако, в некоторых случаях, данный алгоритм обеспечивает нахождение ряда локальных оптимальных решений, а в более глобальных задачах время его сходимости становится неопределенным. По этой причине муравьиный алгоритм часто используется в комбинации с другими алгоритмами.

## 2.2 Алгоритм роя частиц

Алгоритм роя частиц (Particle Swarm Optimization или POS) является одним из эволюционных методов оптимизации. Он был предложен Джеймсом Кеннеди и Расселом Эберхартом (Kennedy, Eberhart) [14] в 1995 году и основан на исследовании и моделировании поведения птиц в стае (рис. 2).



Рисунок 2 – Поведение птиц в стае

В основе метода лежит принцип случайного расположения стаи птиц в пространстве. Каждая птица знает собственное расстояние до пищи, а также расстояния до пищи всех остальных птиц в стае (целевые значения). Сначала птицы имеют случайную скорость (модуль и направление), затем они корректируют скорость, двигаясь к птице, имеющей наименьшее целевое значение, т.е. расположенной ближе всех к пище.

Наблюдение за птицами вдохновило Крейга Рейнольдса (Craig Reynolds) на создание в 1986 году компьютерной модели, которую он назвал Voids. Для имитации поведения стаи птиц, Рейнольдс запрограммировал поведение каждой из них в отдельности, а также их взаимодействие. При этом он использовал три простых принципа. Во-первых, каждая птица в его модели стремилась избежать столкновений с другими птицами. Во-вторых, каждая птица двигалась в том же направлении, что и находящиеся неподалеку птицы. В-третьих, птицы стремились двигаться на одинаковом расстоянии друг от друга (рис. 3).

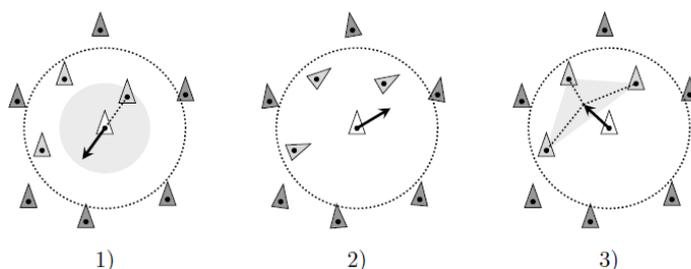


Рисунок 3 – Правила поведения птиц в модели Рейнольдса

Результаты первых же симуляций удивили самого создателя: несмотря на простоту лежащих в основе программы алгоритмов, стая на экране выглядела крайне правдоподобно. Птицы сбивались в группы, уходили от столкновений и даже хаотично металась точь-в-точь как настоящие. Как специалист в области компьютерной графики, Крейг Рейнольдс был в первую очередь заинтересован визуальной стороной результатов, созданной им имитации. Однако, в посвященной Voids статье он отметил, что

разработанная им поведенческая модель может быть расширена введением дополнительных факторов – таких, как поиск пищи или боязнь хищников.

Оптимальное решение находится через некоторое число итераций, причем в каждой итерации частица (птица) обновляет свое положение, стремясь к собственному лучшему решению ( $pbest$ ) и, в то же время, к лучшему решению среди всех частиц роя ( $gbest$ ). Тогда корректировка скорости и положения частицы будет происходить по следующим формулам [15]:

$$v_{i+1} = v_i + a_1 \cdot rnd() \cdot (pbest_i - x_i) + a_2 \cdot rnd() \cdot (gbest_i - x_i)$$

$$x_{i+1} = x_i + v_{i+1},$$

где  $v_i$  – скорость текущей частицы (птицы  $i$ ),  $x_i$  – положение текущей птицы,  $a_1$  и  $a_2$  – постоянные ускорения,  $pbest_i$  – лучшая найденная частицей точка,  $gbest_i$  – лучшая, из пройденных всеми частицами системы, точка,  $rnd()$  – возвращает случайное число от 0 до 1 включительно.

При распределении задач в МАС, данный метод реализуется последовательностью шагов (рис. 4.):

- 1) случайная инициализация роя частиц, т.е. агенты «разбросаны» случайным образом по всей области поиска и каждый имеет случайную скорость и направление движения;
- 2) расчет значения целевой функции, т.е. расстояние между агентами. На основе этих данных можно определить локальные и глобальные оптимальные решения,
- 3) корректировка положения агента с тем, чтобы он не выходил за рамки пространства поиска,
- 4) проверка условий останова: при их выполнении поиск заканчивается, иначе, возврат к шагу 2.

Данный алгоритм отличается простотой, сравнительно небольшим числом параметров, а также высокой точностью и быстрой сходимостью. Однако, с увеличением числа итераций, скорость корректировки становится ниже и в итоге все частицы собираются либо вблизи «оптимальной» частицы, либо оказываются в некотором локальном экстремуме, что обусловлено преждевременной сходимостью данного алгоритма.

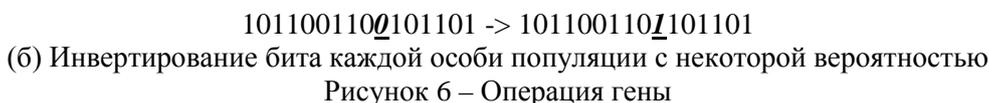
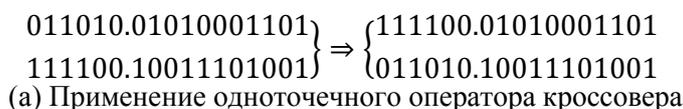
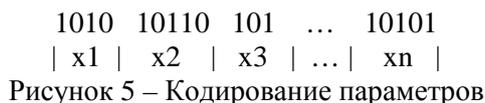


Рисунок 4 – Алгоритм, реализующий метод роя частиц

### 2.3 Генетический алгоритм

В 1975 году Джон Холланд (англ. John Henry Holland) опубликовал свою самую знаменитую работу «Adaptation in Natural and Artificial Systems». В ней он впервые ввёл термин «генетический алгоритм», а также предложил схему алгоритма, впоследствии признанную классической [16]. В его основу положен принцип, заимствованный у естественной биологической эволюции, поэтому Холланд оперировал понятием «ген». В настоящее время генетический алгоритм является одним из наиболее исследованных, он эффективно используется для решения глобальных задач оптимизации.

На старте алгоритма определено начальное пространство решений, далее в процессе эволюции появляются новые поколения, поиск которых производится в возможном пространстве решений. Сначала необходимо для операций генов каждый параметр функции приспособленности кодируется строкой битов (рис 5), тогда особью будет называться строка, являющаяся конкатенацией строк упорядоченного набора параметров: После этого начинаются операции отбора, скрещивания (рис. 6. (а)) применяется односточечный оператор кроссовера (1-point crossover) и мутации (рис. 6. (б)), причем эволюция призвана сохранять у последующих поколений положительные характеристики родителей.



Процесс распределения задач между агентами проходит следующие этапы (рис.7.):

- 1) Создание начальной популяции;
- 2) Задание целевой функции (приспособленности) для особей популяции. В рамках распределения задач приспособленность может рассматриваться время как расход ресурсов, расстояние между агентами и задачами или траты на выполнение задачи.
- 3) Отборы, скрещивания и мутации для создания новых поколений.
- 4) В качестве проверки останова которого могут рассматриваться либо заданное количество поколений, либо схождение популяции.

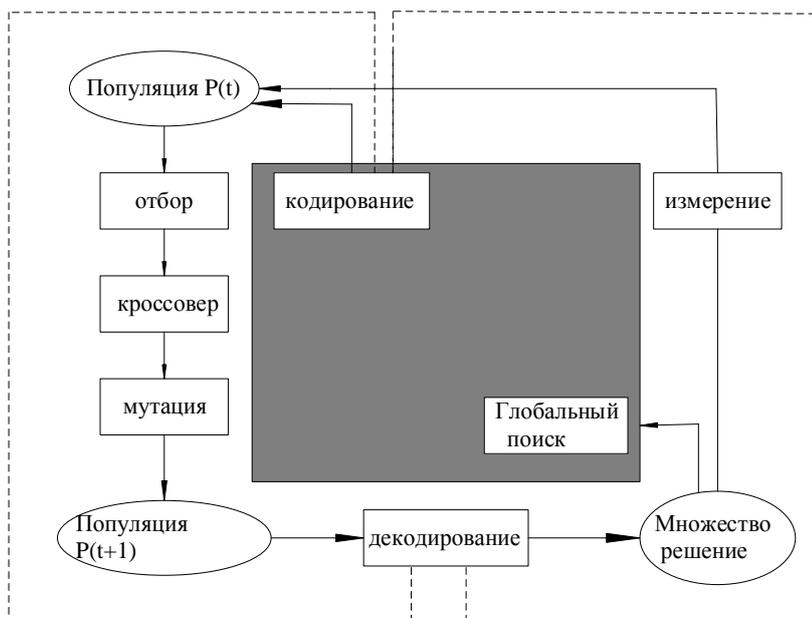


Рисунок 7 – Процесс операции генетического алгоритм

Генетический алгоритм используется для поиска универсальных решений и оптимизации многопараметрических функций, но при этом он обладает очень низкой эффективностью при нахождении точных решений. Адаптация генетического алгоритма к МАС позволяет обеспечить глобальную оптимизацию при централизованном распределении задач и найти наилучшее решение в условиях непрерывных итераций. Однако для динамического распределения задач данный алгоритм не подходит, что заставляет нас обратиться к методам распределения на основе применений рыночной экономики.

### 3. Распределение задач на основе рыночной экономики

В последнее время появился новый механизм распределенного управления, так называемый «алгоритм рынка», в основу которого положены принципы рыночной экономики. Суть его состоит в том, что агенты в МАС, динамично распределяют между собой задачи посредством переговоров, согласования и конкуренции. Эти процессы регламентируются правилами и протоколами, а их целью является приобретение максимальной прибыли для команды в целом или для каждого участника лично. К таким методам относятся протоколы сети контракта, теория игр, алгоритмы аукционов и т.д.

#### 3.1 Протокол сети контракта

Протокол сети контракта – алгоритм, позволяющий динамично распределять задачи в МАС. Агенты представляют собой узлы, формирующие сеть контракта. Каждый узел, в зависимости от конкретной задачи или в рамках одной задачи, может выполнять функцию менеджера или подрядчика (исполнителя).

Работа алгоритма описывается следующим образом:

1) **Объявление:** Если какой-либо узел по некоторой причине не может справиться с конкретной задачей, он, по возможности, разбивает ее на подзадачи и объявляет о них другим агентам сети контракта, в момент объявления данный узел становится «менеджером», а другие агенты «подрядчиками», т.е. исполнителями.

2) **Предложение цены:** «подрядчики» решают для себя, должны ли они предложить цену для выполнения задачи.

3) **Вознаграждение:** «менеджер» оценивает поступившие предложения и принимает решение о том, с кем заключить контракт, решение сообщается всем «подрядчикам», предложившим цену.

4) **Заключение контракта:** выбранный «подрядчик» заключает контракт и получает задачу на исполнение.

Описанный процесс показан на рис. 8.

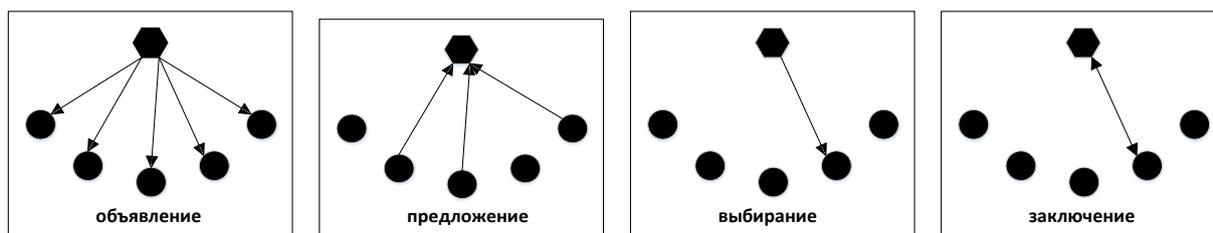


Рисунок 8 – Этапы протокола сети контракта

Если подрядчик, заключивший контракт, по каким-то причинам не может выполнить поставленную задачу (например, в случае поломки), то уже он, в свою очередь, становится «менеджером», и процесс повторяется.

Таким образом, любой агент сети может быть, как менеджером, так и подрядчиком, формируя тем самым иерархическую систему сети контракта.

Этот алгоритм эффективен при динамическом распределении задач, но его эффективность значительно снижается при расширении сети, т.е. увеличении количества агентов. Кроме того, в случаях, когда несколько агентов одновременно объявляют задачи, принятие решения в системе значительно усложняется. Еще одной проблемой данного метода является одностороннее принятие решения, т.е. «свободный» подрядчик не может инициировать предложение своих услуг «менеджеру». Устранение указанных недостатков, требует разработки новых усовершенствованных алгоритмов протоколов.

### 3.2 Теория игр

Теория игр – раздел математики, связанный с изучением оптимальных стратегий в играх и предсказанием поведения участников игр. Под игрой понимается процесс, в котором участвуют две и более стороны, ведущие борьбу за реализацию своих интересов. Каждая из сторон преследует некоторую цель и имеет определенную стратегию, ведущую к выигрышу или проигрышу, в зависимости от поведения остальных игроков. Оптимальная стратегия имеет "равновесие Нэша", которое означает, что игрок всегда выбирает наилучший, с точки зрения полезности, ход в ответ на ход соперника.

В случае многоагентной робототехнической системы при распределении задач между агентами мы будем считать роботов игроками, стратегиями – методы распределения задач, а платежные матрицы, будут отражать полезность роботов при выполнении какой-либо задачи. Существуют две основные разновидности игр: кооперативная и некооперативная. При кооперативной игре целью распределения задач является максимизация общего выигрыша или минимизация общего расхода. В случае некооперативной игры каждый агент играет «за себя», стремясь к единственной цели – максимизации собственного выигрыша. Для последнего случая оптимальная стратегия определяется равновесием Нэша, это будет означать, что, если игрок решит отклониться от такой стратегии, он минимизирует выгоду. По этой причине в распределении задач необходимо найти равновесие по Нэшу, для этого определяют все возможные ходы и их полезность, а затем избирают стратегию, которая принесет максимальную полезность.

В работе [17] Шарпан была использована теория игр для распределения задач между роботами. Шарпан рассчитывал данный процесс как Марковское распределение, затем приводил этот непрерывный процесс к потенциальной статистической игре, для которой рассчитывал глобальные функции полезности и платежные функции каждого робота. Последовательно находя равновесные процессы в подобных играх, можно определить оптимальное распределение задач. Использование Шарпан данного метода на RoboCup Rescue является тому отличным подтверждением.

### 3.3 Алгоритм аукциона

Аукцион представляет из себя конкурентную продажу товаров по заранее установленным правилам. С точки зрения распределения задач данный метод можно отнести к централизованным алгоритмам. На сегодняшний день существует большое разнообразие аукционов: английский и голландский аукционы, аукцион первой цены, аукцион второй цены и другие.

В приложении к многоагентной робототехнической системой процесс распределения задач по данному алгоритму реализуется следующей последовательностью шагов: коллектив роботов разделяется на аукционеров, отвечающих за объявление задач и заключение договоров, и участников, реагирующих на сообщенные аукционерами задачи. После получения информации о задаче участники анализируют ее, оценивают свои возможности и полезность, и решают, стоит ли участвовать в конкурсе на выполнение задачи. Затем аукционер выбирает самого лучшего претендента для выполнения конкретной задачи. В случаях, когда задача слишком сложна или объемна для одного участника, появляется необходимость формировать коалиции.

Алгоритм аукциона – очень эффективный метод для распределения задач в МАС. Его отличает большая гибкость, а также возможность динамического перераспределения задачи. Однако, он не всегда обеспечивает глобальное оптимальное решение, так как с увеличением количества агентов его эффективность резко снижается.

Помимо рассмотренных выше подходов, в рамках методов, основанных на рыночной экономике, существуют также теория договоров, алгоритм Марковских решений и другие. Их отличает высокая гибкость и возможность комбинирования с другими методами для достижения наилучшего результата.

## 4. Исследование эффективности алгоритмов

В предыдущих разделах обсуждались теоретические подходы к распределению задач в многоагентных робототехнических системах, теперь перейдем к рассмотрению примеров, касающихся реализации статического и динамического распределения задач.

### 4.1 Статическое распределение задач с применением метода роя частиц и генетического алгоритма

Задано множество задач  $M = \{m_1 m_2 m_3 \dots m_k\}$  и множество роботов  $N = \{n_1 n_2 n_3 \dots n_p\}$ . Каждый робот может выполнить несколько задач. Кроме того, известны матрицы расход и полезностей или вознаграждения:  $c_{ij}$  --- это расход при выполнении  $j$ -ой задачи  $i$ -ым роботом,  $Q [q_{ij}]$  – вознаграждение при выполнении подзадачи  $i \in \{1 \dots k\}$  агентом  $j \in \{1 \dots p\}$ . Необходимо распределить задачи таким

образом, чтобы каждый робот при выполнении выбранной задачи стремился достичь как можно меньшего расхода и большей полезности (выигрыша), учитывая интересы других роботов. То есть, чтобы суммарный выигрыш  $C = \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^k (l_{ij} \times (q_{ij} - r_{ij}))$  был максимальный, матрица  $L[l_{ij}]$ , характеризующую возможность выполнения задачи  $i$  роботом  $j$ ,  $l_{ij} = \{0,1\}$ .

Пусть десять роботов  $n=10$  вместе выполняют  $m$  задач, причем каждая задача может быть выполнена любым роботом самостоятельно.

А. Моделирование работы генетического алгоритма (ГА) с разным количеством задач и итераций:

Таблица 4. Число задач  $m=20$

Количество итераций	50	100	300	500	1000	2000	3000
Характеристика							
Полезность	645.04	635.55	632.91	629.59	615.74	606.18	602.88
Эффективность, %	---	1.5	0.4	0.5	2.2	1.55	0.54
Время моделирования, сек	1.85	3.49	9.72	16.26	35.72	73.06	104.80

Таблица 5. Число итераций =1000

Количество задач	5	10	20	30	50	100	200
Характеристика							
Время моделирования, сек	24.99	28.24	35.72	40.23	49.93	84.93	159.52
Скорость возрастания времени, %	----	13	26.5	12,6	24.1	70.1	87.2

В. Моделирование работы алгоритма роя частиц (МРЧ) с разным количеством задач и итераций:

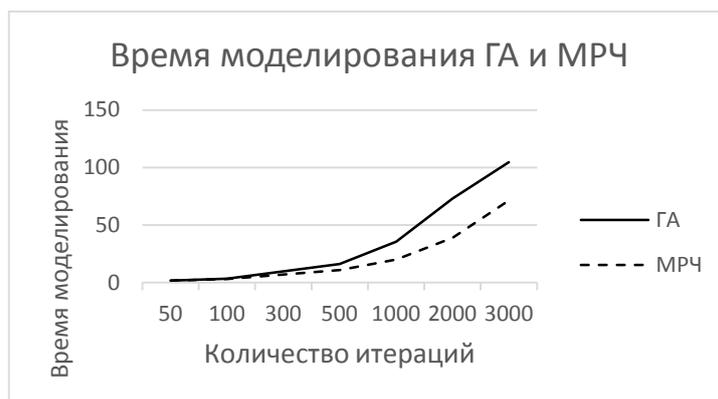
Таблица 6. Число задач  $m=20$

Количество итераций	50	100	300	500	1000	2000	3000
Характеристика							
Полезность	496.53	457.36	399.93	339.31	339.73	303.15	294.77
Эффективность, %	---	7.89	12.56	15.2	----	10.8	2.8
Время моделирования, сек	1.74	3.05	7.16	10.99	20.17	38.83	71.48

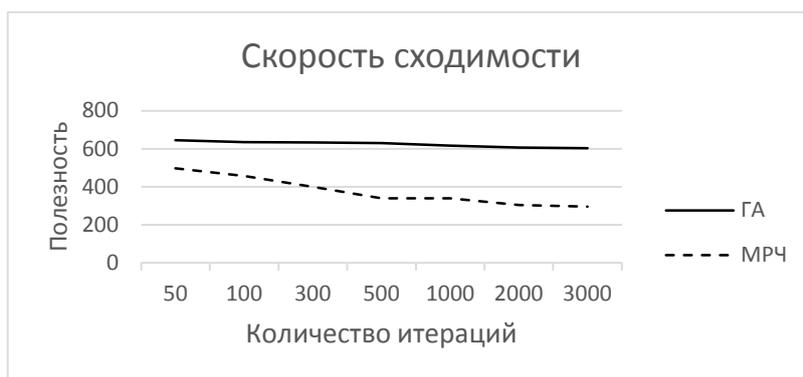
Таблица 7. Число итераций=1000

Количество задач	5	10	20	30	50	100	200
Характеристика							
Время моделирования, сек	16.59	19.52	20.17	26.62	32.62	63.35	129.10
Скорость возрастания времени, %	----	17.7	3.3	31.9	22.5	94.2	103.8

Сравнительный анализ: При сравнении таблиц 4 и 6(рис.9(а) и (б)), становится очевидным, что при равном количестве итераций алгоритм роя частиц сходится быстрее и тратит меньше время чем генетический алгоритм. Из сравнения таблиц 5 и 7 (рис.10.), видно, что скорость работы алгоритмов резко снижается с увеличением количества задач, причем при использовании алгоритма роя частиц это происходит быстрее.



(а) Время моделирования



(б) Скорость сходимости

Рисунок 9 – (а) (б) Разное количество итераций ГА и МРЧ

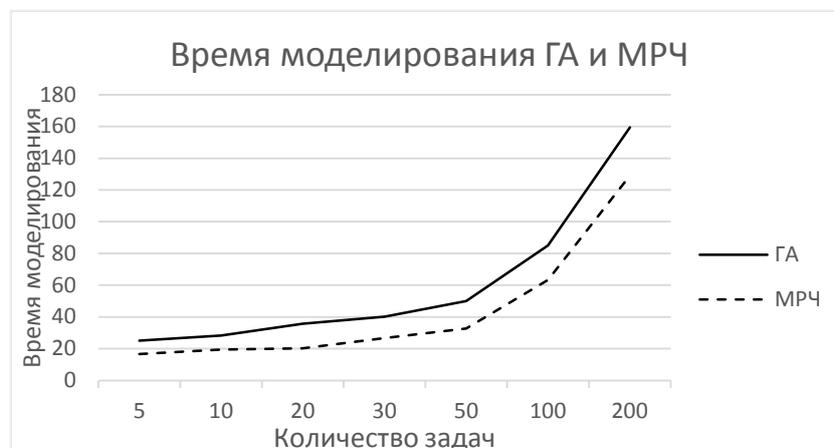


Рисунок 10 – Разное количество задач ГА и МРЧ

#### 4.2 Динамическое распределение задач с помощью алгоритма аукциона и теория игр

Пусть на ограниченной площадке размещено несколько грузов, местоположение которых неизвестно. На той же площадке находится некоторое количество агентов роботов. Необходимо транспортировать грузы в указанное место. Предполагается в МАС есть управляющий центр, обеспечивающий непрерывный поиск грузов. Как только груз найден, информация от центра передается агентам, они кооперируются, взаимодействуют друг с другом, чтобы собрать и транспортировать грузы. При этом, роботы могут выполнять задачу индивидуально, если вес груза приемлем для транспортировки его в одиночку или формировать коалиции, если груз слишком велик.

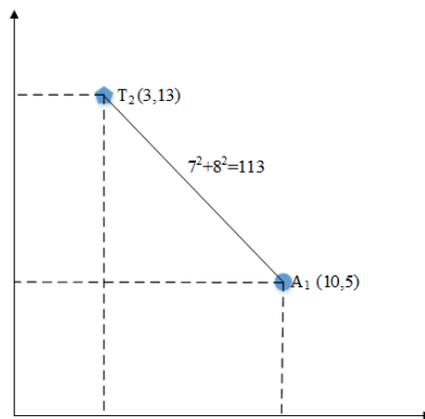
Как объяснения выше в методе аукциона роботы являются участниками аукциона, а обнаруженный груз – «товаром», он за который они коммутируют. При обнаружении груза управляющий центр перероет всем свободным агентам информацию о расположении и принадлежности грузов, причем одновременно могут предлагаться одна или несколько задач. Участники аукциона анализируют

способности задачи, оценивают свои возможности и вероятное время выполнения задачи и отправляют заявки управляющему центру, который принимает решение о том, кому поручить эту задачу.

Сначала, опишем вопрос подробно. Каждый агент  $A_i$  имеет два состояния «свободен» и «занят», он всегда знает свои координаты, и у него есть вектор возможностей размерностью  $r$ :  $\bar{C}_i^r = (\bar{C}_i^1, \bar{C}_i^2, \dots, \bar{C}_i^r)$ , элементы которого  $\bar{C}_i^k \geq 0, k=1, 2, \dots, r$ , соответствуют компетенциям, необходимым для решения задач. Каждая задача  $T_j$  связана с вектором численных значений размерности  $r$ :  $\bar{C}_j^r = (\bar{C}_j^1, \bar{C}_j^2, \dots, \bar{C}_j^r)$ ,  $\bar{C}_j^k \geq 0, k=1, 2, \dots, r$ , характеризующих компетенции, необходимые для её решения. Каждый агент может двигаться в любом направлении с постоянной скоростью, предполагается, что агенты не сталкиваются друг с другом, при наличии нескольких задач: управляющий центр сортирует задачи в порядке возрастания потребностей; если задача может быть выполнена одним роботом, то выбирается агент, получающий самое большое вознаграждение или выигрыш при выполнении этой задачи, иначе агенты формируют коалиции, чтобы вектор «возможностей» коалиции был больше чем вектор «потребность» задачи.

Пусть десять изоморфных агентов  $A_1, A_2, \dots, A_{10}$ , которые имеют одинаковые векторы возможностей  $r$ :  $C_1^1 = C_2^1 = \dots = C_{10}^1 = \{1\}$ ,  $C_i^k \geq 0, k=1$ . Координаты каждого агента указаны в табл.5.

Таблица 5. Матрица затрат (квадрат расстояния между задачами-грузами и агентами-роботами)



Задачи, координаты грузов	$T_1(9,13)$	$T_2(3,13)$	$T_3(8,5)$
Агенты, начальные координаты			
$A_1(10,5)$	65	113	4
$A_2(6,7)$	45	45	8
$A_3(3,12)$	37	1	74
$A_4(7,0)$	173	185	26
$A_5(0,10)$	90	18	89
$A_6(4,5)$	89	65	16
$A_7(3,9)$	52	16	39
$A_8(7,7)$	29	52	5
$A_9(10,12)$	2	50	53
$A_{10}(11,5)$	68	128	9

Управляющий центр обнаружил три груза (три задачи), со следующими параметрами:  $T_1\{(9,13), C_1^1 = \{2\}\}$ ,  $T_2\{(3,13), C_2^1 = \{1\}\}$ ,  $T_3\{(8,5), C_3^1 = \{4\}\}$ , то есть, для перемещения 1-го груза требуется 2 робота, для перемещения 2-го груза требуется 1 робот, для 3-го груза требуется 4 робота. Задача агентов транспортировать грузы в точку с координатами (0,0).

Процедура аукциона является итерационной и включает последовательность шагов.

1) Управляющий центр сообщает данные о грузах агентам-роботам;  
 2) Агенты посылают свои данные (состояние и координаты) центру;  
 3) Управляющий центр начинает обрабатывать данные (использование перебора); ① Сортирует все задачи в порядке возрастания потребностей:  $T_2, T_1, T_3$ ; формирует матрицу затрат в табл.5; ② Для выполнения задачи  $T_2$  достаточно одного агента, поэтому по минимуму затрат выбирая Агент  $A_3$ , статус Агента  $A_3$  становится «занят», и в дальнейшем выборе он не используется. Для задачи  $T_1$  нужно два агента, выбираются Агенты  $A_8$  и  $A_9$ , их статус меняются на «заняты». Для задачи  $T_4$  требуется четыре агента, и из «свободных» выбираются Агенты  $A_1, A_2, A_6$  и  $A_{10}$ ; ③ Результат распределения задачи показан в табл.6.

Таблица 6. Результат распределения задачи

	координаты	способности	результаты
Задача $T_2$	(3,13)	1	$A_3$
Задача $T_1$	(9,13)	2	$A_8, A_9$
Задача $T_3$	(8,5)	4	$A_1, A_2, A_6, A_{10}$

4) Управляющий сообщает результаты агентам, и агенты начинают выполнять задачи.

В данной ситуации задачи распределяются по алгоритму аукциона. Однако, при одновременном поступлении большого числа задач, скорость вычислений будет невысокой, чтобы ее увеличить, необходимо обновление алгоритма.

Учитывая предыдущую проблему, мы предложили использовать метод теории игр вместо шаг 3 в алгоритме аукциона. То рабочий центр обрабатывает данные с помощью теории игр;

В данной ситуации мы допустимы, все агенты разумные и они знают решение других агентов, и у всех агентов одна цель, уменьшающая траты (в данном примере сумма расстояний  $U = \sum_{j=1}^3 u_j$ , где  $U$  -- это глобальная платежная функция,  $u_j$  --- это платежная функция выполнения задачи  $j$ ). В результат нашей игрой является разумная и известной информации игра и наша цель найти "равновесие Нэша", то  $U^*(u_1^*, u_2^*, u_3^*) \leq U(u_1, u_2, u_3)$ .

У каждого задачи есть набор чистых стратегий:  $T_1 = \{(A_1, A_2), (A_1, A_3), (A_1, A_4) \dots\}$ ,  $T_2 = \{(A_1), (A_2), (A_3) \dots\}$ ,  $T_3 = \{(A_1, A_2, A_3, A_4), (A_1, A_2, A_3, A_5), (A_1, A_2, A_3, A_6) \dots\}$ , чтобы найти лучше кампания стратегии, нам надо пересмотреть все кампании стратегии, это слишком большая работа. Но у нашей ситуации задачи умные, они только выбирают те агенты, которые меньше тратить свои ресурсы, поэтому результат:  $U_1 = \{u_1(A_8, A_9), u_2(A_3), u_3(A_1, A_2, A_8, A_{10})\} = 58$ , но агент  $A_8$  в одно время может только выполнять одну задачу. Поэтому у нас два варианта:  $U_2 = \{u_1(A_8, A_9), u_2(A_3), u_3(A_1, A_2, A_6, A_{10})\} = 6$ ,  $U_3 = \{u_1(A_7, A_9), u_2(A_3), u_3(A_1, A_2, A_8, A_{10})\} = 81$ . Нетрудно видеть, что вариант  $U_2$  лучше, поэтому мы выбираем вариант  $U_2$ , этом и является "равновесие Нэша" то лучшее решение данного примера, то  $U^*(u_1^*, u_2^*, u_3^*) = \{u_1(A_8, A_9), u_2(A_3), u_3(A_1, A_2, A_6, A_{10})\}$ . Результат показан в табл. 7.

Таблица 7. Результат распределения задачи

	координаты	способности	результаты
Задача $T_1$	(9,13)	2	$A_8, A_9$
Задача $T_2$	(3,13)	1	$A_3$
Задача $T_3$	(8,5)	4	$A_1, A_2, A_6, A_{10}$

В данном примере комбинирование алгоритма аукциона и теории игр распределения задач между агентами. Сравнение табл. 6 и 7, заметим, что у них один и тот же результат, но нетрудно видеть, когда комбинируем алгоритма аукциона и теории игр и легче чем метод перебора.

## 5. Заключение

В данной статье рассматриваются и сравниваются разные алгоритмы и методы распределения задач между агентами. Показаны централизованные и децентрализованные методы, децентрализованные методы намного лучше, чем централизованные. В конце статьи приведено несколько примеров распределения задач между агентами. И результат показан, что каждый метод имеет свои преимущества и не достатка, но в динамической среде децентрализованные методы более эффективные.

1. Shehory O. and Kraus S., Methods for task allocation via agent coalition formation // *Artificial Intelligence*, vol. 101, pp. 165–200, May 1998
2. Юревич И.Е. и др. Интеллектуальные роботы // *Машиностроение*, 2007. С.360.
3. 唐苏妍.朱一凡.李群. 雷永林. 多Agent系统任务分配方法综述[期刊论文]//*系统工程与电子技术* 2010(10)
4. Berman S., Halasz A., Hsieh M. A. and Kumar V., Optimized stochastic policies for task allocation in swarms of robots // *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 25, no. 4, pp. 927–937, Aug. 2009.
5. Meng Y. and Gan J., Self-adaptive distributed multi-task allocation in a multi-robot system // in *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, Jun. 2008, pp. 398–404.
6. Choi H.L., Brunet L. and How J., Consensus-based decentralized auctions for robust task allocation // *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 25, no. 4, pp. 912–926, Aug. 2009.
7. Dias M. and Stentz A., Opportunistic optimization for market-based multirobot control // in *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 3, 2002, pp. 2714–2720.
8. Chapman A.C., Micillo R. A., Ramachandra Kota and Jennings N.R., Decentralized dynamic Task Allocation: A Practical Game- Theoretic Approach // In *Proceedings of 8th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, AAMAS 2009*, May 10-15, 2009, Budapest, Hungary, pp. 915-922
9. Shaheen Fatime S., Michael Wooldridge, Adaptive task resource allocation in multi-agent systems // In *Proceedings of 5<sup>th</sup> International Conference on Autonomous Agents, AGENTS' 01*, ACM, New York, NY, USA, 2001, pp.537-544
10. Yan Kong, Minjie Zhang, Dayong Ye, A Group Task Allocation Strategy in Open and Dynamic Grid Environments // presented at 7th International workshop on Agent based Complex Automated Negotiations, ACAN 2014, Paris, France, May 5-6, 2014.
11. Beni G., Wang, J. Swarm Intelligence in Cellular Robotic Systems // *Proceed. NATO Advanced Workshop on Robots and Biological Systems*, Tuscany. Italy, June 26–30 (1989).
12. Bonavear F., Dorigo M. *Swarm Intelligence: from Natural to Artificial Systems*// Oxford university Press. 1999.
13. Corne D., Dorigo M. and Glover F. *New Ideas in Optimization* // McGraw-Hill. 1999.
14. Kennedy J. and Eberhart R., Particle swarm optimization[C] // *IEEE International Conference on Neural Networks of 1995 Proceedings.*, 1995.11,4:1942—1948.
15. 王艳, 曾建潮. 多目标微粒群优化算法综述[J] // *智能系统学报*, 2010. 10, 5(5) : 377~384.
16. Holland J.H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems* // 1<sup>st</sup> ed.1975. 2<sup>nd</sup>ed., Cambridge, MA: MIT press,1992.
17. Chapman A.C., Micillo R. A., Ramachandra Kota and Jennings N.R., Decentralized dynamic Task Allocation: A Practical Game- Theoretic Approach // In *Proceedings of 8th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, AAMAS 2009*, May 10-15, 2009, Budapest, Hungary, pp. 915-92.

*S.L. Zenkevich, Hua Zhu, Meixin Zhai*

## **THE MOVEMENT CONTROL OF ROBOTS IN A GROUP BASED ON THE SMOOTHING TRAJECTORY**

*Robotics Training-Research Center, Bauman Moscow State Technical University, Moscow  
mr.zenkev@mail.ru , zhuhua1302@gmail.com , 982696853@163.com*

### **Abstract**

In this paper, we present the method of control of mobile robots moving in the convoy type formation, that is to say, the slave robot follows the position of its own leader robot and repeats the trajectory of leader. Special attention is given to obtain a follower robot motion control law along the smoothing trajectory given by the

leading robot. An algorithm is developed for generating the optimal smoothed estimate  $\hat{\mathbf{x}}(t - T|t)$  of the state  $\mathbf{x}(t - T)$  of a continuous linear system, where  $t$  is the most recent measurement and  $T$  is a positive real constant. The recurrent algorithm is obtained using the properties of state-transition matrix  $\Phi(t_1, t_2)$  of a linear dynamical system. The process of computing the fixed-lag smoothed estimate is discussed in terms of the algorithm's dependence on the solutions of the filtering and fixed-point smoothing problems.

Keywords: group, mobile robots, convoy, motion control law, fixed-lag smoothing

*С.Л. Зенкевич, Хуа Чжу, Мэйсинь Чжэй*

## УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ РОБОТОВ В ГРУППЕ НА ОСНОВЕ СГЛАЖИВАНИЯ ТРАКТОРИИ

*Научно-учебный центр «Робототехника» МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва  
mr.zenkev@mail.ru, zhuhua1302@gmail.com, 982696853@163.com*

### Аннотация

В статье рассматривается движение мобильных роботов в строю типа “конвой”, т. е. ведомые роботы следят за положением своего ведущего робота и повторяют его траекторию. Разработан закон управления ведомым роботом вдоль сглаженной траектории своего ведущего. Получен рекуррентный алгоритм сглаживания с постоянным запаздыванием и сглаживания в закрепленной точке.

Ключевые слова: группа роботов, конвой, закон управления, сглаживание с постоянным запаздыванием

### 1 Постановка задачи

Движению группы мобильных роботов в строю типа “конвой” в настоящее время уделяется большое внимание [1-5]. Приложения, связанные с такого типа движением, состоят, например, в смене дислокации группы роботов, в перевозке большого количества грузов, которые каждый робот в отдельности не в состоянии перевезти. В этой ситуации ведущий робот должен быть оснащен богатой сенсорной системой, позволяющей планировать траекторию в непредсказуемой обстановке, например, сканирующими лазерными дальномерами, системами спутниковой навигации, стереозрением. Ведомые роботы в этом случае должны только следить за положением своего ведущего робота.

Пусть мобильные роботы движутся в плоскости  $OXY$  строем типа “конвой” (рис. 1). Роботы пронумерованы от  $R_0$  – ведущего робота до  $R_N$  – замыкающего конвой. Этот тип движения требует, чтобы каждый  $i$ -ый робот,  $i = 1, \dots, N$ , кроме ведущего, двигался по траектории, вдоль которой движется  $i - 1$ -ый робот, с некоторым временным запаздыванием  $T$ . Схема системы управления каждым ведомым роботом показан на рис. 2. В данной работе особое внимание уделяется блокам 2 и 3.

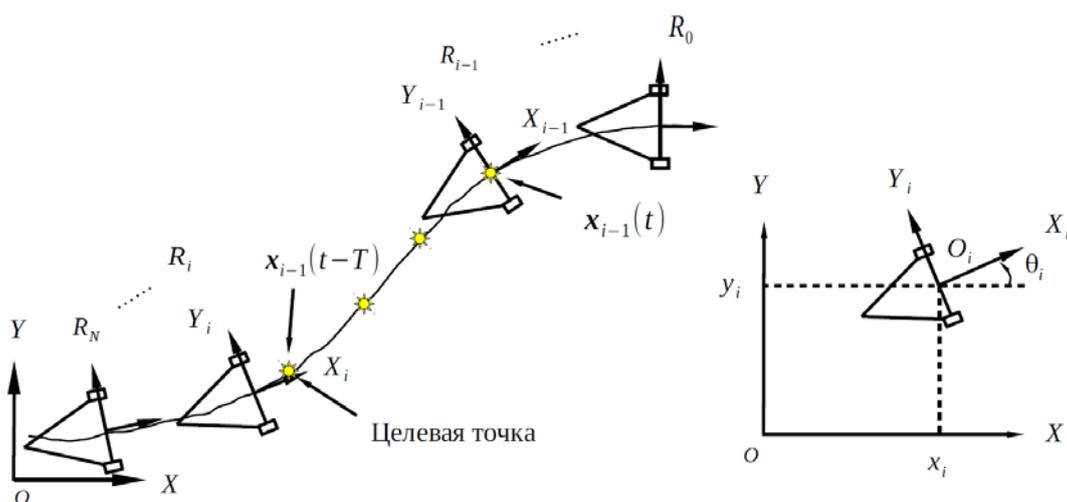


Рисунок 1 – Постановка задачи

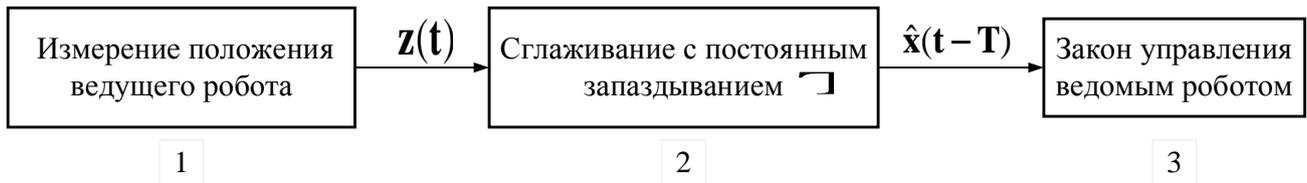


Рисунок 2 – Схема работа робота

## 2 Управление роботами

Кинематические уравнения движения робота имеют вид [6]:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \\ \dot{\theta}_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_i & 0 \\ \sin\theta_i & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_i \\ \omega_i \end{pmatrix} = J(\theta_i) \begin{pmatrix} v_i \\ \omega_i \end{pmatrix} \quad (1)$$

где  $x_i, y_i, \theta_i$  – положение и ориентация робота,  $\omega_i$  – угловая скорость робота, а  $v_i$  – линейная скорость начала связанной системы координат  $O_i$  (далее линейная скорость робота).

Стратегия управления для каждого ведомого робота как говорилось выше состоит в выполнении соотношения:

$$\mathbf{x}_i(t) = \mathbf{x}_{i-1}(t - T) \quad (2)$$

где,  $\mathbf{x}_i(t)$  представляет собой положение робота  $R_i$  в текущий момент,  $\mathbf{x}_{i-1}(t - T)$  — положение робота  $R_{i-1}$  в момент времени  $t - T$ .

Закон управления состоит в способе движения робота вдоль динамически меняющейся траектории, заданной набором точек из блока 2, и представляющей очередь.

Будем считать, что время обновления данных мало по сравнению с инерционными свойствами робота. Это означает, что на вход системы управления (т.е., блок 3) поступает непрерывная последовательность в виде программной траектории  $(x^*(t), y^*(t), \theta^*(t))$ . Тогда из уравнения (3) следует соотношения:

$$\begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix} = J^+(\theta) \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{x}\cos\theta + \dot{y}\sin\theta \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} \quad (3)$$

где,  $J^+(\theta)$ — псевдообратная матрица,  $J^+(\theta) = (J^T J)^{-1} J^T$ , а линейная скорость равна проекции вектора  $(\dot{x}, \dot{y})$  на направление движения робота. Принимая:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} (x^* - x), \\ \dot{y} &= \frac{\Delta y}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} (y^* - y), \\ \dot{\theta} &= \frac{\Delta \theta}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} (\theta^* - \theta), \end{aligned}$$

окончательно имеем закон управления в виде:

$$\begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_1(x^* - x)\cos\theta + k_1(y^* - y)\sin\theta \\ k_2(\theta^* - \theta) \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где  $k_1, k_2$  — параметры.

На рис. 3 представлена схема, иллюстрирующая формирование управляющих сигналов, обеспечивающих движение робота вдоль произвольной траектории.

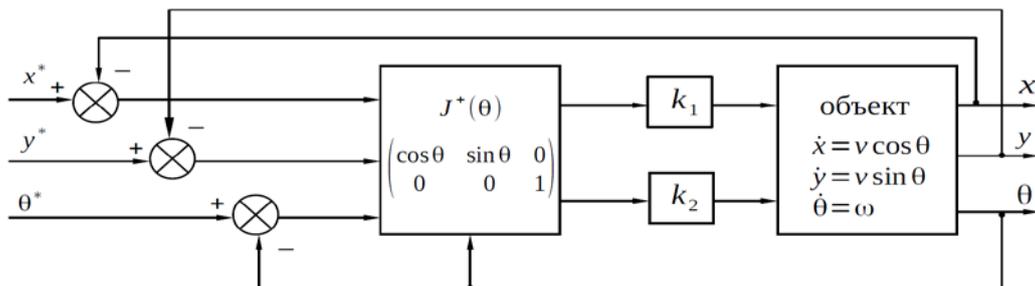


Рисунок 3 – Структурная схема управления роботом

## 3 Сглаживание траектории робота

Функционирование блока 2 состоит в том, чтобы определить оценки положения робота в каждый

момент времени  $t - T$  с учетом всего массива измерительной информации, полученный до момента время  $t$ , тем самым используя в соответствующем алгоритме как «прошлые», так и «будущие» измерения [7].

Оценки сглаживания траектории робота для линейной системы в момент  $\tau$  имеет вид [8]:

$$\hat{\mathbf{x}}(\tau|t) = \Phi(\tau, t)\hat{\mathbf{x}}(t) \quad (5)$$

где  $\hat{\mathbf{x}}(t)$  — оценка, полученная в результате применения метода теории рекуррентной фильтрации Калмана [9],  $\Phi(t_0, t)$  — фундаментальная матрица системы  $\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t)$

Дифференцируя соотношение (5) по времени  $t$ , получим:

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}}(\tau|t) = \dot{\Phi}(\tau, t)\hat{\mathbf{x}}(t) + \Phi(\tau, t)\dot{\hat{\mathbf{x}}}(t) = \left(\frac{\partial\Phi(\tau, t)}{\partial\tau} + \frac{\partial\Phi(\tau, t)}{\partial t}\right)\hat{\mathbf{x}}(t) + \Phi(\tau, t)\dot{\hat{\mathbf{x}}}(t)$$

Для вычисления  $\dot{\Phi}(\tau, t)$  используются некоторые свойства фундаментальной матрицы [10]:

$$\frac{\partial\Phi(\tau, t)}{\partial\tau} = \mathbf{A}(\tau)\Phi(\tau, t) \quad \frac{\partial\Phi(\tau, t)}{\partial t} = -\Phi(\tau, t)\mathbf{A}(t)$$

После несложных преобразований, получим оценки сглаживания положения робота:

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}}(\tau|t) = \lambda\mathbf{A}(\tau)\hat{\mathbf{x}}(\tau|t) + \mathbf{K}(t)(\mathbf{z}(t) - \mathbf{H}(t)\hat{\mathbf{x}}(t)) \quad (6)$$

Где,  $\mathbf{z}(t)$  — измерение положения робота,  $\mathbf{H}(t)$  — матрица измерения,  $\lambda = \begin{cases} \mathbf{0}, & \text{при } \tau = t_0 \\ \mathbf{E}, & \text{при } \tau = t - T \end{cases}$

$\mathbf{K}(t)$  — коэффициент сглаживания.

На рис. 4 представлен процесс вычисления оценки сглаживания с постоянным запаздыванием для линейной непрерывной системы.

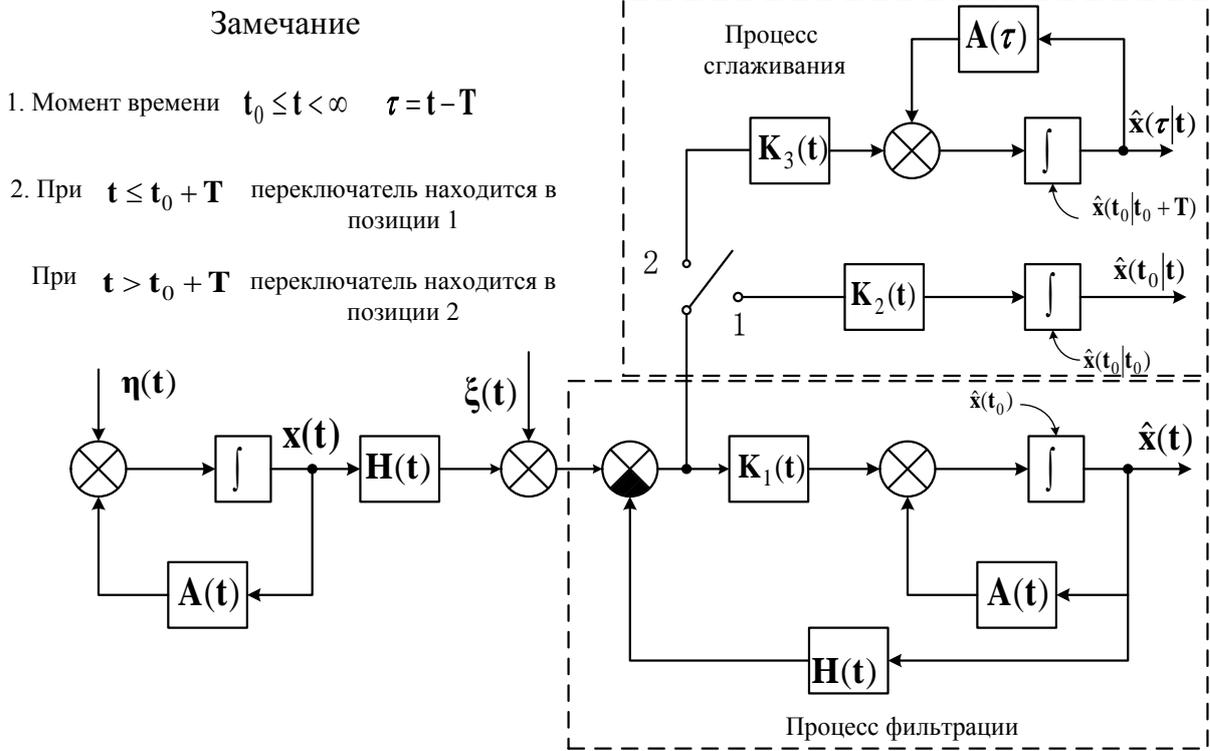


Рисунок 4 – Структурная схема вычисления оценки сглаживания с постоянным запаздыванием

В данной работе, уравнение состояния системы и измерений имеет вид:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_i(t) = \mathbf{x}_{i-1}(t - T) + \boldsymbol{\eta} \\ \mathbf{z}(t) = \mathbf{x}_i(t) + \boldsymbol{\xi} \end{cases} \quad (7)$$

где, в состав уравнения состояния системы входят  $\mathbf{x}_{i-1}(t - T)$ , возмущения и шумы измерений  $\boldsymbol{\eta}$  и  $\boldsymbol{\xi}$ , соответственно с матрицами  $\mathbf{Q}, \mathbf{R}$ . Используя предложенное уравнение, описывающее оценки сглаживания положения робота  $R_i$  с постоянным запаздыванием, имеет вид:

$$\hat{\mathbf{x}}_i(t - T|t) = \mathbf{x}_{i-1}(t - 2T) + \mathbf{K}(t)(\mathbf{z}(t) - \mathbf{x}_{i-1}(t - T)) \quad (8)$$

Заметим, что предварительно известна траектория ведущего робота  $R_0$ , понадобятся только сглаженные траектории роботов  $R_i \quad i = 1, \dots, N$ . Соответствующие параметры алгоритма сглаживания вычисляются из уравнения:

$$\begin{cases} \mathbf{K}(t) = \mathbf{L}(t)\mathbf{R}^{-1} \\ \dot{\mathbf{L}}(t) = -\mathbf{L}(t)\mathbf{R}^{-1} + \mathbf{L}(t)\mathbf{P}^{-1}\mathbf{Q} \\ \dot{\mathbf{P}}(t) = -\mathbf{P}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{P} + \mathbf{Q} \end{cases}$$

#### 4 Результаты моделирования

На рис. 5 показаны результаты моделирования закона управления. Робот  $R_0$  совершал движение с угловой скоростью  $\omega_0(t) = 0.1\sin(0.1t) \text{ rad/s}$  и линейной скоростью  $v_0(t) = 1 \text{ m/s}$ . Для ведомых роботов, выбранные параметры регулирования  $k_1 = k_2 = 10 \text{ s}^{-1}$ , выбранное время запаздывания  $T = 2 \text{ s}$ . Как видно, траектории движения трёх роботов почти совпадают.

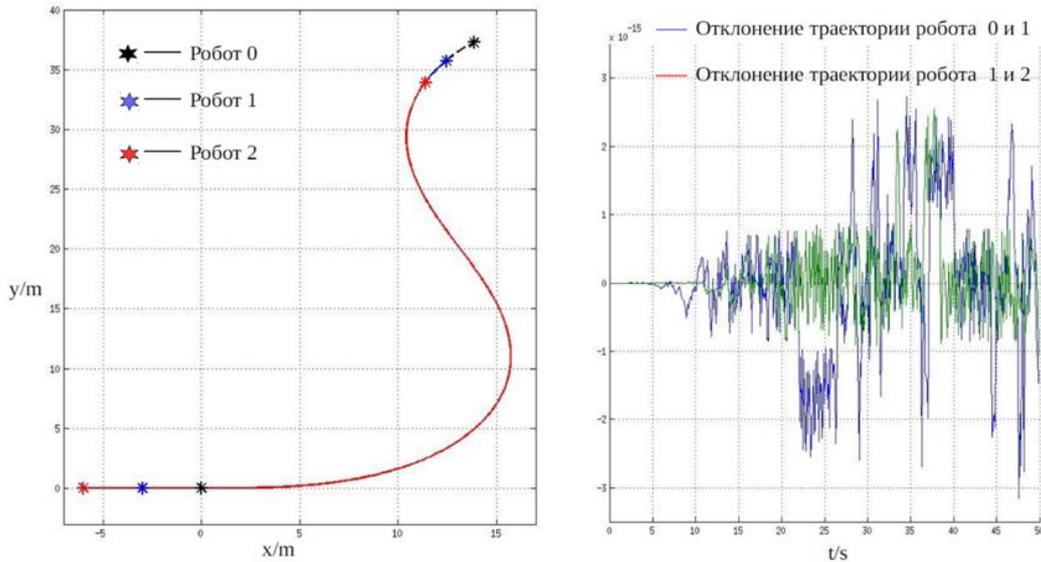


Рисунок 5 – Траектория движения трёх роботов и отклонение траекторий

На рис. 6. показаны результаты моделирования сглаживания траектории роботов.

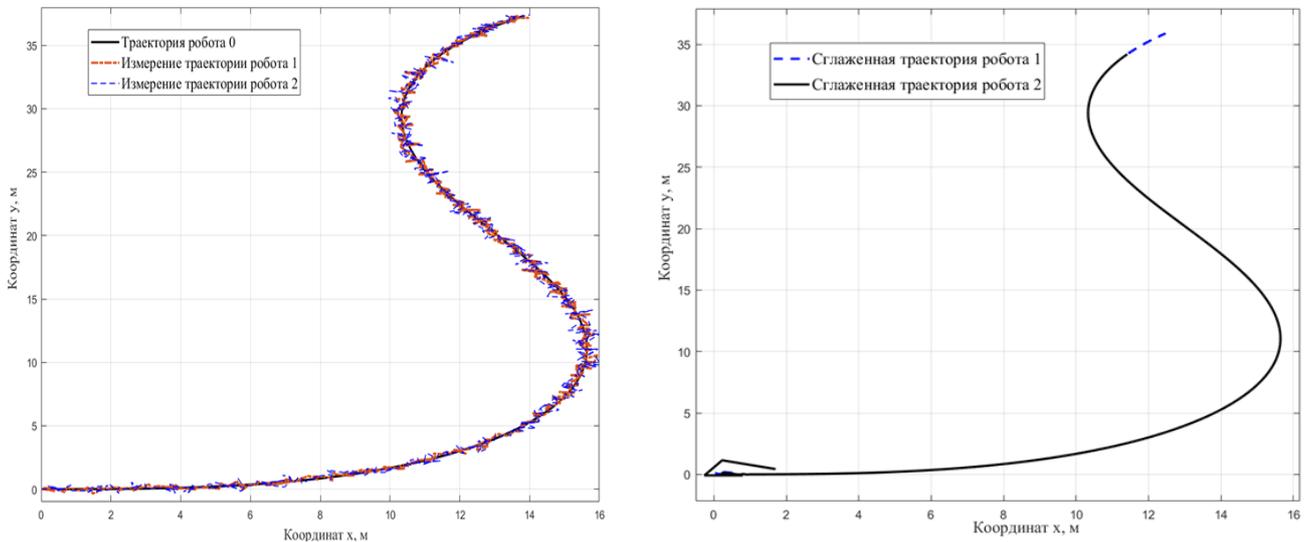


Рисунок 6 – Траектории робот  $R_1$  и  $R_2$  с шумами в измерениях и их сглаженные траектории

#### 5 Заключение

В представленной работе рассматривается решение задачи управления движением роботов в формации типа «конвой». Рассматриваемый алгоритм базируется на требовании следования каждого ведомого робота вдоль траектории ведущего робота с некоторым временным запаздыванием. Известно, что в уравнение сглаживания, построенное на основе методов рекуррентной фильтрации, входит фундаментальная матрица, решение которой представляет некоторую проблему, особенно для нестационарных систем. В работе предложен способ, позволяющий избежать построение

фундаментальной матрицы. Серия проведенных вычислительных экспериментов подтвердили работоспособность предложенных методов управления.

1. Das K., Fierro R., Kumar V. Ostrowski J. P., Spletzer J., Taylor C. J. A vision-based formation control framework // IEEE Transactions on Robotics and Automation. — 2002. — Vol. 18, № 5. — P. 813-825.
2. Yazbeck J., Scheuer A., Charpillet F. Optimized lateral control for a decentralized near-to-near platooning. // INRIA, Tech. Rep. — 2013.
3. Thuilot B., Bom J., Marmoiton F., Martinet P. Accurate automatic guidance of an urban electric vehicle relying on a kinematic GPS sensor. // In: 5<sup>th</sup> IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles, Lisboa (Portugal). — 2004.
4. Yazbeck J., Scheuer A., Charpillet F. Decentralized Near-to-Near Approach for Vehicle Platooning based on Memorization and Heuristic Search. // IEEE International Conference on Robotics & Automation. — 2014. — P. 631-638
5. Mark Daniel Ollis. Position estimation and vehicle control in autonomous multi-vehicle convoys. // Patent Application Publication, Pub. №: US 2014/0309836 A1.
6. Зенкевич С. Л., Чжу Хуа Управление движением группы роботов в строю типа “конвой” // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2017. — №1. — С.30-34.
7. Александр В. В. и др. Оптимизация динамики управляемых систем. - М.: Изд-во МГУ, 2000. —304с.
8. Абгарян К. А. Матричное исчисление с приложениями в теории динамических систем. — М.: Физматлит, 1994. — 544с.
9. Браммер К., Зиффлинг Г. Фильтр Калмана-Бьюси. — М.: Наука, 1982. — 200с.
10. Зенкевич С. Л., Заединов Р. В. Об оценке предсказания фазового вектора непрерывных линейных динамических систем // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». — 2002. — №3. — С. 72-80.

*L.A. Martynova, G.V. Konyukhov, I.V. Pashkevich, N.N. Rukhlov*

## **MULTI-AGENT APPROACH TO THE GROUP MANAGEMENT OF AUV IN CONDUCTING SEISMIC EXAMINATION<sup>XVIII</sup>**

*Concern CSRI Elektropribor*

### **Annotation**

The problem of group use of autonomous underwater vehicles in the conduct of seismic prospecting in the Arctic shelf is considered. The peculiarities of the apparatus control are associated, firstly, with the necessity of precise positioning of each apparatus at the time of listening to the signals reflected from the seabed depth generated by the emitter and during the movement of the apparatus to a new location of their dislocation, and secondly, with the movement of apparatuses, Coordinated with the motion of the radiator. To provide such a complex control apparatus in the group, it is proposed to share the multi-agent approach with elements of a centralized approach to the construction of an apparatus control system. This solution creates a certain flexibility in the distribution of functional responsibilities between the devices and makes seismic exploration more efficient.

Keywords: autonomous underwater vehicle, multi-agent approach, control system, marine seismic survey.

*L.A. Мартынова, Г.В. Конюхов, И.В. Пашкевич, Н.Н. Рухлов*

## **МУЛЬТИАГЕНТНЫЙ ПОДХОД К ГРУППОВОМУ УПРАВЛЕНИЮ АНПА ПРИ ВЕДЕНИИ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ**

*АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», Санкт-Петербург,  
martynowa999@bk.ru, iv@bk.ru, kongyl@yandex.ru, rukhlov\_nn@elprib.ru*

### **Аннотация**

Рассматривается задача группового использования автономных необитаемых подводных аппаратов при ведении сейсморазведки в Арктическом шельфе. Отмечаются особенности управления аппаратами, связанные, во-первых, с необходимостью точного позиционирования каждого аппарата в момент прослушивания отраженных от толщи морского дна сигналов, создаваемых излучателем, и во

время перемещения аппаратов к новому месту их дислокации, и во-вторых, с движением аппаратов, согласованным с движением излучателя. Для обеспечения столь сложного управления аппаратами в группе предлагается совместное использование мультиагентного подхода с элементами централизованного подхода к построению системы управления аппаратами. Такое решение создает определенную гибкость в распределении функциональных обязанностей между аппаратами и делает сейсморазведку более эффективной.

Ключевые слова: автономный обитаемый подводный аппарат, мультиагентный подход, система управления, морская сейсморазведка.

**Введение.** В настоящее время наблюдается повышенный интерес к поиску месторождений залежей углеводородов в морском дне, в особенности в Арктическом шельфе [1-3]. Наиболее целесообразным способом поиска залежей углеводородов в ледовых условиях является сейсморазведка [4-5]. При ведении сейсморазведки геофоны располагаются на морском дне для прослушивания отраженных от толщи морского дна сигналов, создаваемых излучателем. В настоящее время, в связи с развитием автономных обитаемых подводных аппаратов (АНПА), целесообразно их использовать для размещения на их борту геофоны: на каждом АНПА - по одному геофону [9-10]. В этом случае геофоны с помощью группы АНПА перемещаются в заданную точку, опускаются на дно, ведут прием и регистрацию отраженных сигналов, всплывают, перемещаются в новую точку и продолжают циклический процесс ведения сейсморазведки [11].

При таком способе ведения сейсморазведки главной целью при управлении группой АНПА является позиционирование аппаратов в соответствии со схемой постановки измерительных датчиков и синхронизация работы передающего и приемных устройств размещаемых на АНПА. Точное следование схеме относительного размещения приемных датчиков и зондирующего излучателя обеспечивает необходимую точность информации о местоположении и границах области залежей углеводородов.

Достижение указанной цели сопряжено с решением ряда важных с точки зрения управления задач, к которым относятся:

- обеспечение навигационной безопасности при перемещении;
- позиционирование в соответствии со схемой постановки;
- синхронизация периодов излучения сигнала с перемещением.

Для управления однородными АНПА в группе предлагается использовать мультиагентный подход, при котором каждый аппарат обладает определенными полномочиями и способен самостоятельно решать свои задачи. Однако в рассматриваемом варианте ведения сейсморазведки АНПА сгруппированы в ряды, и все АНПА ряда выполняют одни и те же функции, что исключает необходимость решения каждым АНПА всех задач. Является целесообразным переложить ряд задач на один из аппаратов ряда - «лидера», и рассматривать в рамках отдельно взятого ряда централизованную организацию управления аппаратами по принципу «лидер» - «ведомый».

В связи с этим встает задача определения наиболее оптимального способа перераспределения полномочий, функции между аппаратами так, чтобы наилучшим образом сочетать мультиагентный подход с централизованным. Чрезмерная самостоятельность каждого АНПА приводит к перегрузке памяти, вычислительных ресурсов, усложняет алгоритмы. Недостаточная самостоятельность не позволяет аппарату оперативно решать ряд задач, перегружает ресурсы лидера группы, линию связи и т.д.

**Целью работы** явилось определение оптимальной архитектуры системы управления АНПА для обеспечения эффективного ведения сейсморазведки.

Для достижения цели в работе были решены следующие задачи:

- проанализированы поведения АНПА на различных этапах выполнения сейсморазведки, на основании которых выработаны предложения по использованию ситуаций, требующих мультиагентного подхода, и использованию ситуаций, требующих централизованного подхода;
- разработаны алгоритмы реализации мультиагентного подхода на наиболее целесообразных этапах;
- разработаны алгоритмы централизованного подхода на наиболее целесообразных этапах;
- определено взаимодействие этих подходов и описана общая работа всей системы в целом;
- разработана математическая модель для тестирования предложенных в работе алгоритмических решений;

- проанализированы полученные результаты, на основании которых – выданы рекомендации по организации системы управления каждого аппарата при групповом их использовании при ведении сейсморазведки.

### Описание поведения группы АНПА

Перед началом выполнения сейсморазведки каждому аппарату передается маршрутное задание с указанием положения маршрутных точек. После того, как аппараты доставлены в район выполнения сейсморазведки, они выстраиваются группой в исходное положение и выполняют действия, предписанные алгоритмами поведения при ведении сейсморазведки.

При ведении сейсморазведки большая часть АНПА из группы с геофонами на борту прикреплена к дну в точках, расположенных в узлах условной сетки, покрывающей дно заданного района, и с помощью геофонов принимает отраженный сигнал, создаваемый излучателем. Перемещение излучателя осуществляется вблизи донной поверхности по циклоидальной траектории. Излучатель зондирует донную поверхность импульсными сигналами. Геофоны осуществляют прием отраженных сигналов от залежей углеводородов в придонном слое. По результатам постобработки зарегистрированных сигналов определяется местоположение залежей углеводородов. В это время другая часть АНПА перемещается для занятия новой позиции, не участвуя при этом в приеме отраженных сигналов. После занятия новой позиции прием отраженных сигналов осуществляет группа АНПА в обновленном составе, при этом часть АНПА, не задействованная в приеме отраженного сигнала, осуществляет перемещение в места новой своей дислокации и т.д.

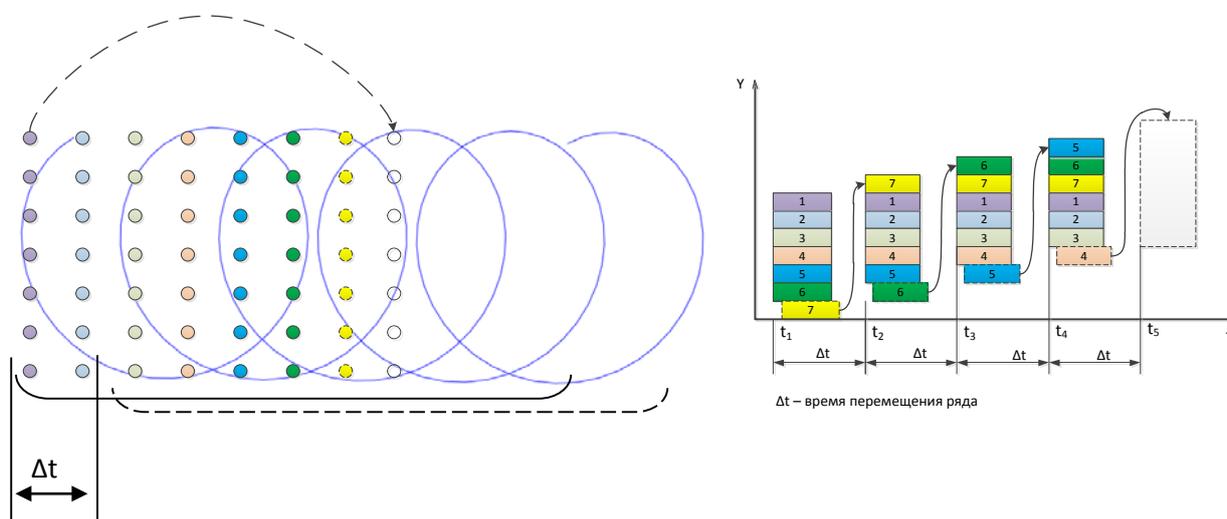


Рисунок 1 – Схема последовательного перемещения ряда АНПА, обеспечивающего согласованное перемещение группы АНПА с излучателем; справа – отдельные аппараты, слева – ряды аппаратов

Скорость движения группы АНПА определяется количеством рядов АНПА, которые последовательно перемещаются. С одной стороны, при движении группы должен быть обеспечен безаварийный режим движения АНПА, что накладывает определенные ограничения на дистанцию сближения АНПА друг с другом. С другой стороны, для поддержания возможности обмена информацией АНПА друг с другом, дистанция расхождения АНПА между собой не должна превышать некоторого допустимого значения.

Последовательное перемещение группы АНПА сначала прямолинейно (рисунок 2 слева), затем – с изменением направления поворотом группы направо (рисунок 2 справа).



Рисунок 2 – Начальный и промежуточный моменты согласованного движения излучателя и группы АНПА

При движении АНПА необходимо обеспечить выполнение следующих условий:

- перемещение АНПА не должно препятствовать приему отраженных сигналов теми АНПА, которые прикреплены к дну и заняты прослушиванием отраженных сигналов;
- движение АНПА должно производиться поверх неровностей грунта, причем для каждого АНПА это может быть индивидуальная глубина;
- глубина движения каждого АНПА должна удовлетворять условию прямой видимости для обеспечения связи АНПА друг с другом.

### **Мультиагентный подход к групповому управлению АНПА**

Как известно диапазон возможных архитектур систем управления группой аппаратов достаточно широк – от архитектур реализующих реактивные алгоритмы поведения до архитектур, предусматривающих создание и актуализацию в реальном времени многопараметрических моделей окружающей обстановки, баз данных возможных сценариев действий и автоматических планировщиков на основе разнообразных методов планирования [12, 13].

Из приведенного описания тактической ситуации при ведении сейсморазведки следует, что для четкого выполнения действий и движения группы необходимо принятие решений на нескольких уровнях.

1. На уровне отдельного АНПА необходимо принимать решения о навигации, о поддержании дистанции для устойчивой связи с соседними АНПА, а также точном позиционировании аппарата в запланированных точках измерения. Для этого наиболее целесообразно использовать подходы, в которых реализуются реактивные алгоритмы поведения. При этом для координации выполняемых действий одиночным аппаратом необходимо назначение ему текущей задачи и наличие связи между аппаратами для обмена информацией.

Передаваемое сообщение между аппаратами включает в себя:

- информацию о выполняемом действии в закодированном виде;
- значение функции полезности;
- координаты (широта, долгота, глубина);
- параметры движения (курс, скорость);
- момент времени формирования сообщения.

Благодаря поступившей информации определяется момент начала выполнения определенного действия, например, всплытия, заглубления, начала сеанса сейсморазведки, окончание сеанса сейсморазведки и т.д.

Для обеспечения устойчивой связи необходимо соблюдать дистанции между аппаратами. Это возможно только при навигационных определениях собственного положения каждым аппаратом. В случае обнаружения отклонения своего положения от маршрутной траектории или удаления от маршрутной траектории на дистанцию, превышающую допустимую, для устойчивой связи необходима корректировка положения АНПА. При корректировке необходимо учитывать неоднородность факторов, оказывающих влияние на отклонение положения АНПА от заданной маршрутной траектории, например, течения. Кроме описанных выше ситуаций аппарат должен самостоятельно принимать решения связанные с обходом препятствий, обеспечения навигационной безопасности.

Таким образом, самостоятельно АНПА принимают решения при решении задач:

- определение собственного местоположения;
- перемещение к заданной точке и позиционирование с заданной точностью;
- обеспечение навигационной безопасности;
- устранения последствий аварий и неисправностей;
- поддержания требуемой дистанции относительно других аппаратов для обеспечения связи.

2. На уровне группы аппаратов управление направлено на перемещения отдельных ее рядов. Поэтому для координации действия между рядами необходимо общение между АНПА каждого ряда. Однако общение с каждым АНПА ряда нецелесообразно, поскольку все АНПА одного ряда перемещаются с одними и теми же параметрами движения (курсом и скоростью). Поэтому целесообразно перейти от общения с каждым АНПА к общению с каким-то одним АНПА (лидером). Тогда остальные АНПА по команде лидера будут выполнять те или иные функции: всплывать, заглубляться, определять позиция, начинать или заканчивать сеанс сейсморегистрации и т.д. На этом уровне организуется планирование действий на основе непрерывно обновляемой модели обстановки. Основу такой модели могут представлять данные о навигационных препятствиях и параметрах дна, а также местоположения аппаратов (относительных или абсолютных) и их состояние.

Координация действий в этом случае будет происходить между лидерами каждого ряда, они согласовывают «межрядные» действия, а затем - выдают команды аппаратам внутри отдельно взятого ряда. Такими командами являются, например, следующие:

- начать заглубление;
- начать всплытие;
- подготовиться к сеансу приема и регистрации отраженных сигналов;
- закончить сеанс приема и отраженных сигналов
- начать движение аппаратов;
- окончить движение аппаратов.

3. Могут возникнуть ситуации, требующие переопределения лидера, например, в случае изменение направления движения группы, потери связи с «лидером» по каким-либо причинам, увеличения дистанции выше допустимой, выхода из строя связного канала или поломки собственно АНПА-лидера и т.д. Поэтому в работе был определен принцип выбора лидера, основанный на функции полезности.

В качестве функции полезности предлагается использовать обратную величину усредненной оценки расстояний между аппаратами в одном ряду. Аппарат, для которого сумма расстояний минимальная в максимальной степени обеспечит устойчивость связи и поэтому становится лидером в данном ряду.

Для обеспечения оперативной замены лидера предлагается ввести постоянный обмен значениями функциями полезности между АНПА. Каждый аппарат получает информацию от соседних аппаратов, и каждый раз принимает для себя решение: он лидер или ведомый. В том случае, если аппарат выявляет, что его функция полезности минимальна на текущий момент времени, он берет на себя функции лидера и оповещает остальные ведомые аппараты.

4. Реализация предложенного мультиагентного подхода происходит следующим образом. По результатам обмена информацией отдельно взятого, например, ведомого, аппарата с лидером и другими ведомыми аппаратами определяется дистанция от отдельно взятого аппарата до лидера и соседних аппаратов. По дистанции до лидера каждый ведомый аппарат определяет значение своей функции полезности. Это значение он передает всем остальным аппаратам ряда. Таким образом, в каждый момент времени происходит обмен информацией между АНПА внутри ряда. Каждый ведомый, получив от остальных аппаратов значения их функций полезности, сравнивает их с собственным значением. Если оно больше остальных, он меняет статус с «ведомого» на «лидер», если нет - ничего не меняет.

5. При общении аппаратов в рамках отдельно взятого ряда, предлагается использовать подход, согласно которому в том случае, если собственная функция полезности - максимальна - данные не передаются, если же по принятым данным выясняется что появился ведомый с более высоким значением функции полезности, то аппарат начинает высылать свое значение функции полезности остальным аппаратам.

Таким образом, в каждый момент времени:

- каждый ведомый общается с лидером, определяет дистанцию до лидера и на этом основании - свою функцию полезности; функция полезности «лидера» равна 1;
- все ведомые аппараты отдельно взятого ряда общаются между собой, сообщая значение функции полезности по правилу: тот, у кого больше - не сообщает, все остальные - сообщают.

Предположим, что в некоторый момент времени лидер вышел из строя, признаком этого является прекращение поступления информации от лидера всем ведомым аппаратам. Это означает, что лидер стал недоступен вне зависимости от причин. Тогда тот аппарат, который к этому моменту имел наивысший приоритет и не сообщал функцию полезности, начинает посылать 1 остальным аппаратам. Понимая это, каждый ведомый аппарат с приоритетом, следующим за лидером, становится аппаратом

с максимальной функцией полезности, и перестает посылать данные другим ведомым аппаратам. Вся описанная процедура происходит в каждый момент времени.

Пусть в некоторый момент времени, например, после окончания сеанса регистрации сейсмосигналов, лидер по сообщению от АНПА своего ряда выявил, что, с одной стороны, все аппараты всплыли на заданную глубину, а от «лидера» другого ряда выявил, что аппараты, которые до этого двигались, прикрепилась ко дну, и потенциально движению его ряда - не мешают. По команде лидера все аппараты его ряда начинают движение. Те аппараты, которые начали движение, постоянно определяют свое местоположение, и при необходимости, его корректируют. В какой-то момент каждый из них достигает заданной маршрутной точки. В этот момент они сообщают об этом лидеру. В тот момент, когда лидер собрал от всех ведомых АНПА сообщения о том, что все АНПА ряда достигли заданные точки и готовы к заглублиению, а с другой стороны, сеанс сейсморазведки закончился, и опускающиеся АНПА не создадут помех, выдается команда на заглублиение. И так далее, если движение происходит в одном и том же направлении. В том случае, если направление перемещения группы меняется, происходит перераспределение АНПА по рядам, и в каждом ряду - выборы нового «лидера». Теперь полномочия лидера переходят другим аппаратам, ведомые АНПА ориентируются на других лидеров. Вновь «избранные» лидеры общаются теперь между собой.

Аппарат является «лидером» на период выполнения отдельно взятым рядом АНПА одной определенной функции. Изменение функция или направления движения может привести к перегруппировке по рядам, и, соответственно, смене в нем лидера.

### **Функционирование предложенной мультиагентной системы**

В каждый момент времени каждый аппарат определяет свое значение функции полезности вне зависимости от того, какое конкретно действие он выполняет. Это значение он готовит для передачи другим аппаратам, с которыми удастся установить связь.

В зависимости от действий, совершаемых аппаратом вместе с другими аппаратами его ряда, выполняет следующее:

- если он лидер - то передает остальным лидерам группы сообщение о выполняемом действии; приняв такое сообщение, каждый лидер ряда определяет по заложенному у него алгоритму, какое именно действие предстоит ему предпринять дальше;
- если аппарат - не лидер, то он ждет команды от своего лидера.

**Заключение.** Предложенный подход организации взаимодействия АНПА в группе по мультиагентному принципу был проверен с помощью математического моделирования, которое позволило оценить работоспособность предлагаемой модели распределения алгоритмов управления.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований (проект № 17-08-00666).

1. Фасхутдинов Р. В. Подводные камни морской сейсморазведки // [www.Korabel.ru](http://www.Korabel.ru). 2016. вып.2(32). С. 98–106.
2. Лаверов Н. П., Дмитриевский А. Н., Богоявленский В. И. Фундаментальные аспекты освоения нефтегазовых ресурсов арктического шельфа России. Арктика: экология и экономика. 2011. № 1. С.25–37.
3. Лаверов Н. П., Лобковский Л. И., Тулупов А. В., Воронов М. А., Ганжа О. Ю. Перспективы донной сейсморазведки в Российской Федерации // Арктика: экология и экономика. 2011. № 4. С.4 – 13.
4. Мартынова Л. А. Метод согласованного поведения излучателя и автономных необитаемых подводных аппаратов для эффективного ведения сейсморазведки // Информационно-управляющие системы, №1 (86), 2017. С. 83-92.
5. Edwards D.B., A Leader-Follower Algorithm for Multiple AUV Formations// IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles. - 2004.- p 10.
6. Мартынова Л.А., Машошин А.И. Построение системы управления автономных необитаемых подводных аппаратов на базе мультиагентной технологии // Известия ЮФУ. Технические науки. №2, 2016, С.38-48.
7. Лямина Е.А., Алгоритмы управления движением группы АНПА по поисковым траекториям. Электронный ресурс
8. Браммер К., Зифлинг Г. Фильтр Калмана - Бьюси. - М.: Наука. 1982. - 200с.
9. Кебвал К. Г., Машошин А. И. Гидроакустические методы позиционирования автономных необитаемых подводных аппаратов. // Гироскопия и навигация. 2016. т. 24. № 3 (94). С. 115–130.

10. Кебкал К. Г., Кебкал А. Г., Кебкал В. К. Инструментальные средства синхронизации гидроакустических устройств связи в задачах управления подводными сенсорами, распределенными антеннами, автономными аппаратами. // Гироскопия и навигация. – 2014. -№ 2 (85). – С. 70-85.
11. Мартынова Л.А, Конюхов Г.В., Пашкевич И.В., Рухлов Н.Н. Технология разработки моделей и алгоритмов системы управления АНПА при выполнении сложной миссии // Материалы двенадцатой Всероссийской научно-практической конференции "Перспективные системы и задачи управления" 3-7 апреля 2017г. в п.Домбай Карачаево-Черкесской республики. – Ростов-на-Дону. – 2017. – С.117-128.
12. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход. 2-е изд.. Пер. с англ. - М.: Издательский дом «Вильямс», - 2006.
13. Wooldridge M. An Introduction to MultiAgent Systems. Second Edition. Willey. 2009.

*E.S. Briskin<sup>1</sup>, V.A. Serov<sup>2</sup>, N.G. Sharonov<sup>1</sup>, I.S. Penshin<sup>2</sup>*

**ON FEATURES OF MOBILE ROBOTS MOTION CONTROL WITH ANCHOR-ROPE PROPULSION DEVICES<sup>XIX</sup>**

<sup>1</sup>*Volgograd State Technical University*

<sup>2</sup>*JSC "FRPC "Titan-Barricades"*

*dtm@vstu.ru*

**Abstract**

Characteristics of this anchor-rope propulsion device have been analyzed and they work have been described. The problem of determining the control laws of the actuators provide translational uniform motion of the loading platform have been set and solved. The problems of selection of geometrical parameters have been formulated. Dependencies of tension forces in the cables to specific parameters have been determined. The equation traction and dynamic balance have been obtained.

Keywords: Underwater platform, positive buoyancy, anchor-rope propulsion device, traction-dynamic calculation.

1. Yurevich E. I. Osnovy robototekhniki (Fundamentals of robotics), BHV Petersburg, 2005, 416 p. (in Russian).
2. Briskin E. S., Chernyshev V.V, Maloletov A. V., Sharonov N. G. Sravnitel'nyj analiz koljosnyh, gusenichnyh i shagajushhih mashin (Comparative analysis of wheeled, tracked and walking machines). Robotics and Technical Cybernetics, 2013, no. 1(1), pp. 6-14 (in Russian).
3. Pavlovsky V.E. O razrabotkah shagajushhih mashin (For elaboration of walking machines), Preprint of Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS, 2013, no. 101, 32 p. (in Russian).
4. Smol'nikov B.A. Biomechanicheskie principy manevrirovaniya gidrorobota v vodnoj srede (Biomechanical principles of hidro-robot maneuvering in the aquatic environment). Robotics and Technical Cybernetics, 2017, no. 2(15), pp. 57-61 (in Russian).
5. Chernous'ko F.L., Bolotnik N.N., Gradeckij V.G. Mobil'nye roboty: problemy upravlenija i optimizacii dvizhenij (Mobile robots: problems of control and optimization of movements). VSPU-2014, IPU RAN, 2014, pp. 67-78 (in Russian).
6. Viba J., Fontaine J.-G., Kruusmaa M. Motion control optimization of robotic fish tail // J. of Vibroengineering, 2009, vol. 11, pp. 607–616.
7. Chernyshev V.V., Arykancev V.V. MAK-1 – podvodnyj shagajushhij robot (MAK-1 – underwater walking vehicle). Robotics and Technical Cybernetics, 2015, no. 2(7), pp. 45-50 (in Russian).
8. Chernyshev V.V., Arykancev V.V. Modelirovanie dinamiki shtampovoj ustanovki pri vzaimodejstvii s podvodnym gruntom (Modeling the dynamics of the stamp installation in contact with underwater soil). / Izvestija VolgGTU, Vol. 22, Volgograd, 2014, no. 25 (152), pp. 11-14 (in Russian).
9. Ohocimskij D.E., Golubev Ju.F. Mehanika i upravlenie dvizheniem avtomaticheskogo shagajushhego apparata (Mechanics and motion control automatic walking apparatus). Nauka, 1984, 310 p. (in Russian)
10. Briskin E.S., etc. Dinamika i upravlenie dvizheniem shagajushhih mashin s ciklovymi dvizhiteljami (Dynamics and motion control of walking machines with cyclic movers). Mashinostroenie, 2009, 191 p. (in Russian)

11. Briskin E.S. Ob obshhej dinamike i povorote shagajushhih mashin (About overall dynamics and turning of walking machines) / Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin. 1997, no. 6, pp. 33-39. (in Russian)
12. Problems of Increasing Efficiency and Experience of Walking Machines Elaborating / Briskin E.S. [etc.] // Advances on theory and practice of robots and manipulators: proceedings of ROMANSY 2014, Springer International Publishing, 2014. – pp. 383-390.
13. Kostenko M. P., Piotrovsky L. M. Jelektricheskie mashiny (Electric machine), Leningrad, Energiya, 1972, Part 1, 543 p., Part 2. 648 p. (in Russian).
14. Litvinov A.S., Farobin Ja.E. Avtomobil'. Teorija jekspluatacionnyh svojstv (Car. The theory of operational properties). Mashinostroyeniye, 1989, 237 p. (in Russian)
15. Briskin E. S., Sobolev V.M. Tjagovaja dinamika shagajushhih mashin s ortogonal'nymi dvizhiteljami (Traction dynamics of walking machines orthogonal propulsion systems). Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin. 1990, no. 3. pp. 28-34. (in Russian)
16. Briskin E.S., Kalinin Ya.V. and Maloletov A.V. Estimates of Efficiency of Cycle Mechanisms. Mechanics of Solids, 2017, 52 (2), pp. 128-133.

*Е.С. Брискин<sup>1</sup>, В.А. Серов<sup>2</sup>, Н.Г. Шаронов<sup>1</sup>, И.С. Пеньшин<sup>2</sup>*

## **ОБ ОСОБЕННОСТЯХ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ С ДВИЖИТЕЛЯМИ ЯКОРНО-ТРОСОВОГО ТИПА**

<sup>1</sup> *Волгоградский государственный технический университет*

<sup>2</sup> *АО «Федеральный научно-производственный центр «Титан-Баррикады»  
dtm@vstu.ru*

### **Аннотация**

Проанализированы особенности рассматриваемых якорно-тросовых движителей и описан принцип их работы. Поставлена и решена задача определения законов управления приводами обеспечивающих поступательное равномерное движение грузовой платформы. сформулированы задачи о выборе геометрических параметров якорно-тросовых движителей. Для конкретных параметров определены зависимости сил натяжения в тросах. Получено уравнение тягово-динамического баланса.

Ключевые слова: Подводная платформа, положительная плавучесть, якорно-тросовый движитель, тягово-динамический расчет.

### **Введение**

Наиболее широкое распространение среди движителей наземных мобильных роботов получили колесные и гусеничные [1], непрерывно взаимодействующие с опорной поверхностью. Однако известны движители и дискретно с ней взаимодействующие, например, шагающие, которые по целому ряду показателей их превосходят [2]. Вместе с тем, в отличие от колесных и гусеничных, кинематические схемы шагающих движителей отличаются бóльшим разнообразием [3], идет поиск и непрерывно предлагаются новые типы движителей, дискретно генерирующих движущие силы, на основе различных физических эффектов вызывающих движение мобильных роботов: змеевидные, использующие эффект асимметрии сил трения и движение внутренних масс для перемещения по ровным поверхностям, движители с присосками для перемещения по вертикальным поверхностям, движители типа «рыбьего плавника» для перемещения в водной среде и др. [4 – 6].

Особенно актуальна разработка движителей, способных осуществлять перемещения технологического оборудования в придонных областях мирового океана, что обусловлено растущей потребностью освоения его недр [7].

При движении в придонной области водоема возможны два различных метода движения:

- перемещение с опорой на поверхность дна;
- подводное плавание в околдонной зоне.

В первом случае могут применяться или колесные, или гусеничные, или шагающие движители, и требуется развитая специальная информационно-измерительная система для оценки свойств грунта, с точки зрения обеспечения профильной и грунтовой проходимости на всей траектории движения или отказа от такого движения, например, при движении по крутому склону.

Во втором случае информационно-измерительная система необходима только для оценки свойств грунта в конечной точке движения, при установке технологического оборудования на грунт, что может быть обеспечено, например, пенетрометром [8]. Обеспечивается такой вид перемещения винтовым

двигателем, двигателем типа «рыбий хвост» [6] и т.п., а само технологическое оборудование должно иметь близкую к нулевой плавучесть, что достигается управлением балластом. В этом случае вообще не стоит задача о профильной проходимости, но встает задача обеспечения мореходных качеств роботу.

Энергетически более эффективным является перемещение за счет взаимодействия двигателя с грунтом, а не с водной средой. Действительно, для того, чтобы тело массы  $m$  стало двигаться со скоростью  $V$ , другое тело массы  $M$  должно приобрести скорость  $U$ , но направленную в противоположную сторону:

$$U = \frac{m}{M}V \quad (1)$$

Для этого необходимо совершить работу  $A$ :

$$A = \frac{1}{2}mV^2 + \frac{1}{2}MU^2 = \frac{1}{2}mV^2 \left(1 + \frac{m}{M}\right) \quad (2)$$

В случае контакта двигателя с грунтом без проскальзывания в уравнениях (1, 2)  $M$  – масса Земли, в случае работы винта, весла или «рыбьего хвоста»  $M$  – масса отброшенной воды. Поэтому, с точки зрения энергоэффективности и позиционирования оборудования, лучше взаимодействовать с грунтом, а с точки зрения проходимости и простоты управления лучше плавать.

Особенностью мобильных роботов, перемещающихся в водной среде, является наличие выталкивающей силы, которая может быть соизмерима с весом робота.

Поэтому разумный компромисс – использование плавающих на небольшой высоте от дна мобильных роботов с управляемой плавучестью, а в качестве средств перемещения – якорно-тросовых двигателей, взаимодействующих с дном водоема (рисунок 1).

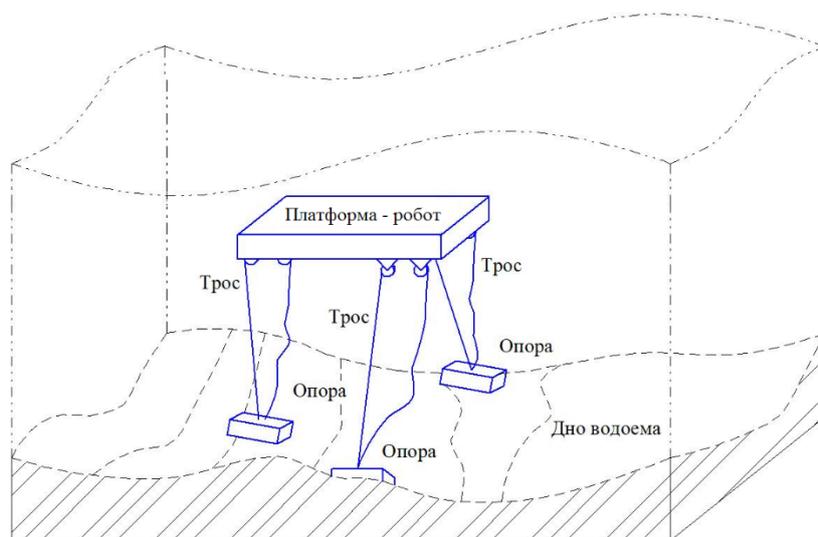


Рисунок 1 – Перемещение подводной платформы с положительной плавучестью

Особенностью таких двигателей является:

- практически идеальная профильная проходимость, обусловленная отсутствием зависимости перемещения от рельефа дна;
- возможность рассматривать плавающие платформы с такими двигателями как модули, допускающие сборку любой конфигурации и грузоподъемности;
- необходимость определения точек подвеса тросов тросово-якорных двигателей на корпусе платформы, обеспечивающих требуемую устойчивость в зависимости от перемещаемого груза и возможных программных движений.

### Описание кинематической схемы и принципа работы якорно-тросового двигателя

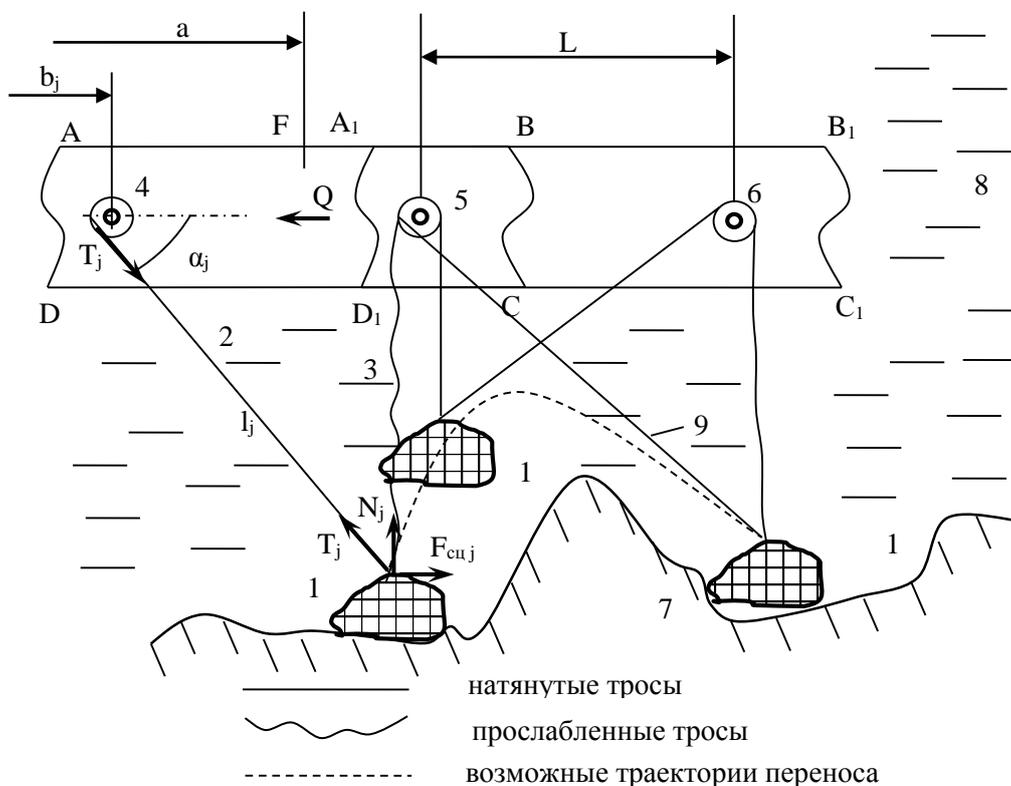
Кинематическая схема и принцип работы якорно-тросового двигателя представлены на рис. 2.

Двигателем является якорь, двумя тросами 2, 3 связанный с вращающимися в соответствии с определенными законами барабанами. Под якорем понимается массивное тело произвольной формы, находящееся на дне. В исходном положении трос 3 ослаблен, якорь в отсутствии течения занимает положение на одной вертикали с барабаном 5. При работе барабана трос 2 натягивается и, в отсутствии

проскальзывания якоря по дну, мобильный робот перемещается. На рисунке 2 показан фрагмент робота  $ABCD$ , который перемещается в положение  $A_1B_1C_1D_1$  таким образом, чтобы ось барабана 4 в новом положении совпала с осью барабана 5 в исходном. Ось барабана 5 перемещается в положение 6. Затем совместным согласованным управлением барабанов якорь переместится в новое положение. Его подъем облегчается тем, что трос, осуществляющий подъем, занимает близкое к вертикальному положение. Затем цикл повторяется. Работа такого движителя подобна работе шагающего [9, 10], а отличие состоит в том, что робот не опирается на него, а с его помощью удерживается относительно опорной поверхности.

### Постановка задачи

Ставится задача определения законов управления вращательным движением барабанов, требуемых для этого моментов сил, развиваемых приводными двигателями, и их мощности при поступательном горизонтальном движении корпуса робота и известной начальной конфигурации якорно-тросовых движителей. Конфигурация движителей описывается координатами  $b_j$  барабанов относительно центра масс корпуса робота весом  $G$ , расстоянием  $S$  между положениями  $ABCD$  и  $A_1B_1C_1D_1$  корпуса, длиной тросов  $l_j$  и углами  $\alpha_j$ , характеризующих их ориентацию в начальный момент времени, положением  $a$  точки приложения выталкивающей силы и её величины  $F$ , расстоянием  $L$  между барабанами. В силу относительно небольшой длины тросов их провисание не учитывается.



$ABCD, A_1B_1C_1D_1$  – соответственно исходное и последующее положение фрагмента робота, 1 – якорь, 2, 3 – тросы, 4, 5, 6 – управляемые барабаны, 7 – профиль дна, 8 – водная среда, 9 – траектория переноса якоря,  $a$  – расстояние от центра масс робота до точки приложения выталкивающей силы  $F$ ,  $b_j$  – расстояние от центра масс робота до оси барабана,  $\alpha_j$  – угол ориентации троса

Рисунок 2 – Кинематическая схема и принцип работы якорно-тросового движителя мобильного робота с положительной плавучестью

### Метод решения

Метод решения поставленной задачи основывается на составлении уравнений поступательного равномерного движения твердого тела в вязкой среде с избыточным наличием нестационарных связей и уравнений равновесия твердых тел (якорей), взаимодействующих с нелинейной упругодиссипативной средой (придонный грунт), моделируемой как твердое шероховатое тело с горизонтальной ровной поверхностью. Нестационарными связями являются тросы, длины которых изменяются в соответствии

с уравнениями программного движения робота, определяемых местом расположения управляемых барабанов и положением якоря. Таким образом, уравнения поступательного равномерного движения имеют вид

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^N F_{xj} = 0 \\ \sum_{j=1}^N F_{yj} = 0 \\ \sum_{j=1}^N M_{cj} = 0 \end{cases} \begin{cases} \sum_{j=1}^N T_j \cos \alpha_j - Q = 0 \\ -\sum_{j=1}^N T_j \sin \alpha_j + F - G = 0, \\ -\sum_{j=1}^N T_j b_j \sin \alpha_j + Fa = 0 \end{cases} \quad (3)$$

где  $T_j$  – усилие в тросе, удерживающем  $j$ -ый якорь,  $j = 1 \dots N$ ,  $N$  – число якорей.

В процессе движения углы  $\alpha_j$  меняются в зависимости от пройденного расстояния  $S$ :

$$\operatorname{tg} \alpha_j = \frac{l_{j0} \sin \alpha_{j0}}{l_{j0} \cos \alpha_{j0} - S}, \quad (4)$$

где  $\alpha_{j0}$ ,  $l_{j0}$  – начальные значения углов и длин тросов.

Длины тросов также изменяются:

$$l_j(S) = \sqrt{(l_{j0} \cos \alpha_{j0} - S)^2 + l_{j0}^2 \sin^2 \alpha_{j0}}. \quad (5)$$

Тогда угол поворота управляемого  $j$ -ого барабана

$$\psi_j = \frac{\Delta l_j}{R} = \frac{1}{R} [l_{j0} - l_j(S)]. \quad (6)$$

где  $R$  – радиус барабана.

Для находящихся в покое якорей уравнения равновесия имеют вид

$$\begin{cases} N_j + T_j \sin \alpha_j - mg = 0 \\ F_{\text{нб}j} - N_j \cos \alpha_j = 0 \end{cases}. \quad (7)$$

где  $N_j$ ,  $mg$ ,  $F_{\text{си}j}$  соответственно нормальная реакция, вес якоря и сила сцепления с грунтом.

Условием осуществимости такого движения является выполнение неравенств

$$\begin{aligned} N_j &= mg - T_j \sin \alpha_j > 0 \\ F_{\text{нб} \max} &\geq (mg - T_j \sin \alpha_j) \cos \alpha_j \end{aligned} \quad (8)$$

Наличие избыточных связей предполагает составление дополнительных уравнений, отличных от уравнений движения. Так, если имеются  $N$  связей (тросов), а уравнений поступательного движения в вертикальной плоскости можно составить только 3, то  $N-3$  уравнения могут составляться, например, на основе принципа совместности деформаций, как это выполнено, например, для шагающих машин [11].

Предлагаемый метод предусматривает другой способ, основанный на возможностях системы управления, формирующей определенные соотношения между действующими силами натяжения тросов. Наиболее простой способ – формирование линейных  $N-3$  соотношений между  $N$  неизвестными силами – уравнений управления, обусловленных системой управления.

Уравнения (3) дополняются  $N-3$  уравнениями управления

$$\sum_{j=1}^N A_{ji} T_j = B_i, \quad i = 1, 2 \dots N-3, \quad (9)$$

где  $A_{ji}$ ,  $B_i$  – соответственно элементы матрицы  $A$  и вектора  $B$  управления [12], выбираемые на основе критериев, например, равенства всех сил натяжения, или их минимума, или минимума тепловых потерь в приводных движителях управляющих длиной тросов, и т.д.

Действительно, уравнения вращательного движения барабанов, управляющих длиной тросов, для двигателей, например, постоянного тока [13] имеют вид:

$$J \ddot{\psi}_j = M_j - T_j R = k U_j - \gamma \dot{\psi}_j - T_j R, \quad (10)$$

где  $J$ ,  $\psi_j$  – момент инерции барабана и угол его поворота,  $M_j$  – развиваемый  $j$ -ым двигателем момент,  $U_j$  – напряжение, подаваемое на  $j$ -ый двигатель,  $k$ ,  $\gamma$  – параметры, характеризующие двигатель.

Используя (10), усилие в тросах можно выразить в виде

$$T_j = \frac{1}{R} (kU_j - \gamma\dot{\psi}_j - J\ddot{\psi}_j). \quad (11)$$

Причем, если оказывается, что  $T_j < 0$ , то соответствующий якорь поднимается и переносится в новое место и расчет (3-9) производится от нового положения.

Тогда уравнения (9) с учетом (11) – это уравнения для определения подаваемых напряжений

$$\sum_{j=1}^N A_{ij} k U_j = B_i R + \sum_{j=1}^N A_{ij} \gamma \dot{\psi}_j + \sum_{j=1}^N A_{ij} J \ddot{\psi}_j, \quad (12)$$

а уравнения (3) с учетом (12) также записываются относительно напряжений  $U_j$ . В этих уравнениях на основе программного движения

$$\dot{\psi}_j = -\frac{\dot{S}}{R} \frac{dl_j}{dS}, \quad \ddot{\psi}_j = -\frac{\dot{S}^2}{R} \frac{d^2 l_j}{dS^2} - \frac{\ddot{S}}{R} \frac{dl_j}{dS}. \quad (13)$$

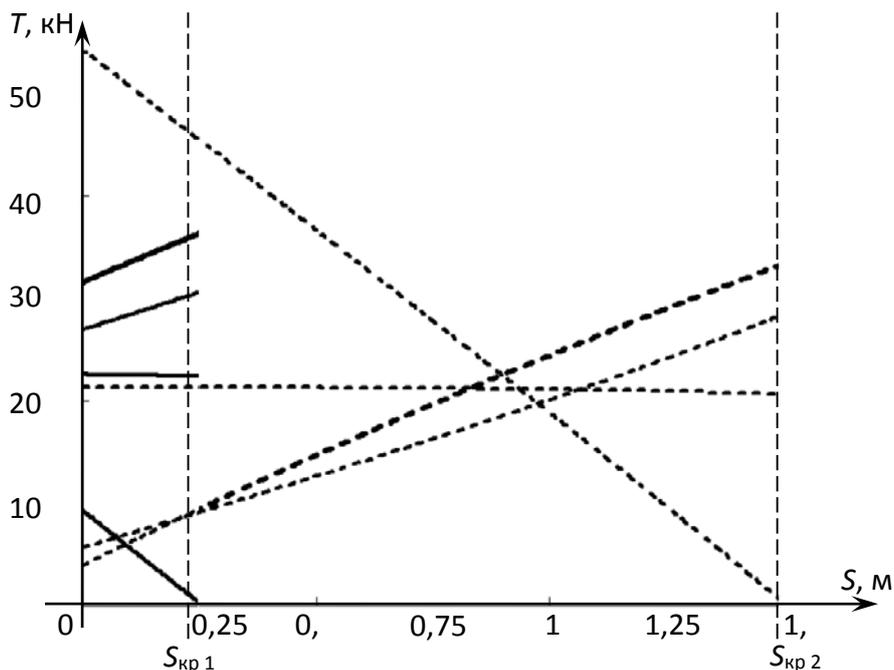
Если, например,  $S = vt$ , то в (13)  $\dot{S} = v$ ;  $\ddot{S} = 0$ .

Примеры изменения сил натяжения в тросах с матрицей  $A$  и вектором управления  $B$  при  $N = 5$

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & -3 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & -3 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (14)$$

при различных силах сопротивления движению для платформы с параметрами:  $G = 400$  кН,  $F = 500$  кН,  $Q = 50$  кН,  $b_1 = 15$  м,  $b_2 = 8$  м,  $b_3 = 1$  м,  $b_4 = -3$  м,  $b_5 = -10$  м,  $\alpha_{10} = 59^\circ$ ,  $\alpha_{20} = 90^\circ$ ,  $\alpha_{30} = \alpha_{40} = 63,4^\circ$ ,  $\alpha_{50} = 59^\circ$  представлены на рисунке 3. При этих параметрах подводной платформы особенностью является уменьшение шага с увеличением силы сопротивления.

Установленные закономерности являются основой для тягово-динамического расчета. Для его осуществления необходимы исследования и оптимизация последовательности переноса якорей в новое положение.



пунктирная линия –  $Q = 25$  кН, сплошная линия –  $Q = 50$  кН,  $S_{кр1}$ ,  $S_{кр2}$  – допустимое перемещение без перестановки якорей, 1, 2, 3, 4, 5 – номера тросов

Рисунок 3 – Зависимость сил натяжения тросов от перемещения груза  $S$  на постоянной высоте от уровня ровной поверхности дна  $h = 5$  м

### Тягово-динамический расчет

Тягово-динамический расчет предполагает определение необходимой мощности двигателей в зависимости от скорости движения и сил сопротивления при равномерном маршевом поступательном движении транспортного средства [14, 15], а в рассматриваемом случае - подводной платформы.

Для преодоления силы полезного сопротивления  $Q$ , которую при малых скоростях движения можно представить в форме,

$$Q = \mu V .$$

на перемещении  $L$  требуется совершить полезную работу

$$W_{\text{иіє}} = \mu VL .$$

При этом тепловые потери  $W_0$  в двигателях, управляющих длиной тросов якорно-тросовых движителей на том же перемещении при малых  $\dot{\psi}$ ,  $\ddot{\psi}$  в соответствии с (10, 11) определяются выражением

$$W_0 = \frac{\alpha}{V} \sum_j \int_0^L T_j^2 dS .$$

где  $\alpha$  – параметр двигателя, зависящий от активного сопротивления его обмотки [16].

Таким образом, без учета работы на перемещение якорей в новое положение и их проскальзывание на грунте при работе в тяговом режиме полная работа  $W$  на одном шаге  $L$  равна

$$W = W_{\text{иіє}} + W_0 = \mu VL \frac{\alpha}{V} \sum_{j=1}^N \int_0^L T_j^2 dS .$$

Результат (18) позволяет ставить задачу о расположении точек подвеса якорей на подводной платформе, обеспечивающих минимум тепловых потерь  $W_0$  и определение оптимальной скорости движения  $V_{\text{опт}}$ , при которой полная работа на единицу пути минимально. Имея ввиду, что  $T_j = T_j(Q) = T_j(\mu V)$  то

$$\alpha \sum_{j=1}^N \int_0^L T_j^2 dS = P(\mu V) .$$

Тогда  $V_{\text{опт}}$  определяется из уравнения

$$\mu LV^2 + \frac{dP}{dV} \mu V - P(\mu V) = 0$$

### Заключение

1. Проанализированы достоинства якорно-тросовых движителей для перемещения подводных платформ с положительной плавучестью по энергоэффективности и проходимости на основе учета особенностей взаимодействия перемещаемого тела с окружающей средой.

2. Дано описание возможной кинематической схемы подводной платформы с якорно-тросовыми движителями и методов управления их равномерным поступательным движением.

3. Установлены законы, описывающие поступательное движение с малыми скоростями подводной платформы с положительной плавучестью и якорно-тросовыми движителями.

4. Определены закономерности изменения сил натяжения в якорно-тросовых движителях для модельной задачи.

5. Поставлена задача об оптимальном размещении точек подвеса якорно-тросовых движителей на подводной платформе и определении последовательности переноса якорей в новое положение.

6. Получено уравнение тягово-динамического баланса для определения оптимальной скорости перемещения подводной платформы, обеспечивающей минимум энергозатрат в приводах якорно-тросовых движителей.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-01-00675 а.

1. Юревич Е.И. Основы робототехники // 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: БХВ Петербург, 2005. - 416 с.
2. Сравнительный анализ колёсных, гусеничных и шагающих машин / Е.С. Брискин, В.В. Чернышев, А.В. Малолетов, Н.Г. Шаронов // Робототехника и техническая кибернетика. - 2013. - № 1. - С. 6-14.
3. Павловский В.Е. О разработках шагающих машин // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2013. № 101. 32 с.
4. Смольников Б.А. Биомеханические принципы маневрирования гидроробота в водной среде // Робототехника и техническая кибернетика. – 2017. – №2(15). – С. 57-61.
5. Черноусько Ф.Л., Болотник Н.Н., Градецкий В.Г. Мобильные роботы: проблемы управления и оптимизации движений. / ВСПУ-2014, ИПУ РАН. -2014. -С. 67-78.
6. Viba J., Fontaine J.-G., Kruusmaa M. Motion control optimization of robotic fish tail // J. of Vibroengineering, 2009, vol. 11, pp. 607–616.

7. МАК-1 – подводный шагающий робот / В.В. Чернышев, В.В. Арыканцев // Робототехника и техническая кибернетика. - 2015. - № 2. - С. 45-50.
8. Чернышев В.В., Арыканцев В.В. Моделирование динамики штамповой установки при взаимодействии с подводным грунтом. / Известия ВолгГТУ. Вып. 22. - Волгоград, 2014. - № 25 (152). - С. 11-14.
9. Охоцимский Д.Е., Голубев Ю.Ф. Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата. -М.: Наука, 1984. 310 с.
10. Е.С. Брискин и др. Динамика и управление движением шагающих машин с цикловыми движителями. -М.: Машиностроение, 2009. 191 с.
11. Брискин Е.С. Об общей динамике и повороте шагающих машин / Проблемы машиностроения и надежности машин. 1997. № 6. - С. 33-39.
12. Problems of Increasing Efficiency and Experience of Walking Machines Elaborating / Briskin E.S. [etc.] // Advances on theory and practice of robots and manipulators : proceedings of ROMANSY 2014, Springer International Publishing, 2014. – P. 383-390.
13. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. В 2-х частях. -Л. Энергия, 1972. ч.1 543 с., ч.2 648 с.
14. Литвинов А.С., Фаробин Я.Е. Автомобиль. Теория эксплуатационных свойств. -М.: Машиностроение, 1989. -237с.
15. Брискин Е.С., Соболев В.М. Тяговая динамика шагающих машин с ортогональными движителями. / Проблемы машиностроения и надежности машин. 1990. № 3. С. 28-34.
16. Briskin E.S., Kalinin Ya.V. and Maloletov A.V. Estimates of Efficiency of Cycle Mechanisms. Mechanics of Solids, 2017, 52 (2), pp. 128-133.

## РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ РТК/ DEVELOPMENTS AND APPLICATION OF RTC

*I.V. Ryadchikov, E.V. Nikulchev, S.I. Sechenev, S.G. Sinitsa, A.V. Bolshakov,  
A.A. Feshin, A.M. Alotaki, A.N. Smirnov, P.P. Volkodav*

### DESIGN AND CONTROL OF SELF-STABILIZING ANGULAR ROBOTICS ANYWALKER<sup>XX</sup>

*Kuban State University, Krasnodar,  
Moscow Technological Institute, Moscow, nikulchev@mail.ru*

#### Abstract

Walking robots are designed to overcome obstacles when moving. Developed by the robot AnyWalker, in the design of which the task of self-stabilization of the center of the mass is solved, a special type of chassis is developed, providing movement on high cross-country capability. The paper presents the results of designing and controlling the robot, the architecture of the software complex that provides management and mastification of the hardware platform.

Keywords: walking robots, platform self-stabilization, stability of dynamic systems, chassis of robotic complexes.

*И.В. Рядчиков, Е.В. Никульчев, С.И. Сеченев, С.Г. Сеница, А.В. Большаков,  
А.А. Фешин, А.М. Алотаки, А.Н. Смирнов, П.П. Волкодав*

### ПРОЕКТИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ САМОСТАБИЛИЗИРУЮЩЕГО ШАГАЮЩЕГО РОБОТА ANYWALKER

*Кубанский государственный университет, г. Краснодар,  
Московский технологический институт, г. Москва, nikulchev@mail.ru*

#### Аннотация

Шагающие роботы предназначены для преодоления препятствий при перемещении. Разработан шагающий робот AnyWalker, в конструкции которого решена задача самостабилизации центра масс, разработаны специального вида шасси, обеспечивающие перемещение по высокой проходимости. В докладе приведены результаты проектирования и управления роботом, архитектура программного комплекса, обеспечивающего управление и масштабирование аппаратной платформы.

Ключевые слова: шагающие роботы, самостабилизация платформы, устойчивость динамических систем, шасси робототехнических комплексов.

**Введение.** Значительное количество перемещающихся транспортных робототехнических комплексов имеют колесный или гусеничный ход. Однако такие роботы становятся практически бесполезными на пересеченной местности, в помещениях со ступеньками и большим количеством препятствий [1]. Это особенно важно в опасных средах, в шахтах или там, где необходимо сохранить ландшафт. Многие исследования в последние годы направлены на реализацию и изучение качественных характеристик конструкций шагающих роботов [2].

Ограничение, накладываемое на преодоление препятствий колесными роботами, напрямую зависит от диаметра колеса. В то время как шагающие роботы могут преодолевать препятствия и ограничены длиной ноги. Еще одно важное преимущество шагающих роботов заключается в том, что в местности должны присутствовать только локальные горизонтальные опоры. Это позволяет преодолевать очень крутые углы при сохранении устойчивости тела [3]. Шагающие роботы были использованы при исследовании удаленных мест и враждебных сред, таких как морское дно, в космосе, на атомных электростанциях, а также в спасательных операциях [4]. Помимо этого транспортные средства с шагающим принципом могут использоваться, например, при сборе материалов, при перевозке грузов, в качестве сервисных роботов, для перемещения в труднодоступные участки производств и магистральных трубопроводов. По мнению ведущих вузов и компаний-аналитиков США, выраженных в отчете A Roadmap for US Robotics 2016, «Чтобы оптимизировать автоматизацию процессов логистических цепочек в мире, роботы должны иметь подвижность, соответствующую

уровню человека: роботы должны уметь преодолевать лестницы, эскалаторы, дверные проемы, бордюры, обломки бетона, непредсказуемую среду, и двигаться так же, как люди. Такой тип расширенной мобильности возможен для роботов, снабженных ногами. Тогда логистика станет 24/7 и недорогой».

Несмотря на широкий спектр применения, многие задачи остаются не решенными, что затрудняет широкое применение шагающих роботов. К недостаткам относятся — высокая сложность управления и стабилизации, стоимость, низкая энергоэффективность и относительно низкая скорость. На преодоление которых и направлены современные исследования [5].

В основу передвижения шагающих систем заложены, принципы перемещения человеком и животными это — шаг, бег, прыжки [6]. По конструкции можно выделить класс человекоподобных роботов, преимуществом которых является снижение энергозатрат за счет использования собственных колебаний, однако плохо решаемой задачей здесь является стабилизация центра масс из-за сложной геометрии объекта [7]. Другим большим классом являются шестиногие мобильные платформы с различными видами шасси [4]. Есть и другие разработки — от повторения прыжков кенгуру [8], до треногих систем [9].

Доклад посвящен проектированию шагающего робота, разработке управляющего программно-аппаратного обеспечения мобильного робота AnyWalker. В представляемой конструкции ставилась задача проектирования робота в легко управляемой самостабилизируемой платформе, с большим диапазоном проходимости (преодоления высоких и сложных препятствий). Решение этих задач обеспечено конструкцией корпуса, позволяющей осуществлять быстродействующую стабилизацию, а также оригинальной схемой шасси, направленной на преодоление препятствий.

**Конструкция и кинематическая схема.** В качестве корпуса, как стабилизирующего центра масс, выбрана сфера диаметром 0.4 м (рис. 1). Стабилизация положения тела осуществляется за счет силовой компенсации отклоняющих воздействий. В конструкцию устройства входят два маховика, приводы маховиков, блок управления, датчики положения тела, датчики угловой скорости маховиков и источник электропитания. Оба маховика находятся внутри стабилизируемого тела. При этом центры масс маховиков совпадают, а их оси вращения пересекаются. Внешние воздействия регистрируются датчиками положения тела и передаются на блок управления, посылающий соответствующий сигнал на приводы маховиков и тем самым приводящий их в движение. Момент инерции вращающихся маховиков компенсирует отклонения, вызываемые внешними воздействиями, стабилизируя положение тела в пространстве [10].

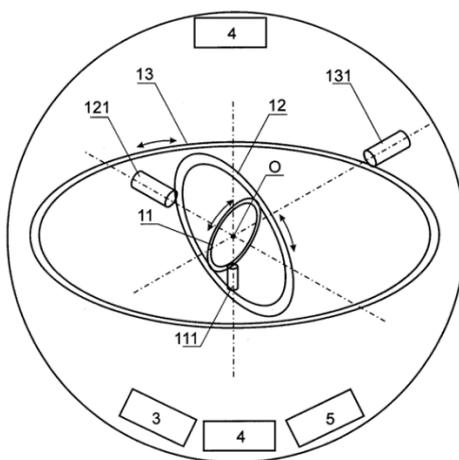


Рисунок 1 – Схематичное расположение элементов устройства в пространстве

Устройство для стабилизации включает в себя два маховика 11 и 12 с приводами маховиков 111 и 121, соединенные с объемным телом, блок управления 3, соединенный с датчиками положения 4, источником электропитания 5 и приводами маховиков 111 и 121. Оси вращения всех маховиков 11 и 12 пересекаются в одной точке O (рис. 1). Каждый маховик имеет датчик положения маховика и/или датчик угловой скорости вращения, соединенный с блоком управления. Или же каждый привод маховика имеет датчик положения маховика, и/или датчик угловой скорости вращения маховика, соединенный с блоком управления. Приводы 111, 121, 131 маховиков могут быть выполнены в виде электродвигателей, в том числе иметь свои контроллеры и сервоприводы, показаны как 112, 122, 132.

Разработана кинематическая схема шасси [11], причем каждая из ног робота содержит верхнее звено для опоры объемного тела через первый шарнир, и нижнее звено для опоры верхнего звена через второй шарнир, а также ступни, подвижно соединенные с каждым нижним звеном через третий шарнир. Верхнее звено состоит из двух частей — первой и второй, соединенных друг с другом через четвертый шарнир, причем первая часть верхнего звена тела через первый шарнир соединена с объемным телом, а вторая часть верхнего звена через второй шарнир соединена с нижним звеном, при этом в положении робота стоя на двух ногах, четвертый шарнир каждой ноги робота расположен выше первого, второго и третьего шарниров (см. рис. 2).

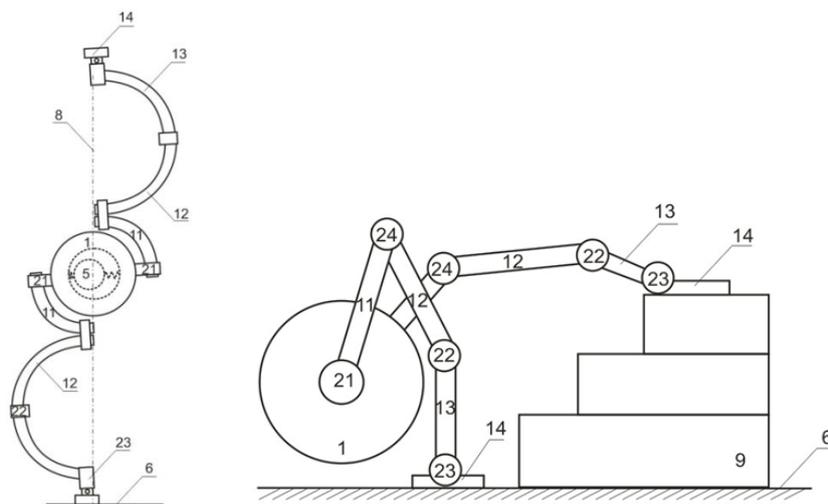


Рисунок 2 – Кинематическая схема:

1 – тело робота, 5 – модуль корректирующего смещения центра масс робота, 6 – поверхность, 8 – ось силы тяжести, проходящая через центр масс, 9 – препятствие, 11 – первая часть верхней ноги робота, 12 – вторая часть верхней ноги робота, 13 – нижняя нога робота, 14 – ступня, 21 – первый шарнир, 22 – второй шарнир, 23 – третий шарнир, 24 – четвертый шарнир.

Расчетная скорость перемещения платформы с габаритами корпуса, укладываемого в сферу 40 см, по горизонтальной, в среднем, поверхности, в режиме шага составит 5 км/час, а в режиме качения на корпусе с поднятыми манипуляторами до 15 км/ч, сможет автономно функционировать в течение 24 часов в режиме трансляции видео, активного управления и перемещения по местности средней пересеченности, нести 3,8 кг полезной нагрузки [12].

На рис. 3 приведены графики задания на углы на сервоприводы ног. Графики с индексом 1 соответствуют левой ноге, с индексом г — правой. Моменты силы, развиваемые в сервоприводах при совершении полшага, приведены на графиках на рис. 4. Пример преодоления роботом ступени, с высотой, равной высоте робота показан на рис. 5.

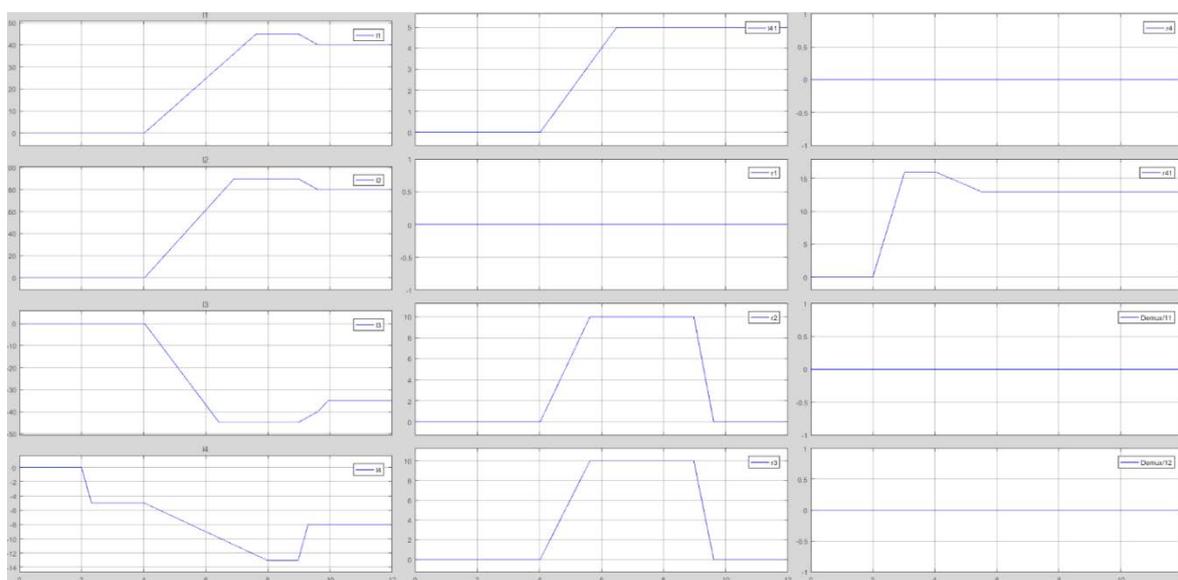


Рисунок 3 – Задания на сервоприводы для совершения одного полшага

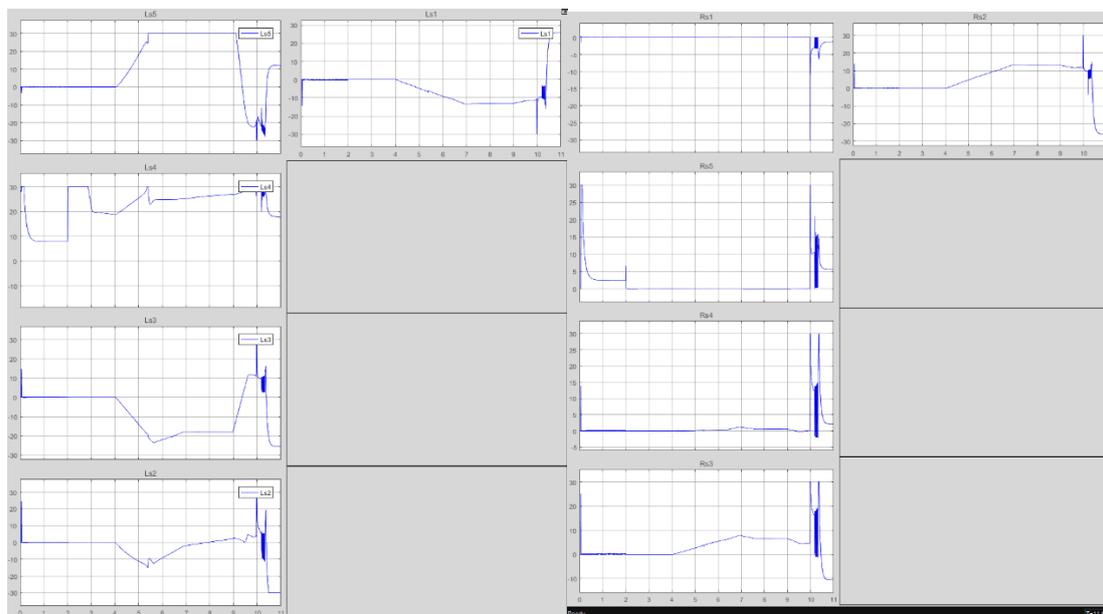


Рисунок 4 – Момент силы, развиваемый в сервоприводах при совершении полушага

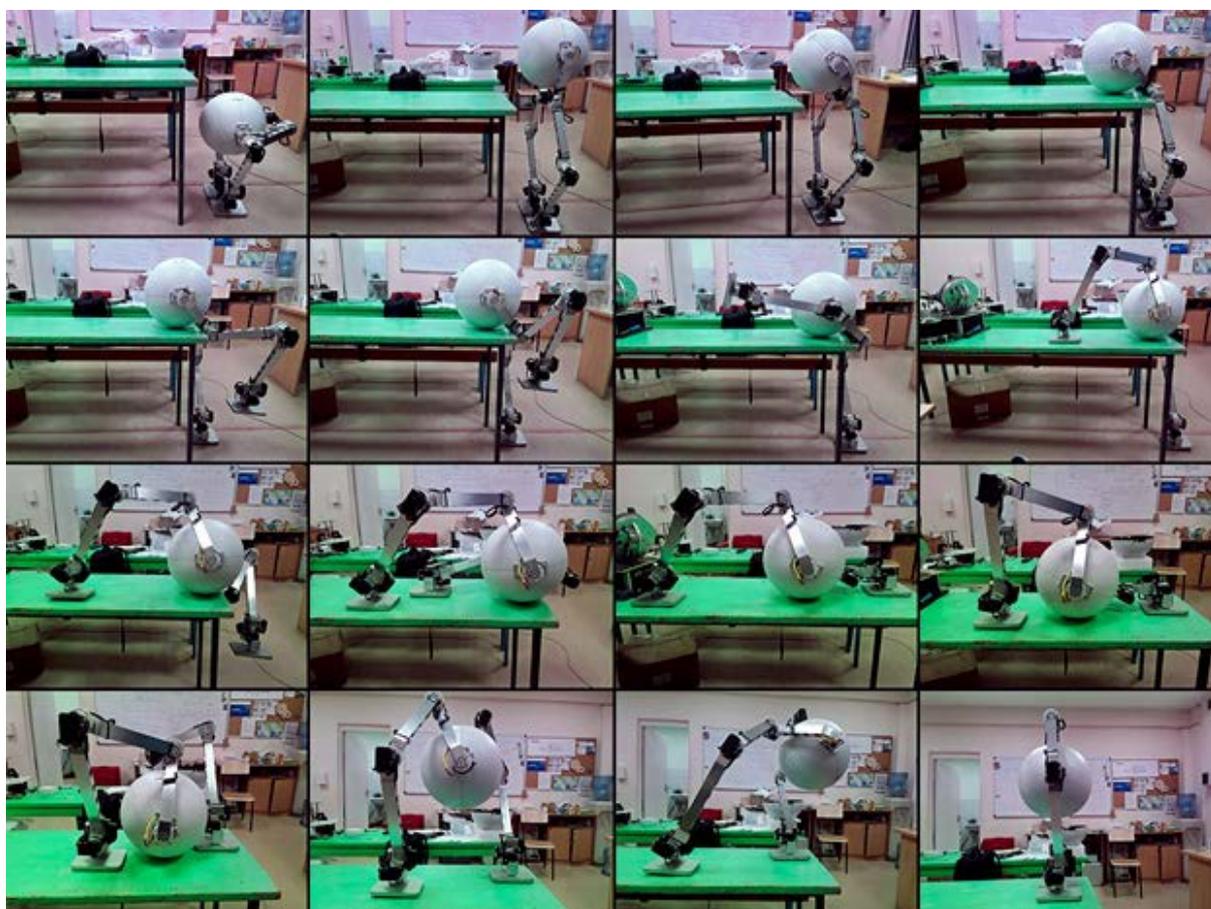


Рисунок 5 – Фазы преодоления роботом ступени, с высотой, равной высоте робота

**Самостабилизируемость платформы.** Для стабилизации шагающего робота реализованы алгоритмы, основанные на следующей модели. Шар, являющийся основой шагающего робота, рассматривается как перевернутый маятник с маховиком. У маятника неголономная связь с поверхностью опоры. Это дает возможность поиска решения задачи стабилизации мобильной конструкции в динамике, путем добавления внутренних степеней свободы. Предлагается задачи стабилизации возложить на систему из двух маховиков, работающих как обыкновенный маятник с маховиком [13, 14], но, в отличие от этих работ, предлагается совместить центры масс двух маховиков в одной точке, и получить более компактную конструкцию.

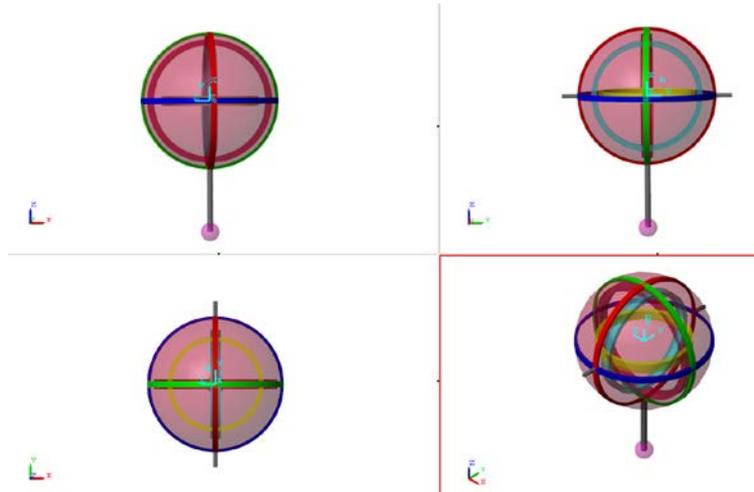


Рисунок 6 – Имитационная модель самостабилизирующей платформы (перевернутый маятник с тремя маховиками)

Применяя подход, описанный в [14], динамику системы для одного маховика можно описать следующим образом:

$$\begin{cases} J\chi\ddot{\beta} + (J_r + \chi J_M)\dot{\omega} = (mb + Ml)g\chi \sin\beta - \omega\dot{\beta}, \\ (J_r + \chi J_M)\chi\ddot{\beta} + (J_r + \chi^2 J_M)\dot{\omega} = \chi L, \\ L = c_u u - c_v \frac{\omega}{\chi}. \end{cases}$$

Здесь состояния системы:  $\beta(t)$  — угол между осью маятника и направлением «вверх» против часовой стрелки;  $\omega(t)$  — угловая скорость вращения маховика; управление:  $u$  — напряжение подаваемое на двигатель [В]; конструктивные параметры модели:  $J_m$  — момент инерции маятника относительно его оси вращения [кг·м<sup>2</sup>];  $J_r$  — момент инерции ротора двигателя относительно его оси вращения [кг·м<sup>2</sup>];  $\chi$  — коэффициент редукции;  $J_M$  — момент инерции маховика относительно его оси вращения [кг·м<sup>2</sup>];  $m$  — масса маятника [кг];  $b$  — расстояние от точки закрепления маятника до его центра масс [м];  $M$  — суммарная масса маховика и двигателя [кг];  $l$  — длина маятника [м];  $g$  — ускорение свободного падения [м·с<sup>-2</sup>];  $\omega$  — коэффициент трения [Н·м·с];  $c_u$  [Н·м·В<sup>-1</sup>];  $c_v$  [Н·м·с];  $J = J_m + Ml^2 + J_r + J_M$ .

Линеаризованное уравнение с учетом допущений, что редуктора отсутствуют ( $\chi = 1$  и  $J_M = 0$ ); собственная масса маятника мала ( $m = 0$  и  $J_m = 0$ ); трение в опоре незначительно ( $\omega = 0$ ), имеет вид:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \beta \\ \dot{\beta} \\ \omega \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{g}{l} & 0 & \frac{c_v}{Ml^2} \\ -\frac{g}{l} & 0 & -\left(\frac{1}{J_r} + \frac{1}{Ml^2}\right)c_v \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \beta \\ \dot{\beta} \\ \omega \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{c_u}{Ml^2} \\ \left(\frac{1}{J_r} + \frac{1}{Ml^2}\right)c_u \end{bmatrix} u.$$

или

$$\dot{x} = Ax + bu.$$

Характеристический полином матрицы  $A$  имеет вид

$$F(\lambda) = \begin{vmatrix} -\lambda & 1 & 0 \\ \frac{g}{l} & -\lambda & \frac{c_v}{Ml^2} \\ -\frac{g}{l} & 0 & -\left(\frac{1}{J_r} + \frac{1}{Ml^2}\right)c_v - \lambda \end{vmatrix} = \left(-\left(\frac{1}{J_r} + \frac{1}{Ml^2}\right)c_v - \lambda\right)\left(\lambda^2 - \frac{g}{l}\right) - \frac{c_v}{Ml^2} \frac{g}{l}.$$

Матрица имеет один положительный корень и два отрицательных, что следует из следующих фактов:  $F(0) = \frac{c_v g}{J_r l} > 0$ ,  $F\left(-\sqrt{\frac{g}{l}}\right) = F\left(\sqrt{\frac{g}{l}}\right) = -\frac{c_v}{Ml^2} \frac{g}{l} < 0$ ,  $F(\lambda) \rightarrow +\infty$  при  $\lambda \rightarrow -\infty$ . Собственный вектор соответствующий собственному значению  $\lambda$  можно записать  $(c_v, c_v \lambda, Ml(\lambda^2 - g))^T$ . Наличие положительного собственного значения говорит о неустойчивости стационарной точки  $(0,0,0)^T$  при отсутствии управления.

Сделаем замену переменных  $x = Ky$ , где

$$K = \begin{pmatrix} c_v & c_v & c_v \\ c_v \lambda_1 & c_v \lambda_2 & c_v \lambda_3 \\ MI(\lambda_1^2 - g) & MI(\lambda_2^2 - g) & MI(\lambda_3^2 - g) \end{pmatrix},$$

получим

$$K\dot{y} = AKy + bu.$$

Домножим слева уравнение на  $K^{-1}$ :

$$\dot{y} = K^{-1}AKy + K^{-1}bu = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)y + K^{-1}bu,$$

Пусть  $m = K^{-1}b$ , тогда

$$\dot{y} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)y + mi, \quad (1)$$

Без ограничения общности будем считать, что  $\lambda_1 > 0 > \lambda_2 > \lambda_3$ . Пусть  $u = u(y, t)$  такова, что  $|u| \leq u_{max}$ . В этих условиях доказаны следующие результаты.

Система, описываемая уравнением (1) из состояния с  $y_1 \geq |m_1|u_{max} \lambda_1$  не может перейти в состояние с меньшим  $y_1$  (из состояния с  $y_1 \leq -|m_1|u_{max} \lambda_1$  не может перейти в состояние с большим  $y_1$ ).

Существует управление  $u = u(y, t)$  такое, что решение уравнения (1) из состояния с  $|m_1|u_{max} \lambda_1$  стремится к точке равновесия  $(0, 0, 0)^T$ .

Полученные результаты реализованы при построении управляющих воздействий.

**Архитектура программного обеспечения, управляющего роботом.** Для управления роботом разработана программно-аппаратная система с трёхуровневой архитектурой [15]. Подсистема первого уровня реализована на микроконтроллере ARM семейства STM32F4 под управлением программы реального времени на базе библиотеки ST HAL. Управляющая подсистема второго уровня реализована на одноплатном компьютере семейства Raspberry Pi под управлением Robot Operating System (ROS) Kinetic Kame. В качестве третьего прикладного уровня выступает программа на MATLAB, Python, веб-интерфейс. Аппаратная архитектура робота AnyWalker представлена на рисунке 7.

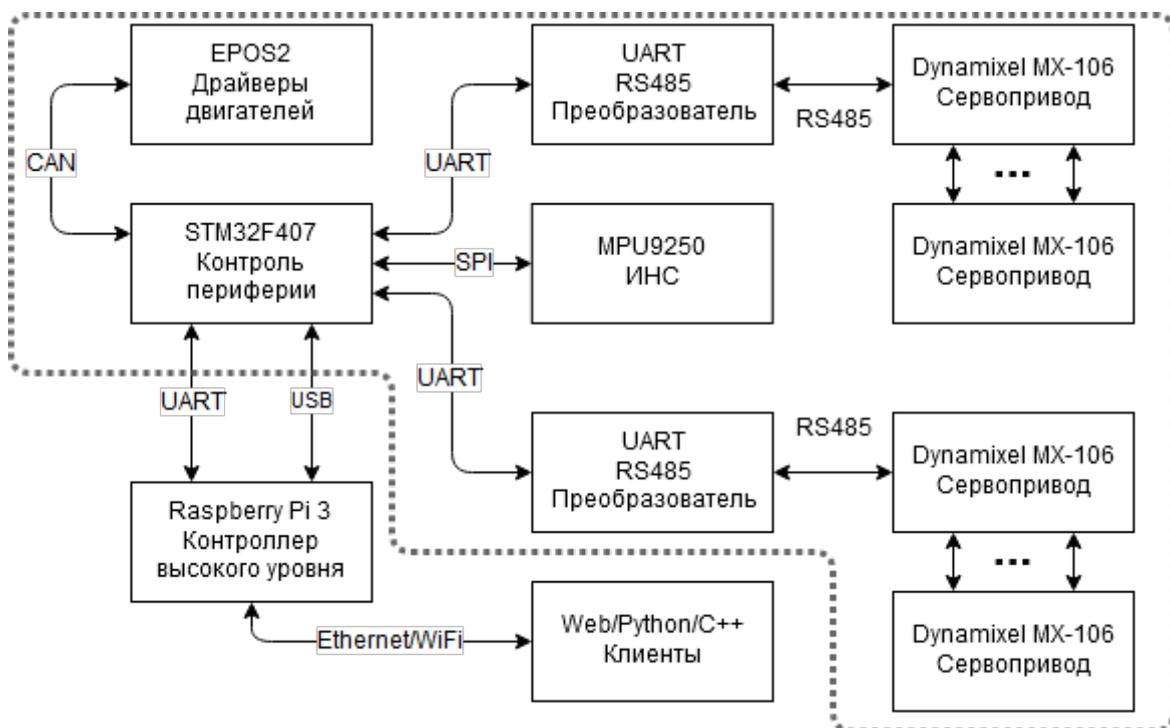


Рисунок 7 – Аппаратная архитектура компонентов робота

Основными элементами в данной архитектуре являются микроконтроллер STM32F407, являющийся контроллером периферии, и микрокомпьютер Raspberry Pi 3, играющий роль контроллера верхнего уровня и предоставляющий интерфейсы для взаимодействия управляющего программного обеспечения и различных клиентов с периферийными устройствами.

Контроллер периферии взаимодействует с 9-осевой системой инерциальной навигации, представленной микросхемой MPU9250, по протоколу SPI. Установленные в роботе маховики управляются драйверами моторов EPOS2, общение с которыми осуществляется по протоколу CAN. Конечности робота приводятся в движение сервоприводами Dynamixel MX-106, связь с которыми осуществляется по протоколу RS-485. Сервоприводы подключаются последовательно по 6 элементов на ногу. Обе шины подключены к двум независимым интерфейсам UART микроконтроллера.

Взаимодействие контроллера верхнего уровня и контроллера периферии осуществляется через интерфейс UART, по которому передаются команды управления периферией, а также запрашиваются показания датчиков ИНС, скорости вращения маховиков и значения температуры и нагрузки на сервоприводах. Также контроллер STM32F407 подключен через USB для отладки и загрузки обновлённого ПО для контроллера по протоколу STLink v2.

В схеме также предусмотрены клиенты, реализующие различные элементы логики. Подключение клиентов к контроллеру высокого уровня осуществляется по каналу Ethernet или через беспроводную WiFi-сеть.

Аппаратный слой является базой для организации программного слоя, архитектура которого представлена на рисунке 8.

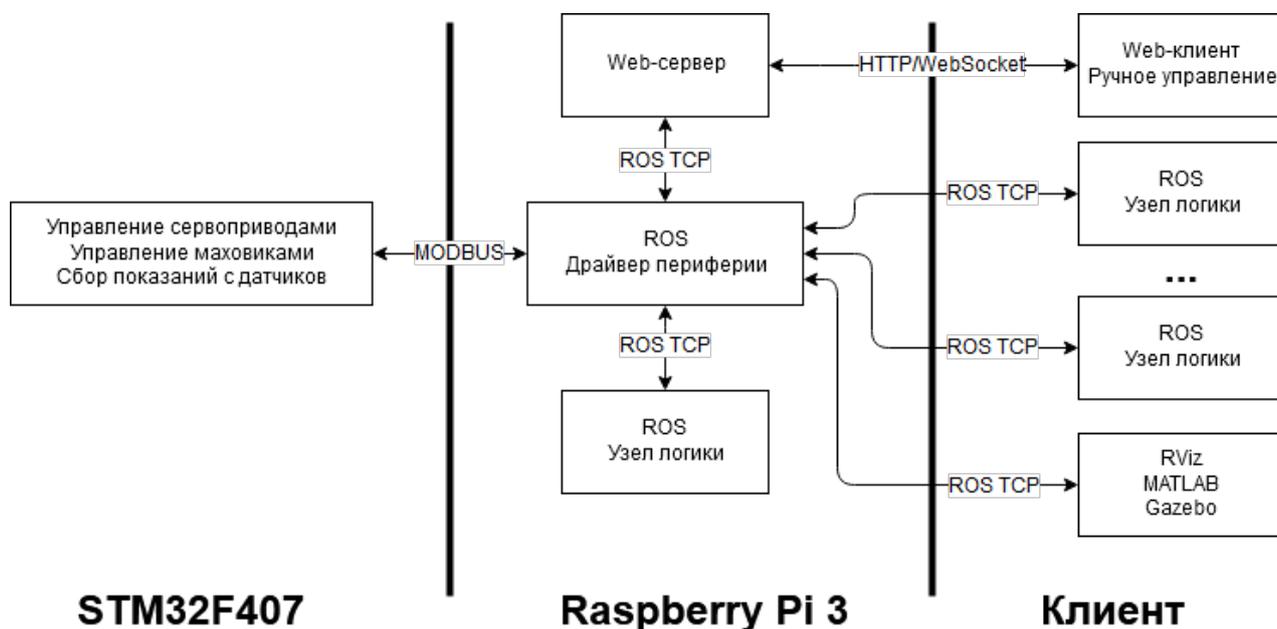


Рисунок 8 – Архитектура программного слоя робота

Взаимодействие узлов логики, присутствующих на контроллере высокого уровня и различных клиентах, с узлами периферии осуществляется через специализированный модуль связи с периферийным контроллером. Модуль связи с периферийным контроллером представляет собой драйвер, осуществляющий взаимодействие системы с контроллером нижнего уровня на базе микросхемы STM32F407. Драйвер написан на языке C++, осуществляет приём команд, поступающих от модулей автоматического и ручного управления. Взаимодействие с МК STM32F407 осуществляется через UART по протоколу MODBUS на скорости 921600 бод, что позволяет добиться частоты цикла управления порядка 150-200 Гц. Используя графовую структуру ROS [16], драйвер посылает информацию о состоянии узлов робота всем участникам сети, подписавшихся на получение этих данных. В свою очередь, драйвер подписан на получение команд управления приводами маховиков и положениями сервомоторов. Схема графовой структуры представлена на рисунке 9.

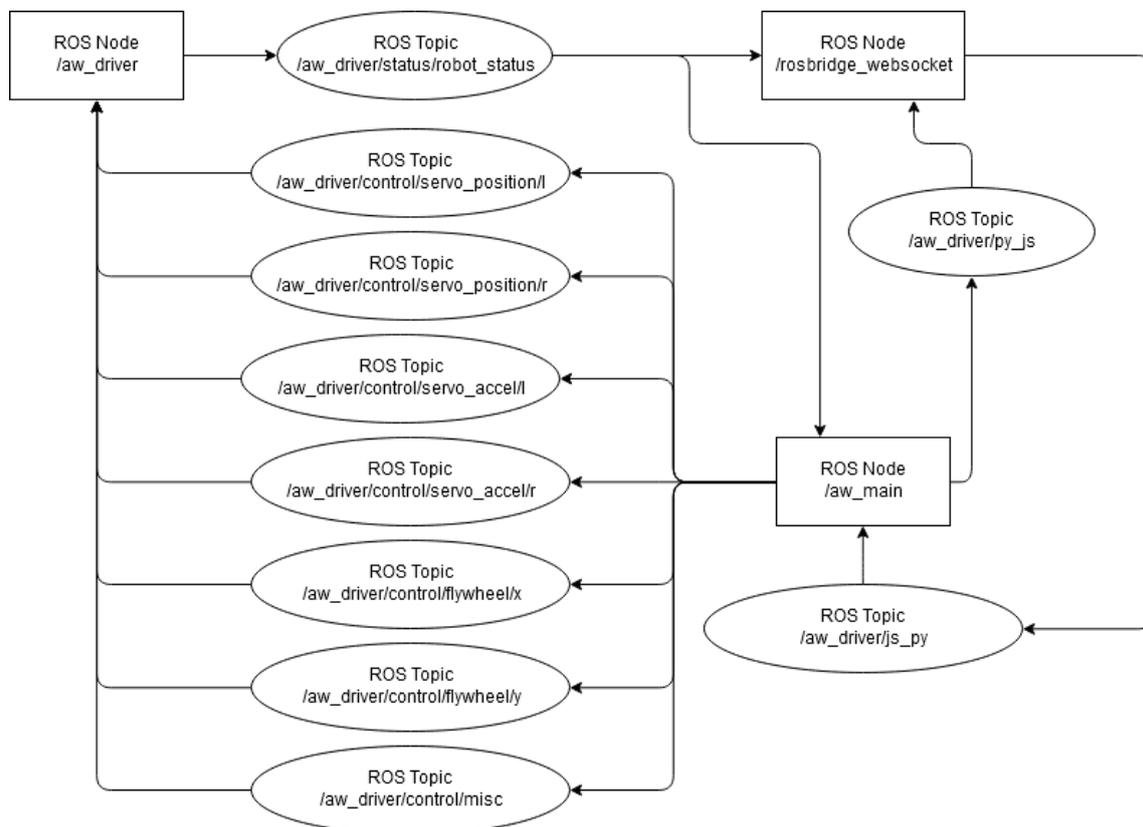


Рисунок 9 – Графовая архитектура сети ROS

Драйвер `/aw_driver` осуществляет постоянный опрос контроллера периферии, запрашивая у него показания ИНС, датчиков сервомоторов, датчиков Холла с драйверов EPOS2 для контроля скорости вращения маховика и датчиков давления на стопах. Полученные данные организовываются в специальную структуру, которая публикуется в топик `/aw_driver/status/robot_status`. С этими данными могут работать как различные узлы логики, так и ПО для визуализации и симуляции, например, Gazebo, RViz и MATLAB.

Информация о состоянии робота передаётся веб-клиенту, подключенному к роботу через сеть WiFi или кабель Ethernet. Взаимодействие веб-клиента с системой ROS осуществляется через двусторонний канал связи, основанный на технологии WebSocket, который реализован узлом `/rosbridge_websocket`.

В сети также представлен узел `/aw_main`, который является промежуточным слоем между пользователем и периферийными устройствами. Данный узел написан на языке Python и занимается преобразованием текстовой системы команд в понятный драйверу набор значений, преобразует показания датчиков в понятный пользователю вид, например, переводит показания энкодеров сервоприводов в градусы, также занимается расчётом скоростей движения узлов робота в режиме автоматического управления. Узел обменивается информацией с веб-клиентом посредством топиков `/aw_driver/py_js` (к клиенту) и `/aw_driver/js_py` (от клиента). Сам узел обращается к драйверу через систему управляющих топиков `/aw_driver/control/*`

**Заключение.** Задача получения устойчивого, стабильного и энергоэффективного шагающего робота с возможностью перемещаться по неизвестной местности уже в течение многих лет является большой проблемой в области робототехники. Разработанная роботизированная платформа демонстрирует высокую энергоэффективность, в сравнении с другими конструкциями шагающих роботов. Разработанный шагающий робот AnyWalker является примером сервисного мобильного устройства, способного справиться с неизвестной местностью, надёжно и гибко перемещаясь по пути.

1. Kar, D. C. (2003) Design of a statically stable walking robot: A review, *Journal of Robotic Systems*, **20**(11):671–686.
2. Goswami, A. (2015). Walking Robots. *Encyclopedia of Systems and Control*, 1537-1548.
3. Booyesen, T., & Marais, S. (2013) The development of a remote controlled, omnidirectional six legged walker with feedback. In *AFRICON 2013*, pp. 1-6.
4. Tedeschi, F., & Carbone, G. (2014) Design issues for hexapod walking robots. *Robotics*, **3**(2), 181-206.

5. Xiong, X., Wörgötter, F., & Manoonpong, P. (2016) Adaptive and energy efficient walking in a hexapod robot under neuromechanical control and sensorimotor learning. *IEEE transactions on cybernetics*, **46**(11):2521-2534.
6. Szczecinski, N. S., Hunt, A. J., & Quinn, R. D. (2017). Design process and tools for dynamic neuromechanical models and robot controllers. *Biological cybernetics*, **111**(1):105-127.
7. Zhao, J., Liu, Q., Schütz, S., & Berns, K. (2014) Experimental verification of an approach for disturbance estimation and compensation on a simulated biped during perturbed stance. In 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 5082-5087.
8. Liu, G. H., Lin, H. Y., Lin, H. Y., Chen, S. T., & Lin, P. C. (2013) Design of a kangaroo robot with dynamic jogging locomotion. In 2013 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), pp. 306-311.
9. Borràs, J., & Dollar, A. M. (2012) Static analysis of parallel robots with compliant joints for in-hand manipulation. In 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 3086-3092.
10. Рядчиков И.В., Бубнов Г.Г., Плужник Е.В., Сеченев С.И. Устройство для стабилизации положения объемного тела в пространстве с силовой компенсацией отклоняющих воздействий. *Патент RU160949U1*. Дата публикации 2016/04/10
11. Ryadchikov, I., Sechenev, S., Svidlov, A., Sinitsa, S., Buskandze, Z., & Nikulchev, E. (2016). AnyWalker: all-terrain robotic chassis. In 47st International Symposium on Robotics; Proceedings of ISR 2016, pp. 696-701.
12. Ryadchikov I., Sechenev S., Svidlov A., Sinitsa S., Nikulchev E. (2017) Development of a self-stabilizing robotic chassis for industry, *MATEC Web of Conferences*, **99**:02007.
13. Shahbazi, M., Babuška, R., & Lopes, G. A. (2016) Unified modeling and control of walking and running on the spring-loaded inverted pendulum. *IEEE Transactions on Robotics*, **32**(5):1178-1195.
14. Формальский А.М. Управление движением неустойчивых объектов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013.
15. Riadchikov, I., Sechenev S., Sinitsa, S., Nikulchev E. (2016) Constructive solution of the robotic chassis AnyWalker, *ITM Web of Conference*, **6**:01003.
16. [http://wiki.ros.org/ROS/Concepts#ROS\\_Computation\\_Graph\\_Level](http://wiki.ros.org/ROS/Concepts#ROS_Computation_Graph_Level)

*A.E. Gavrilov, A.V. Leonard, O.A. Mishustin, D.M. Selyunin, S.B. Hantimirova*

## THE UNIVERSAL WALKING INSECTOMORPHIC PLATFORM<sup>XXI</sup>

*Volgograd state technical university  
krobotechvlg@gmail.com*

### Abstract

In work the design of the robotic transport platform using the insectomorphic walking mover for movement is described. The main data on a theoretical method of receiving an algorithm of movements and a design of an insectomorphic support are provided.

Keywords: the walking insectomorphic mover, a robotic platform, movement algorithms.

### Introduction

The development and implementation of mobile robotic systems for the implementation of various complex tasks becomes a priority direction of development [1]. Walking movers have a number of advantages over the traditional wheel and track. These advantages include the ability to adapt to the unevenness of the support surface, a large profile patency, as well as maneuverability, allowing in many cases, the movement in an arbitrary direction. A robotic platform with a walking insectomorphic mover is capable of turning on the ground, moving along soils with a weak bearing capacity, overcoming obstacles through discrete contact with the supporting surface. The kinematics of the mover allows to stabilize the position of the body in motion at the angles of bank, pitch and yaw.

### Design and kinematic scheme

The universal walking insectomorphic platform consists of three main elements: a rigid frame, insectomorphous limbs with electromechanical drives and a power supply system with a motion control system. The insectomorphic limbs are mounted on the frame with the possibility of relative rotation of the links by means of rotational pairs of the fifth class. On the upper part of the case it is possible to install technological

equipment (Fig. 1a, 1b). Due to the discrete interaction with the support surface, there is no track, which allows you to move without harming the upper layer of soil while using the platform for monitoring the environment.

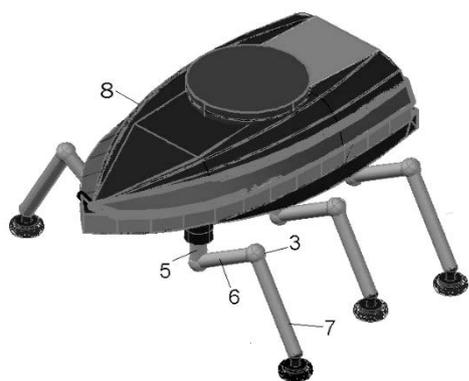


Figure 1a – General view of the universal walking platform «AG»

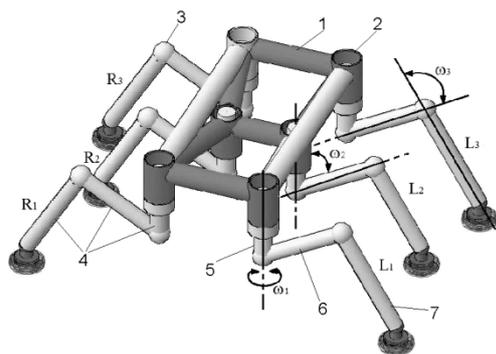


Figure 1b – Kinematic diagram of the universal walking insectomorph platform «AG»

1 – bearing frame, 2 – cylindrical bushings, 3 – rotational pair of the fifth class, 4 – finiteness of the insectomorph mover, first link of the support, 6 – second link of the support, 7 – third link of the support, 8 – body.  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  – angular movements of limb links.

When creating a universal platform "AG" with an insectomorph walking mover unit, the block-modular principle of constructing electromechanical structures based on unified automated electric drives with programmable microcontrollers is applied. The block-modular principle allows improving the maintainability of the system, quickly replacing the failed unified modules, modifying their structure, creating robotic schemes with flexible functionality that ensure the rational use of information and energy resources. Blocks are created by installing and switching individual modules, which in turn are assembled from individual parts and assemblies [2]. In the upper part of the hull, the main elements of the control and observation system are located (Fig. 2). The upper part of the body is hermetically connected to the lower part and fixed to the frame.

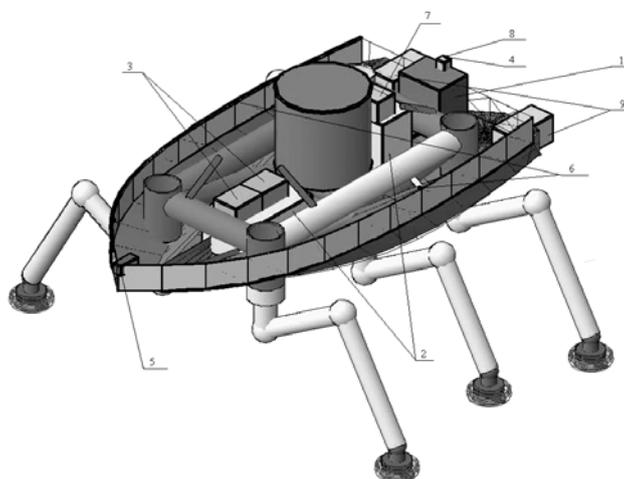


Figure 2 – Scheme of the universal walking insectomorph platform:

1 – ICE with an electric generator, 2 – storage batteries and supercapacitors, 3 – charger, 4 – transformer, 5 – vision system, 6 – ultrasonic rangefinders, 7 – electronic control unit of the control system, 8 – distributor, 9 – water-jet propulsion unit

Each leg of the insectomorph mover is a spatial mechanism consisting of several basic links connected by rotational joints with one degree of mobility and one for each leg of the free end link. Due to the availability of a free link, it becomes possible to select the locations of the support posts within the reach zone of the foot mechanism.

The relative movement of the platform links is due to the controlled movement of the drive motors with the transfer mechanisms made in the form of a module containing the motor, a reducer, a set of feedback sensors

and a control microcontroller. Each module is controlled by an electronic calculating unit that calculates the software movements for each drive, depending on the route of the operator specified by the operator, based on information from the feedback sensors received from the system.

### Algorithms of movement

For six-bearing walking robots of this design, the most common are gaiters such as "gallop", "amble" or "treshki" [3]. Gait "gallop", in comparison with the gait of "treshki", also differ, depending on the presence of the support of adhesive properties. In the case of such properties, the "treshki" walk has greater efficiency. In the case when the limb of the support does not possess adhesive properties, the gait of the "treshka" is inferior in energy efficiency and speed of movement to the gait of the "gallop" type [4]. Table 1 shows the distribution of the extremities of the robot in phases when moving with the help of the "gallop" and "treshki" gaits.

To move in space, you can use other types of gaits. "Sequential" is a gait in which the legs move one by one, one after another. The successive transfer of the middle legs, as well as their time in the non-support phase, does not affect the static stability of the robot. "Diagonal" - gait, in which the diagonally located legs are carried simultaneously, while maintaining a high stability of the platform in all phases of motion [3].

Table 1. Phase distribution of the gait

№ phases № foots	«gallop»			«treshki»	
	1	2	3	1	2
R <sub>1</sub>					
R <sub>2</sub>					
R <sub>3</sub>					
L <sub>1</sub>					
L <sub>2</sub>					
L <sub>3</sub>					

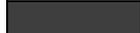
 - phase of the transfer  
 - phase of the support

Table 2. Distribution of asymmetric gait phases

№ phases № foots	« Sequential »						« Diagonal »			
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4
R <sub>1</sub>										
R <sub>2</sub>										
R <sub>3</sub>										
L <sub>1</sub>										
L <sub>2</sub>										
L <sub>3</sub>										

### Mathematical model

The mathematical model of the universal walking insectomorphic AG platform is presented in the form of multilink mechanical system of the located rather motionless system of coordinates of OXYZ, the system of coordinates OX<sub>1</sub>Y<sub>1</sub>Z<sub>1</sub> is connected with the geometrical center of the case of a platform (fig. 2). Total number of degrees of freedom of the mechanism at equipment of the universal walking insectomorphic AG platform six support will be equal to 18.

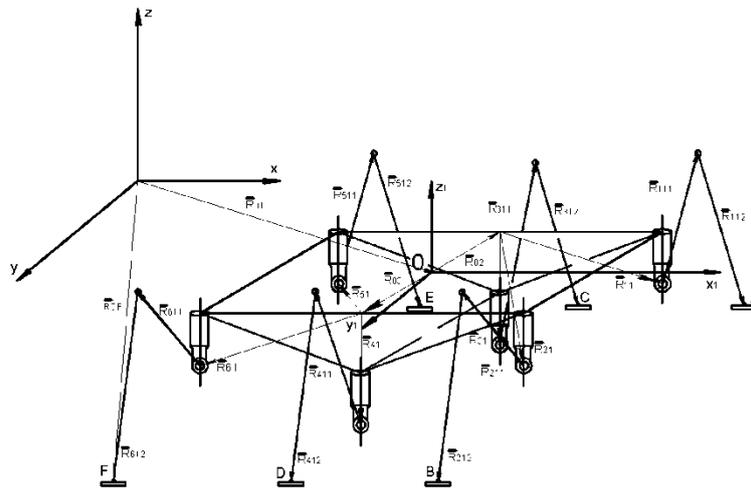


Figure 3 – The scheme of mathematical model of the universal walking insectomorph platform

Unambiguous position of the robot in motionless system of coordinates is described by system from six vector equations:

$$\begin{cases} \vec{R}_{OF} = \vec{R}_{01} + \vec{R}_{03} + \vec{R}_{61} + \vec{R}_{611} + \vec{R}_{612} \\ \vec{R}_{OE} = \vec{R}_{01} + \vec{R}_{03} + \vec{R}_{51} + \vec{R}_{511} + \vec{R}_{512} \\ \vec{R}_{OD} = \vec{R}_{01} + \vec{R}_{03} + \vec{R}_{41} + \vec{R}_{411} + \vec{R}_{412} \\ \vec{R}_{OC} = \vec{R}_{01} + \vec{R}_{02} + \vec{R}_{31} + \vec{R}_{311} + \vec{R}_{312} \\ \vec{R}_{OB} = \vec{R}_{01} + \vec{R}_{02} + \vec{R}_{21} + \vec{R}_{211} + \vec{R}_{212} \\ \vec{R}_{OA} = \vec{R}_{01} + \vec{R}_{02} + \vec{R}_{11} + \vec{R}_{111} + \vec{R}_{112} \end{cases} \quad (3)$$

The design of an insectomorph extremity of a platform (Fig. 4) is developed. The option of a hybrid extremity (Fig. 5) where as a trailer link the wheel drive is used that allows to get rid of a lack of the movement of the walking robots connected with low speed is developed.

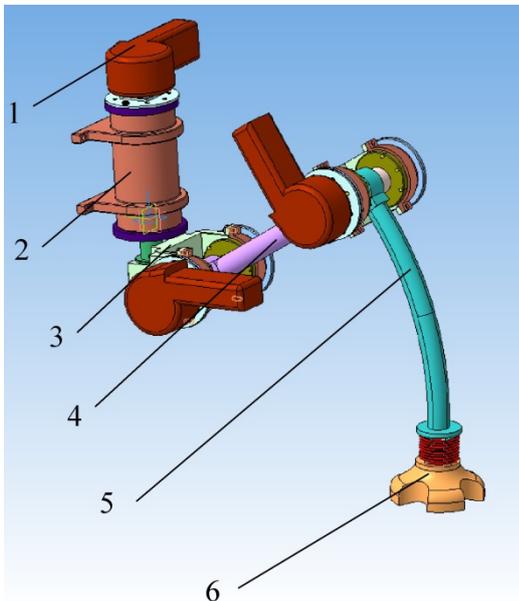


Figure 4 – The design of an insectomorph leg

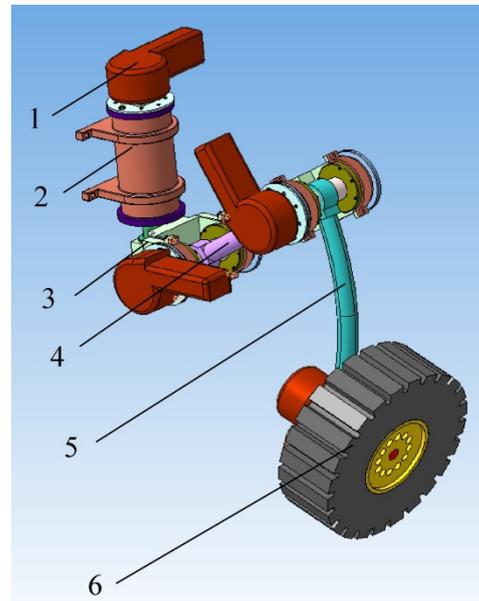


Figure 5 – platform - The design of a hybrid insectomorph wheeled leg

1 – the motor reducer with feedback sensors, 2 – the plug, 3 – the femoral hinge, 4 – a femoral link, 5 – a shin, 6 – passive foot (a wheel about the motor reducer and feedback sensors)

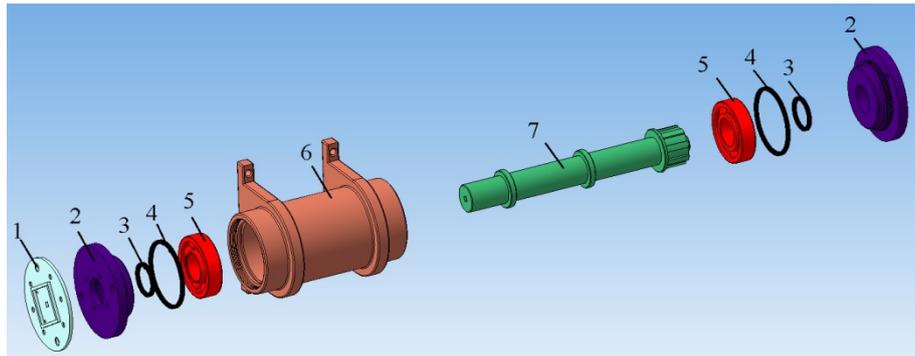


Figure 6 – Rotary hinge 1:

1 – a flange, 2 – a cover, 3 – a cover epiploon, 4 – a case epiploon, 5 – radially persistent bearing, 6 – the hinge case, 7 – a shaft

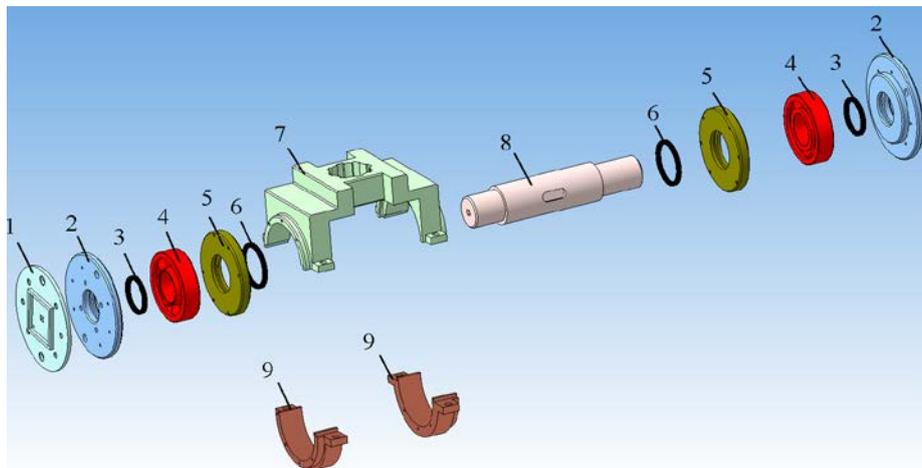


Figure 7 – Assembly of the hinge 2

1 – a flange, 2 – a cover, 3 – a cover epiploon, 4 – radially persistent bearing, 5 – an internal cover, 6 – an epiploon of an internal cover, 7 – the hinge case, 8 – a shaft, 9 – a part of the case

The walking insectomorphic propulsors are perspective types of technical solutions for movement. This area of the equipment is studied not completely now. The robotic platforms equipped with movers of a similar design are perspective for application as a part of multipurpose land and underwater transport and technological complexes and the space equipment.

1. Gavrilov, A. E. The autonomous robotic walking platform for monitoring of the environment / A. E. Gavrilov, A.S. Danshin, A. A. Burkhanov//Izvestiya VOLGGTU. "Urgent Problems of Management, Computer Facilities and Informatics in Technical Systems" series. Issue 21: interhigher education institution. сб. науч. Art. / VOLGGTU. - Volgograd, 2014. - No. 12 (139). - C. 153-157.
2. The compound walking insectomorphic propulsor / A. E. Gavrilov, O. A. Mishustin, D. M. Selyunin, S. B. Hantimirova//Automation of technological processes of machining, hardening and assembly in mechanical engineering:. (on November 3-5, 2016) / A. N. Grechukhin (edition) [etc.]; Southwest state. un-t [etc.]. - Kursk, 2016. - C. 66-70.
3. Lapshin, V. V. Mechanics and movement control of the walking machines / V. V. Lapshin – Moscow: MSTU publishing house of N. E. Bauman, 2012. - 199 pages: silt.
4. Climbing favors the tripod gait over alternative faster insect gaits / R. of Ramdya, [and oth.]/Nature Communications. – 2017. – 17 Feb. – V. 8. – art. num. 14494.

## УНИВЕРСАЛЬНАЯ ШАГАЮЩАЯ ИНСЕКТОМОРФНАЯ ПЛАТФОРМА<sup>20</sup>

Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ),  
Волгоград  
krobotechvlg@gmail.com

### Аннотация

В работе описывается конструкция роботизированной транспортной платформы, использующей для перемещения инсектоморфный шагающий движитель. Приводятся сведения об основных алгоритмах перемещения, способе алгоритма движений и конструкция инсектоморфной опоры.

Ключевые слова: шагающий инсектоморфный движитель, роботизированная платформа, алгоритмы перемещения.

### Введение

Разработка и внедрение мобильных роботизированных систем для реализации различных сложных задач становится приоритетным направлением развития [1]. Шагающие движители имеют ряд преимуществ перед традиционными колесными и гусеничными. К таким преимуществам относятся наличие возможности адаптации к неровностям опорной поверхности, большая профильная проходимость, а также маневренность, допускающая во многих случаях перемещение в произвольном направлении. Робототехническая платформа с шагающим инсектоморфным движителем способна осуществлять разворот на месте, перемещаться по грунтам со слабой несущей способностью, преодолевать препятствия за счет дискретного контакта с опорной поверхностью. Кинематика движителя позволяет стабилизировать положение корпуса в движении по углам крена, тангажа и рысканья.

### Конструкция и кинематическая схема

Универсальная шагающая инсектоморфная платформа состоит из трех основных элементов: жесткой рамы, инсектоморфных конечностей с электромеханическими приводами и систему энергоснабжения с системой управления движением. Инсектоморфные конечности смонтированы на раме с возможностью относительного поворота звеньев посредством вращательных пар пятого класса. На верхней части корпуса предусмотрена возможность установки технологического оборудования (рис. 1а, 1б).

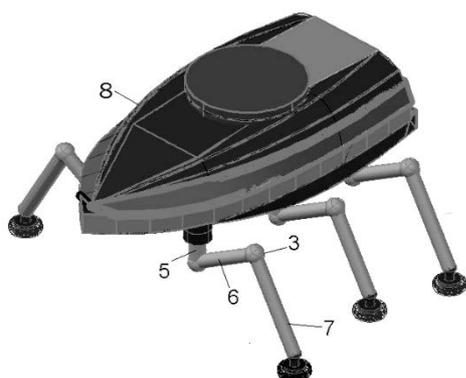


Рисунок 1а – Общий вид универсальной шагающей платформы «AG»

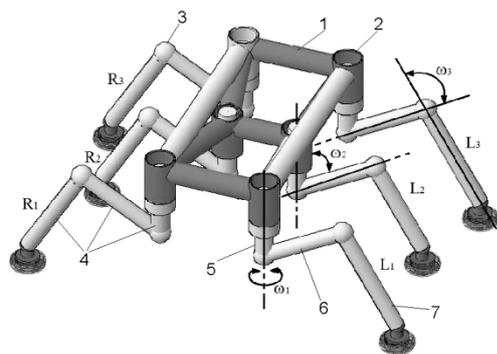


Рисунок 1б – Кинематическая схема универсальной шагающей инсектоморфной платформы «AG»

1 – несущая рама, 2 – цилиндрические втулки, 3 – вращательная пара пятого класса, 4 – конечность инсектоморфного движителя, 5 – первое звено опоры, 6 – второе звено опоры, 7 – третье звено опоры, 8 – корпус.  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_3$  – угловые перемещения звеньев конечности.

За счет дискретного взаимодействия с опорной поверхностью, отсутствует колея, что позволяет перемещаться без вреда для верхнего слоя почвы при использовании платформы для мониторинга окружающей среды.

При создании универсальной платформы «AG» с инсектоморфным шагающим движителем применен блочно-модульный принцип построения электромеханических структур на базе унифицированных автоматизированных электроприводов с программируемыми микроконтроллерами. Блочно-модульный принцип позволяет повысить ремонтпригодность системы, быстро заменять вышедшие из строя унифицированные модули, модифицировать их структуру, создавать робототехнические схемы с гибкими функциональными возможностями, обеспечивающие рациональное использование информационных и энергетических ресурсов. Блоки создаются посредством монтажа и коммутации отдельных модулей, которые, в свою очередь собираются из отдельных деталей и узлов [2]. В верхней части корпуса располагаются основные элементы системы управления и наблюдения (рис. 2). Верхняя часть корпуса герметично соединена с нижней частью и крепится к раме.

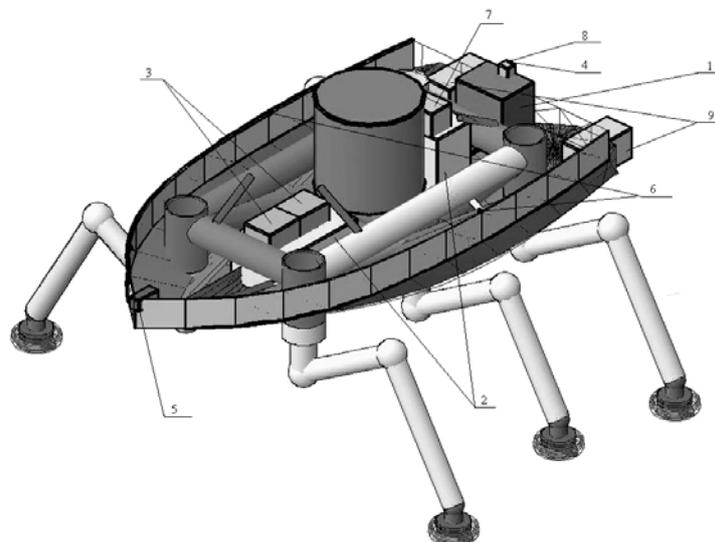


Рисунок 2 – Компонентная схема универсальной шагающей инсектоморфной платформы:

1 – ДВС с электрогенератором, 2 – аккумуляторные батареи и суперконденсаторы, 3 – зарядное устройство, 4 – трансформатор, 5 – система технического зрения, 6 – УЗ дальнометры, 7 – электронно-вычислительный блок системы управления, 8 – распределитель, 9 – водонепроницаемый движитель

Каждая нога инсектоморфного движителя является пространственным механизмом, состоящим из нескольких базисных звеньев соединенных между собой вращательными шарнирами с одной степенью подвижности и одного для каждой ноги свободного концевой звена. За счет наличия свободного звена появляется возможность выбора мест постановки опорных стоек в пределах зоны достижимости механизма ноги.

Относительное перемещение звеньев платформы происходит за счет управляемого движения приводных электродвигателей с передаточными механизмами, выполненными в виде модуля содержащего в себе электродвигатель, редуктор, набор датчиков обратной связи и управляющий микроконтроллер. Каждый модуль управляется посредством электронно-вычислительного блока, который рассчитывает программные движения для каждого привода в зависимости от задаваемого оператором маршрута движения на основании информации полученной от системы датчиков обратной связи.

### Алгоритмы передвижения

Для шестиопорных шагающих роботов данной конструкции наиболее распространенными являются походки типа «галоп», «иноходь» или «трешки» [3]. Походка «галоп», по сравнению с походкой «трешки», также различаются в зависимости от наличия у опор адгезивных свойств. В случае наличия таких свойств, большую энергоэффективность имеет походка «трешки». В случае, когда конечность опоры не обладает адгезивными свойствами, походка «трешки» уступает в энергоэффективности и скорости передвижения походке типа «галоп» [4]. В таблице 1 показано распределение конечностей робота по фазам при перемещении с помощью походок «галоп» и «трешки».

Для перемещения в пространстве возможно использование других типов походок. «Последовательная» - походка, при которой ноги осуществляют движение поочередно, одна за другой. Последовательный перенос средних ног, а также время нахождения их в опорной фазе не влияет на статическую устойчивость робота. «Диагональная» - походка, при которой диагонально расположенные ноги переносятся одновременно, сохраняя высокую устойчивость платформы во всех фазах движения [3].

Таблица 1. Распределение фаз походки

№ фазы № ноги	«галоп»			«трешки»	
	1	2	3	1	2
R <sub>1</sub>		■		■	
R <sub>2</sub>	■		■		■
R <sub>3</sub>		■		■	
L <sub>1</sub>		■		■	
L <sub>2</sub>	■		■		■
L <sub>3</sub>		■		■	

□ - фаза переноса  
 ■ - фаза опоры

Таблица 2. Распределение фаз асимметричной походки

№ фазы № ноги	«последовательная»						«диагональная»			
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4
R <sub>1</sub>	■	■		■			■		■	■
R <sub>2</sub>			■		■			■		■
R <sub>3</sub>				■		■	■			
L <sub>1</sub>								■		■
L <sub>2</sub>	■		■		■			■		■
L <sub>3</sub>		■		■		■	■			

### Математическая модель

Математическая модель универсальной шагающей инсектоморфной платформы «AG» представляется в виде многосвязной механической системы расположенной относительно неподвижной системы координат  $OXYZ$ , с геометрическим центром корпуса платформы связана система координат  $Ox_1y_1z_1$  (рис. 2). Общее число степеней свободы при оснащении универсальной шагающей инсектоморфной платформы «AG» шестью опорами будет равно 18.

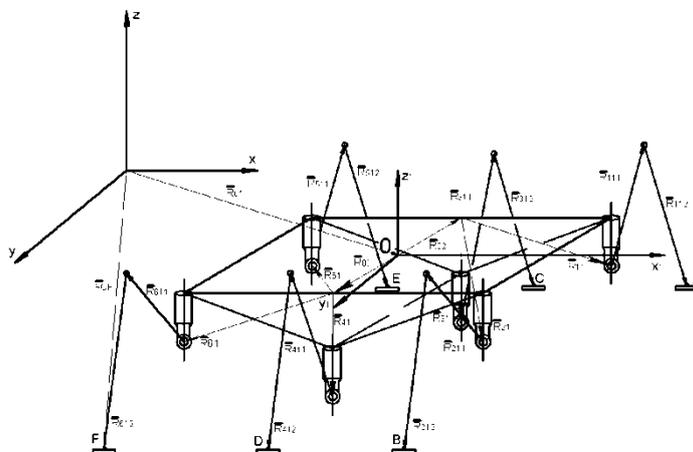


Рисунок 3 – Схема математической модели универсальной шагающей инсектоморфной платформы

Однозначное положение робота в неподвижной системе координат описывается системой из шести векторных уравнений:

$$\begin{cases} \vec{R}_{0F} = \vec{R}_{01} + \vec{R}_{03} + \vec{R}_{61} + \vec{R}_{611} + \vec{R}_{612} \\ \vec{R}_{0E} = \vec{R}_{01} + \vec{R}_{03} + \vec{R}_{51} + \vec{R}_{511} + \vec{R}_{512} \\ \vec{R}_{0D} = \vec{R}_{01} + \vec{R}_{03} + \vec{R}_{41} + \vec{R}_{411} + \vec{R}_{412} \\ \vec{R}_{0C} = \vec{R}_{01} + \vec{R}_{02} + \vec{R}_{31} + \vec{R}_{311} + \vec{R}_{312} \\ \vec{R}_{0B} = \vec{R}_{01} + \vec{R}_{02} + \vec{R}_{21} + \vec{R}_{211} + \vec{R}_{212} \\ \vec{R}_{0A} = \vec{R}_{01} + \vec{R}_{02} + \vec{R}_{11} + \vec{R}_{111} + \vec{R}_{112} \end{cases} \quad (3)$$

Разработана конструкция инсектоморфной конечности платформы (рис 4). Разработан вариант гибридной конечности (рис.5), где в качестве конечного звена использован колесный привод, что позволяет избавиться от недостатка связанного с низкой скоростью перемещения шагающих роботов.

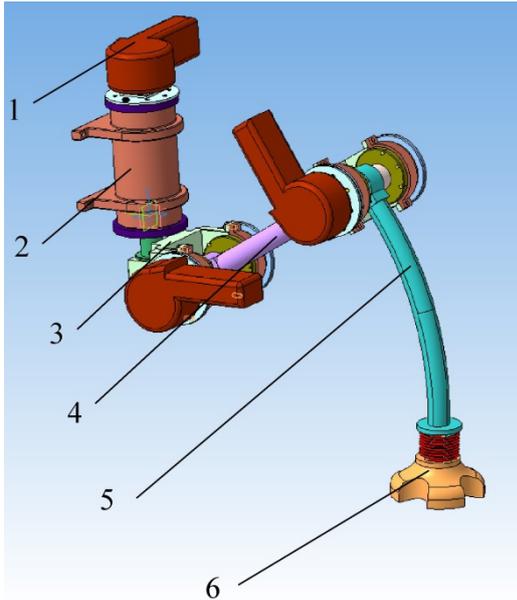


Рисунок 4 – Конструкция инсектоморфной конечности платформы

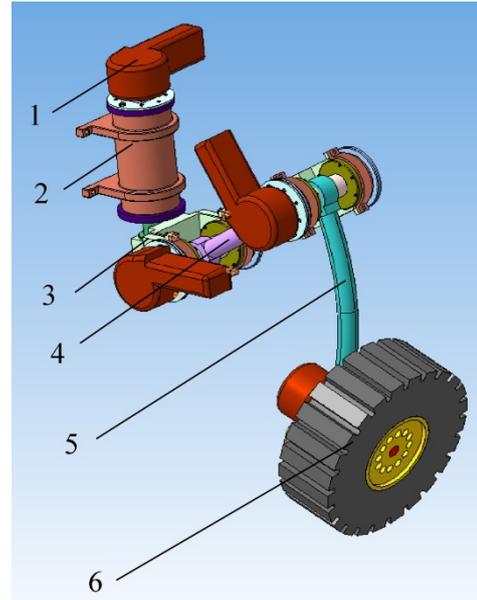


Рисунок 5 – Конструкция гибридной инсектоморфной конечности платформы.

1 – мотор-редуктор с датчиками обратной связи, 2 – втулка, 3 – бедренный шарнир, 4 – бедренное звено, 5 – голень, 6 – пассивная стопа (колесо с мотор-редуктором и датчиками обратной связи)

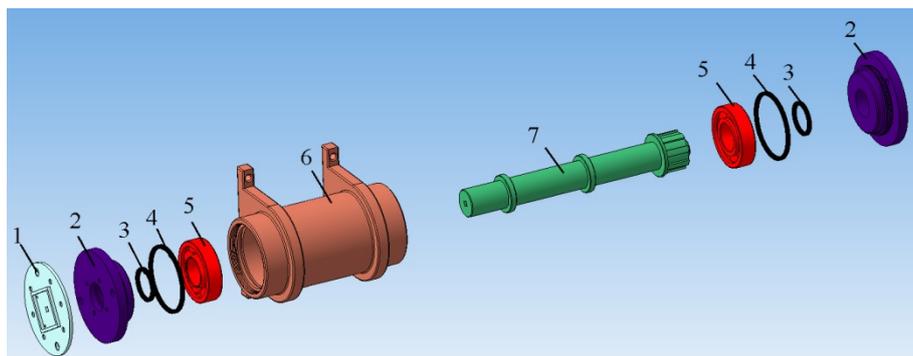


Рисунок 6 – Вращательный шарнир 1:

1 – фланец, 2 – крышка, 3 – сальник крышки, 4 – сальник корпуса, 5 – радиально упорный подшипник, 6 – корпус шарнира, 7 – вал

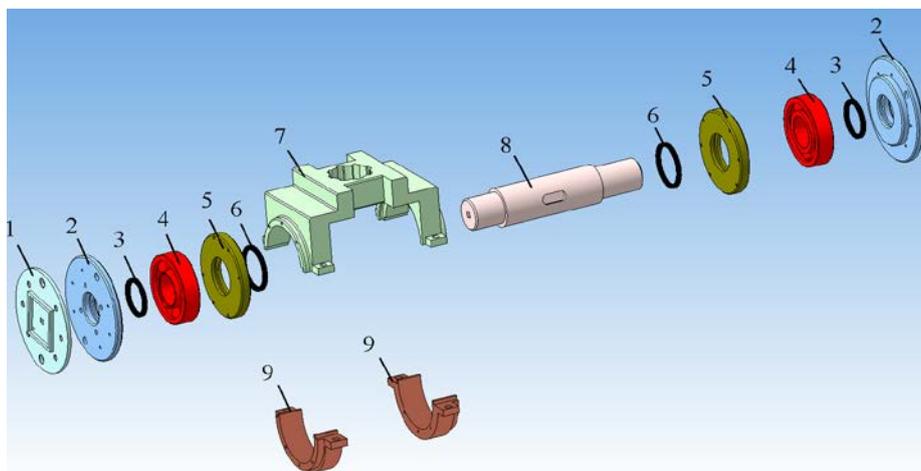


Рисунок 7 – Сборка шарнира 2

1 – фланец, 2 – крышка, 3 – сальник крышки, 4 – радиально упорный подшипник, 5 – внутренняя крышка, 6 – сальник внутренней крышки, 7 – корпус шарнира, 8 – вал, 9 – часть корпуса

Шагающие инсектоморфные движители являются перспективными видами технических решений для перемещения. Эта область техники в настоящее время изучена не полностью. Роботизированные платформы, оснащенные движителями подобной конструкции перспективны для применения в составе многофункциональных наземных и подводных транспортно-технологических комплексах и космической технике.

1. Гаврилов, А. Е. Автономная роботизированная шагающая платформа для мониторинга окружающей среды / А. Е. Гаврилов, А. С. Даншин, А. А. Бурханов // Известия ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 21 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2014. - № 12 (139). - С. 153-157.
2. Составной шагающий инсектоморфный движитель / А. Е. Гаврилов, О. А. Мишустин, Д. М. Селюнин, С. Б. Хантимилова // Автоматизация технологических процессов механической обработки, упрочнения и сборки в машиностроении : сб. науч. ст. междунар. науч.-техн. конф. (3-5 ноября 2016 г.) / редкол.: А. Н. Гречухин (отв. ред.) [и др.] ; Юго-Западный гос. ун-т [и др.]. - Курск, 2016. - С. 66-70.
3. Лапшин, В. В. Механика и управление движением шагающих машин / В. В. Лапшин – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. - 199 с. : ил.
4. Climbing favours the tripod gait over alternative faster insect gaits / P. Ramdya, [and oth.] // Nature Communications. – 2017. – 17 Feb. – V. 8. – art. num. 14494.

*M.B.Ignatyev, V.P.Popov, M.B.Sergeev*

## THE PROBLEM OF THE EXTERNAL CONTROL OF DRIVING OFFENDERS TO IMPROVE ROAD SAFETY

*St-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.*

### Abstract

Considers the problem of improving road safety and proposed to introduce external control of vehicles-violators based on the use of the intelligent functions of smart cars and smart roads. Examines the problem of determining the vehicles of offenders in the on-line video cameras monitor traffic flow.

Keywords: external control, smart cars and smart roads.

## **ПРОБЛЕМЫ ВНЕШНЕГО УПРАВЛЕНИЯ АВТОМОБИЛЯМИ-НАРУШИТЕЛЯМИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ**

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

### **Аннотация**

Рассматривается проблема повышения безопасности дорожного движения и предлагается вводить внешнее управление автомобилями-нарушителями на основе использования интеллектуальных функций умных автомобилей и умных дорог. Анализируется проблема определения автомобилей – нарушителей в режиме on-line видеокамер наблюдения за транспортным потоком.

Ключевые слова: внешнее управление, умные автомобили, умные дороги, безопасность дорожного движения.

**1.** Проблема повышения безопасности дорожного движения остро стоит в России – каждый год на дорогах страны погибает около 30 тысяч человек и около 300 тысяч раненых, что вынуждает искать способы повышения безопасности дорожного движения. Наш Университет всегда занимался бортовыми вычислительными системами самолетов и сейчас эта наработанная техника внедряется в автомобили с учетом специфики [1,2,3,4,5]. В настоящее время автомобильный промышленный кластер Петербурга, состоящий из филиалов мировых автомобильных фирм (Форд, Тойота, и др.) производит в год свыше 500 тысяч автомобилей, многие из которых уже имеют интеллектуальные функции типа автоматическая парковка, автоматический круиз-контроль и др. Ниже рассматриваются проблемы организации внешнего управления автомобилями-нарушителями путем объединения уже существующих систем видеонаблюдения за автомобилями и умных автомобилей.

**2.** Цель проекта – повысить безопасность дорожного движения.

\* Средства достижения цели – объединить возможности кластера автопромышленности Санкт-Петербурга и дорожного хозяйства города на взаимовыгодной основе с привлечением в качестве разработчиков подсистем и элементов вузы города.

\* Предприятия автопрома – Форд, Тойота и др. уже разрабатывают умные автомобили, но эффективность их применения зависит от дорожного хозяйства города, которое управляется Комитетами Правительства Санкт-Петербурга.

\* На это проектное предложение имеется положительный отзыв Комитета по экономической политике и стратегическому планированию Санкт-Петербурга №16-9356/16-9-1 от 18.11.2016.

**3.** Кластер автомобилестроения и автокомпонент обладает следующими преимуществами:

- а) экономия на логистике, благодаря географической близости;
- б) большое количество поставщиков;
- в) синергия в области НИОКР;
- г) экономическая стабильность;
- д) снижение затрат на развитие рынка (близость потенциальных клиентов);
- е) снижение затрат на закупки;
- ж) снижение затрат на подготовку персонала (близость университетов).

**4.** Определение паттернов экстремальных ситуаций дорожного движения в рамках объектно-ориентированного программирования.

\* Разработка паттернов правил дорожного движения и экстремальных ситуаций (опасной езды и др.) на основе объектно-ориентированного программирования. Эти паттерны должны загружаться в память информационно-вычислительной системы автомобиля для быстрого принятия решений.

\* Разработка информационно-вычислительной системы автомобиля.

\* Разработка информационно-вычислительной системы умных дорог города

\* Паттерны жесткого и мягкого соблюдения правил дорожного движения

\* Паттерны экстремальных ситуаций (опасной езды и др.) – около 100 и все они могут быть опасными

\* Путем взаимодействия с умной дорогой количество опасных паттернов можно сократить вдвое, то есть в два раза повысить безопасность.

**5.** Информационно-вычислительные системы умного автомобиля [1,2,6].

Современный автомобиль постоянно совершенствуется в направлении снижения вероятности дорожно-транспортных происшествий и минимизации его последствий. Этому способствуют разработка сенсорной системы автомобиля, когда автомобиль оснащается лазерными системами, телевизионными видеокамерами, ультразвуковыми (пьезокерамическими) устройствами. Информация от перечисленных датчиков обрабатывается на многопроцессорном вычислительном комплексе повышенной надежности. Здесь уместны авиационные вычислительные системы последних поколений. Особое направление в развитии интеллектуального автомобиля принадлежит разработке программного обеспечения (ПО). Компания Cognitive Technologies – разработчик программного обеспечения для беспилотных машин. В российских Правилах Дорожного Движения новые указатели должны появиться в разделе №5 – “Знаки особых предписаний”. Они означают:

- “Внимание, на участке беспилотное транспортное средство”,
- “Начало дорожного участка с участием беспилотного транспорта”,
- “Конец дорожного участка, с участием беспилотного транспорта”.

Макет таких знаков направлен на согласование в Государственное специализированное монтажно-эксплуатационное предприятие МВД. В 2015 году стало известно [5], что фирма Cognitive Technologies работает над ПО для беспилотного грузовика КАМАЗ. Проект финансируется Министерством образования и науки России, а также самим Камским автомобильным заводом.

Управляющая электроника беспилотника будет руководствоваться данными получаемыми с комплекса видеокамер и специальных сенсоров, сканирующих пространство. Предполагается, что первые прототипы беспилотных грузовиков будут протестированы на испытательном полигоне КАМАЗ, а впоследствии на производственных площадках. Кроме того, подразделение искусственного интеллекта фирмы Cognitive Technologies проводит испытания на специальном виртуальном полигоне на базе центра робототехники Московского института стали и сплавов. Предполагается, что первые грузовики с автоматом будут испытаны на общих дорогах в 2017-2019 гг. Инициатива создания интеллектуального автомобиля предусматривает приоритетное решение задач усиления различных информационных технологий и автономных бортовых систем автомобиля. Многие из них уже находятся в эксплуатации и внедрены на автомобильном рынке. Традиционные системы информирования и помощи водителю, управляемые бортовым компьютером и широко представленные в различных видах комплектации автомобилей (на примере ФОРД МОНДЕО), включают в себя:

- а) Антиблокировочная тормозная система,
- б) Система кондиционирования воздуха, климат-контроль,
- в) Система контроля давления в шинах,
- г) Система напоминания о непристегнутом ремне безопасности,
- д) Система помощи при трогании на подъеме,
- е) Система стабилизации прицепа,
- ж) Система управления замками без помощи ключа,
- з) Навигационная система и др.

Представленный список традиционных информационных технологий в автомобильных бортовых системах постоянно расширяется. Подробно на перечисленных традиционных системах останавливаться не будем. Дополнительные системы на базе бортовых компьютеров, предлагаемые сейчас изготовителями автомобилей (на том же примере, ФОРД МОНДЕО), с перспективой их дальнейшего развития, включают в себя:

- \* Система курсовой устойчивости и антипробуксовочная система,
- \* Система помощи при экстренном торможении
- \* Система автоматического управления светом фар,
- \* Внутрисалонная коммуникационная система,
- \* Система помощи при парковке и выезде с парковки,
- \* Система контроля слепых зон,
- \* Система ограничения и управления скоростью (круиз-контроль),
- \* Система предупреждения водителя об обнаружении впереди идущего автомобиля, сближениях и возможных столкновениях,
- \* Система помощи водителю при его утомленности (на скоростных магистралях),
- \* Система контроля за соблюдением дорожной разметки (удержания полосы движения),
- \* Система информации о наличии автомобилей в мертвой (“слепой”) зоне видимости и предупреждения о пересекающих потоках движения,
- \* Система распознавания дорожных знаков,

- \* Система адаптивного управления рулем,
- \* Система авто-старт-стоп,
- \* Система выбора режима подвески
- \* Система контроля тяги в поворотах,
- \* Система динамической стабилизации,
- \* Система помощи при экстренном торможении и другие

Более подробно, оснащение интеллектуальными технологиями перечисленных дополнительных (нетрадиционных) перспективных бортовых систем (для обеспечения безопасности как водителя так и пассажиров) рассматривается отдельно.

#### **6. Система видеонаблюдения для выявления автомобилей-нарушителей**

\* В городе уже установлены тысячи видеочкамер, информация с которых обрабатывается с СПб Информационно-аналитическом центре и передается off-line полиции и ГИБДД для борьбы с нарушителями после совершения нарушений путем выписывания штрафов.

\* Эта же информация может быть использована on-line для оперативного принятия решений по повышению безопасности. Во-первых, путем воздействия на авто нарушителя, во-вторых, путем предупреждения участвующих в движении на этом участке с тем, чтобы они приняли соответствующие меры в зависимости от ситуации.

- \* Для этого необходимо ввести новые блоки в ИВС автомобиля и усовершенствовать ИВС умной дороги.

#### **7. Заключение**

\* После атаки на небоскребы Нью-Йорка 9/11 было заключено соглашение между США и Россией по повышению антитеррористической безопасности.

\* Самолеты оборудуются системами внешнего управления и системами обнаружения факта захвата самолета террористами.

\* После обнаружения факта захвата самолета террористами, центр внешнего управления отключает возможность управления самолетом из пилотской кабины и переходит на внешнее управление, уводит самолет из опасной зоны и сажает его на специальном аэродроме.

\* В проекте по введению внешнего управления автомобилями-нарушителями целесообразно участвовать автомобильному промышленному кластеру СПб и предприятиям, которые развивают дорожную инфраструктуру города. Внедрение внешнего управления автомобилями-нарушителями позволит повысить безопасность на дорогах.

\* Аналогичные комплексные системы могут быть созданы и в других городах страны, что позволит увеличить эффективность проекта.

\* Для реализации системы внешнего управления автомобилями-нарушителями необходимо разработать и принять соответствующий закон.

- \* Проект может войти в Аппаратно-программный комплекс «Безопасный город»

1. М.Б.Игнатьев Кибернетическая картина мира. Сложные киберфизические системы. – СПб.: ГУАП, 2014, - 472 с.
2. М.Б.Игнатьев Просто кибернетика, - СПб, Страта, 2016. - 248с.
3. М.Б.Игнатьев, В.П.Попов, М.Б.Сергеев Использование умных автомобилей и умных дорог для повышения безопасности дорожного движения. Доклад на Научном совете РАН по робототехнике и механотронике, 22.12.2016, Москва.
4. М.Б.Игнатьев, В.П.Попов, М.Б.Сергеев Об инновационных IT проектах умные автомобили и умные дороги для повышения безопасности. Доклад на Совете по информатизации С-Петербурга, 1.03.2017, Смольный.
5. М.Б.Игнатьев. Интервью «Второе рождение кибернетики», газета Санкт-Петербургские ведомости, 24.03.2017, подготовлено А.Б.Долгошевой.
6. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [<https://motor.ru/news/2016/06/29/autonomsigns>] ,свободный.

## **INFORMATION-COMPUTATIONAL SYSTEM OF A ROBOT DESIGNED TO INSPECT THE PIPELINE**

*St-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

### **Abstract**

The article observes the information-computational system robot designed to inspect the pipeline. Design and principle of operation of adaptive walking robot are described in publications [1], [2] and the patent for the invention № 2571242 [3]. For inspection of gas pipelines by using different methods and devices. So, for example a well-known flaw detector-projectile mounted thereon various sensors, moving under the pressure of the pumped product. The disadvantage of this device is that for the qualitative examination of the pipe, it is necessary to decrease the speed of pumping gas, which leads to a delay in its delivery. There are construction robots wheeled type, the lack of which is the impossibility of passing strongly acidic and vertical sections.

We offer the option of adaptive walking robot, along with the traditional diagnostic tools that will improve the quality and frequency of inspection of pipelines. You do not need to block or limit the flow of gas in the tube, which is a huge advantage. The robot is completely Autonomous, due to the use of the original wind turbine, providing the necessary electricity by the gas flow. The word adaptive in the name of the system implies the ability of the robot to adapt to different deformations and bending, to adapt to pipe diameter is within the specified limits. This is achieved by original design of the robot's feet, which in turn is drawn or pulled to contact with the walls of the pipe.

Keywords: robot, adaptation, diagnostics of pipelines, detection of defects, power supply, communication with operator.

1. Ignatyev M. B., "Cybernetic picture of the world. Complex cyber-physical systems". SPB, 2014,- 472 pp.
2. Ignatyev M. B., "Simple Cybernetics". / Michael Ignatyev.-SPb.: "Strata", 2016,- 248 pp.
3. Ignatyev M. B., Lipinski J. A., Zharinov O.O, Nenashv V. A., Makin, P. I., Gerasimov G. M. "Autonomous adaptive walking robot for diagnostics of pipelines." Patent No. 2571242.
4. Internet resources. (Wikipedia, etc.).

*М.Б. Игнатъев, В.А. Ерохин, Я.А. Липинский, П.И. Макин*

## **ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА АДАПТИВНОГО ШАГАЮЩЕГО РОБОТА ДЛЯ ОБСЛЕДОВАНИЯ ГАЗОПРОВОДА**

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,  
ignatmb@mail.ru*

### **Аннотация**

В статье рассматривается информационно-вычислительная система робота, предназначенного для обследования газопровода. Конструкция и принцип действия адаптивного шагающего робота описаны в публикациях [1], [2] и патенте на изобретение № 2571242 [3]. Для обследования газопроводов применяются различные методы и устройства. Так, например известен дефектоскоп-снаряд, с установленными на нем различными датчиками, движущийся под воздействием давления перекачиваемого продукта. Недостатком данного устройства является то, что для проведения качественного обследования трубы, необходимо снижение скорости перекачки газа, что приводит к задержке его поставки. Имеются конструкции роботов колесного типа, недостатком которых является невозможность прохождения сильнонаклонных и вертикальных участков.

Предлагаемый вариант адаптивного шагающего робота, наряду с традиционными средствами диагностики, позволит повысить качество и частоту обследования газопроводов. При этом не требуется перекрывать или ограничивать подачу газа в трубе, что является неоспоримым преимуществом. Робот является полностью автономным, за счет применения оригинальной ветровой турбины, обеспечивающей получение необходимой электроэнергии потоком газа. Слово адаптивный, в названии системы, подразумевает возможность робота приспосабливаться к различным деформациям и изгибам, подстраиваться под диаметр трубы в заданных пределах. Это достигается за счет оригинальной конструкции ног робота, которые поочередно втягиваются или вытягиваются до соприкосновения со стенками трубы.

Ключевые слова: робот, адаптация, диагностика газопроводов, распознавание дефектов, энергообеспечение, связь с оператором.

Для связи с оператором может быть использован стандартный модуль Wi-Fi, а в качестве волновода сама труба газопровода. По предложению автора на роботе может быть установлено до шести web-камер с полупроводниковыми светодиодами подсветки, что обеспечит полный круговой осмотр трубы. Также вместо камер могут быть установлены ультразвуковые генераторы и приемники. Таким образом, оснащенный робот может передвигаться в теле трубы на многие километры и производить обследование в автономном режиме. Единственный момент, в случае застревания или поломки робота, необходимо предусмотреть возможность его эвакуации, например с помощью другого робота используя систему стыковки или захвата. В случае ввода в эксплуатацию, необходимо предусмотреть систему помещения робота в тело трубы и его извлечения через специальные шлюзы.

Таким образом, поставлена задача разработки информационно-вычислительной системы, которая обеспечит необходимую функциональность, управление перемещением робота, координацию диагностических систем и системы электропитания, связь с оператором. Эксплуатация газопроводов производится в различных климатических условиях, от  $-60^{\circ}\text{C}$  на Крайнем Севере и до  $+40^{\circ}\text{C}$  в южных районах, причем температура на выходе компрессорной станции может достигать и  $60^{\circ}\text{C}$ . Таким образом, к элементной базе создаваемой системы предъявляются достаточно жесткие требования. Здесь возможно применение элементов зарубежного производства, исполнения (industrial) или отечественного (специального назначения) с необходимыми параметрами температурного режима работы. На рис. 1 [2] представлена блок-схема системы управления роботом.

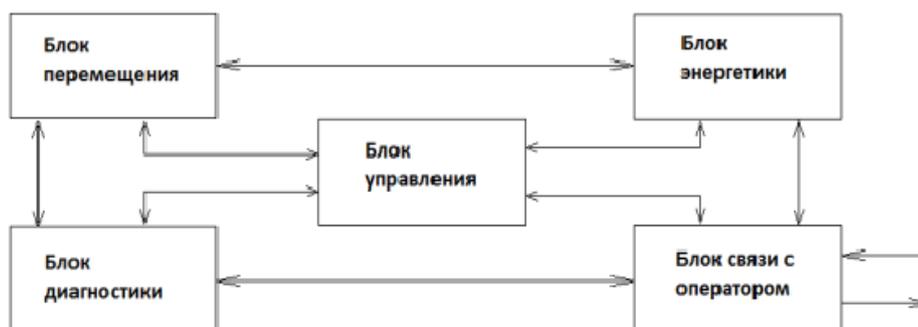


Рисунок 1 – Блок-схема системы управления роботом

Блок энергетики представляет собой совокупность источника энергии, формирователей необходимых напряжений для питания исполнительных узлов и управляющих блоков, возможно, систему резервного питания, а также схему управления и диагностики самого блока. Автор предлагает в качестве источника энергии системы использовать стандартный ветровой генератор, например фирмы “Siemens”. Для формирования необходимых напряжений питания можно использовать линейные или импульсные стабилизаторы, как зарубежных, так и отечественных производителей. Например, отечественной промышленностью выпускаются интегральные стабилизаторы напряжения серии 1264 (прототип LT1083 фирмы “Linear Technology”), рассчитанные на диапазон выходных напряжений от 1,25 В до 12 В и обеспечивающие ток нагрузки до 7 А, с диапазоном рабочей температуры от  $-60$  до  $+125^{\circ}\text{C}$ . Согласно предложенной конструкции робота, вся электроника размещается в герметичной полости сделанной из металла, поэтому сам корпус может быть использован как радиатор для отвода выделяемого тепла электронных компонентов.

Сердцем робота является блок управления, обеспечивающий координацию работы всех узлов системы, управление движением, включением и переключением датчиков и исполнительных механизмов, обеспечение управления приемом и передачей информации, обработку и интерпретацию принимаемых команд от оператора и т.д. Блок управления может быть организован на базе микропроцессора (микроконтроллера) с набором необходимых периферийных элементов (преобразователей уровня, согласования, формирователей, тактовых генераторов и т.п.). В настоящее время в России ряд предприятий выпускают современные микроконтроллеры, например фирма “Миландр” предлагает серию (1986ВЕхх) 32 разрядных микроконтроллеров построенных на ядре ARM Cortex-M3, с тактовой частотой до 144 МГц. Диапазон рабочих температур от  $-60$  до  $+125^{\circ}\text{C}$ . На платформе микроконтроллеров ARM можно проектировать встраиваемые узлы с применением

операционных систем реального времени (ОСРВ или RTOS), например семейства QNX. Подобные системы компактны, не требовательны к аппаратным ресурсам. Позволяют создавать гибкие, настраиваемые устройства, менять свойства и задачи даже в процессе эксплуатации. В такой конфигурации часть функций блока диагностики может быть возложена именно на такой микроконтроллер (как вариант исполнения). А именно, функции определения возможных дефектов трубы газопровода по получаемым данным видео или фотоизображений, а также на основе данных ультразвуковых датчиков. Такая система позволит производить диагностику без постоянного участия оператора, т.е. в полуавтоматическом режиме, до обнаружения возможного дефекта. В случае обнаружения, робот останавливается, делает запрос на пульт оператору, который визуальнo или с помощью дополнительных средств диагностики, а также с применением экспертных систем, определяет характер и степень повреждения или его отсутствия. Возможный алгоритм и аппаратно-программную реализацию данной функции постараюсь рассмотреть в следующих статьях, а здесь остановимся на системе управления. На рис. 2 представлен возможный вариант структурной блок-схемы с применением микроконтроллера на ядре ARM серии 1986BExx. Микроконтроллер (МК) под управлением встроенной операционной системы координирует работу всех модулей робота. В качестве шин управления и передачи данных между микроконтроллером и внешними блоками, могут быть использованы стандартные, встроенные в МК, например I<sup>2</sup>C, CAN, UART, USB и др.

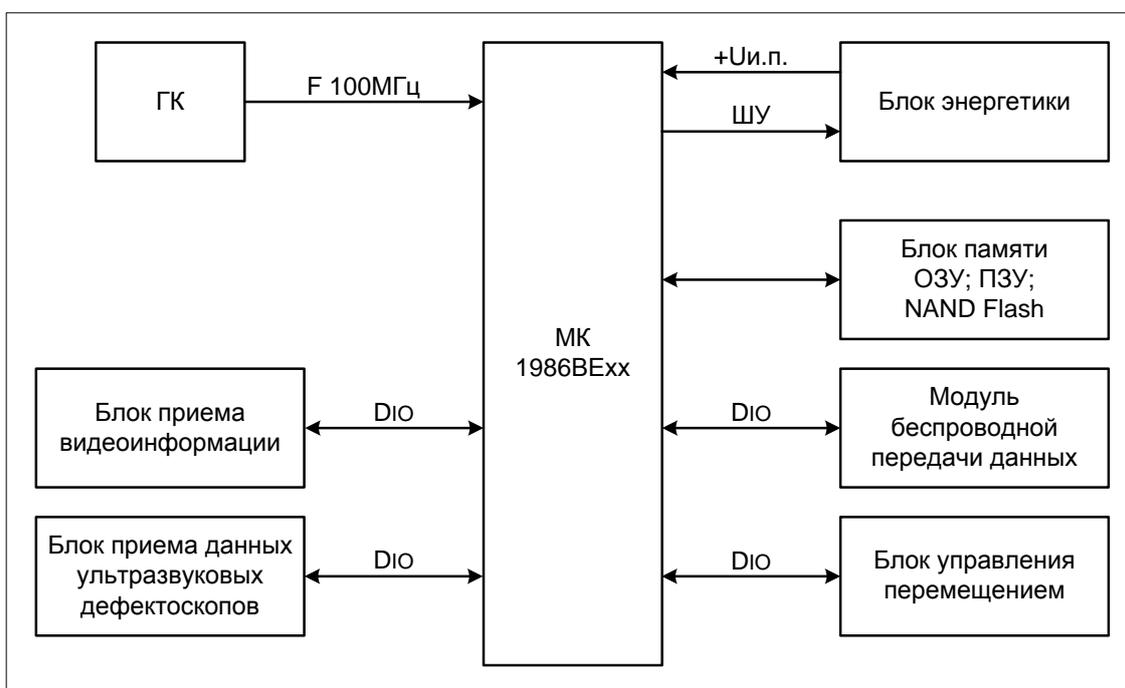


Рисунок 2 – Возможный вариант структурной блок-схемы с применением микроконтроллера на ядре ARM серии 1986BExx

МК оснащен различными модулями АЦП, ЦАП, компараторами, температурными датчиками, сторожевыми таймерами, таймерами-счетчиками с функциями ШИМ и регистрации событий, достаточным количеством пользовательских линий ввода-вывода, что позволяет строить полноценные системы с нужной функциональностью. Имеются встроенные в МК интерфейсы SWD и JTAG, что позволяет оперативно, в составе аппаратуры производить отладку и менять конфигурацию, обеспечивая гибкость настройки и возможность адаптации системы под конкретные условия эксплуатации и задачи.

Блок энергетики обеспечивает необходимые напряжения питания и связан с МК шиной управления. Блок ГК - генератор кварцевый, предназначен для формирования тактовых импульсов (F МГц), необходимых для работы системы. Отечественной промышленностью выпускается ряд кварцевых генераторов, обеспечивающих стабильность параметров в диапазоне температур от -60 до +85°С, например ГК-108-П. Блок внешней памяти предназначен для хранения программ и обрабатываемых данных и может работать с аппаратной поддержкой режима DMA.

Блок перемещения включает в себя устройство управления исполнительными механизмами, обеспечивающими передвижение робота по заданной программе. Алгоритм передвижения представляет собой циклический процесс, с возможностью внешнего управления командами, например, стоп, вперед,

назад. Данную систему проще всего реализовать в виде конечного автомата, с возможностью управления внешними сигналами. Для создания подобного автомата в аппаратной реализации наиболее целесообразно использовать ПЛИС (Программируемая логическая интегральная схема), на базе которой достаточно просто формируются необходимые функции, интерфейсы обмена данными, управляющие автоматы и т.п. Отечественной промышленностью освоен выпуск ряда микросхем ПЛИС, способных работать при температурах от  $-60$  до  $+125^{\circ}\text{C}$ , например серия 5576ХСxxx. Типовая логическая емкость таких микросхем порядка 200 000 вентилей, примерно 10 000 логических элементов, что вполне достаточно для реализации поставленной задачи. В качестве среды разработки (конфигурирования) данных ПЛИС можно использовать MAX+PLUS II или Quartus II, т.е. типовые, известные САПР. Применение ПЛИС позволяет создавать устройства, с возможностью многократного изменения конфигурации в составе аппаратуры, что значительно расширяет возможности для дальнейшей модернизации и упрощает процесс отладки. На рис. 3 представлен возможный вариант структурной блок-схемы управления перемещением робота.

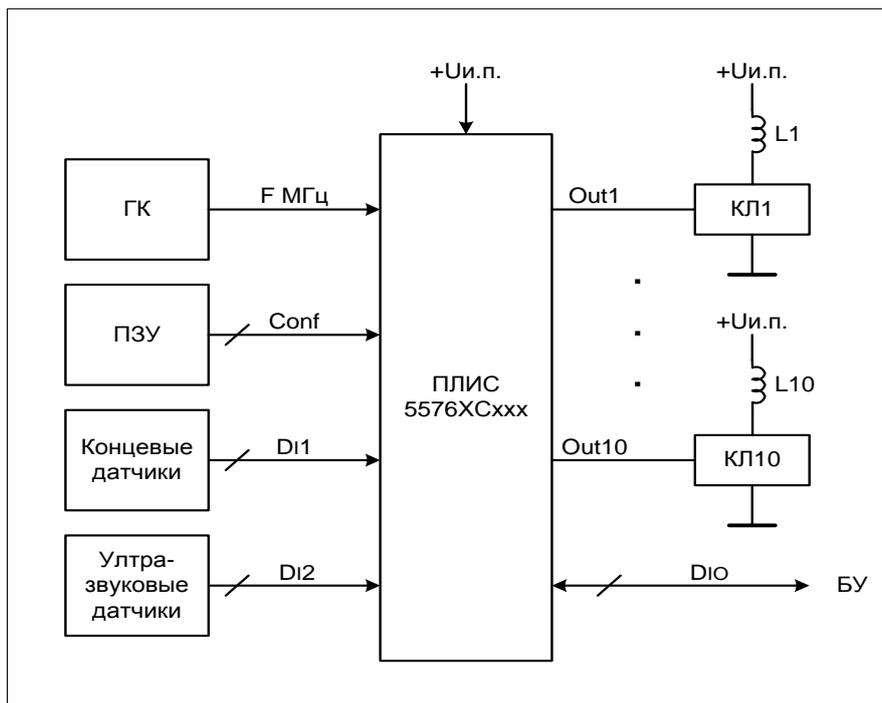


Рисунок 3 – Блок управления перемещением

На кристалле ПЛИС размещается вся логика автомата управления, выработки управляющих сигналов на исполнительные механизмы, обработки входных данных с концевых и ультразвуковых датчиков ( $D_{i1}$ ,  $D_{i2}$ ), а также интерфейса обмена данными и получения инструкций от микроконтроллера блока управления. Для связи с микроконтроллером может быть применена стандартная шина обмена данными ( $D_{i0}$ ), например  $\text{I}^2\text{C}$ ,  $\text{UART}$ ,  $\text{CAN}$  и др., с применением системы прерывания. Данные шины достаточно просто реализуются на ПЛИС, причем существуют уже готовые так называемые IP-блоки данных интерфейсов, как со свободной, так и платной лицензией. Блок ПЗУ - постоянное запоминающее устройство, предназначено для хранения конфигурационных данных загружаемых в ПЛИС. Выходы ПЛИС  $\text{Out1}.. \text{Out10}$ , подаются на входы соответствующих силовых ключей  $\text{КЛ1}.. \text{КЛ10}$ , обеспечивающих переключение подачи напряжения на катушки  $L1..L10$  (соленоиды) исполнительных механизмов. В качестве ключей могут быть использованы биполярные или полевые транзисторы, либо твердотельные реле, рассчитанные на необходимый ток коммутации. Также на кристалле ПЛИС может быть размещен блок, выполняющий функции, или часть их, определения возможных дефектов полости трубы по получаемым видеоданным или данных ультразвуковых дефектоскопов (на схеме не показано).

Блок диагностики выполняет функцию обнаружения всевозможных дефектов и нарушений полости трубы газопровода, посредством установленных на роботе различных датчиков. В качестве которых могут быть использованы ультразвуковые датчики для дефектоскопии или видеокамеры (веб-камеры со светодиодной подсветкой). По предложению автора, для обеспечения кругового обзора достаточно 6 камер. Для организации обработки и передачи изображений с 6 камер можно применить метод мультиплексирования или параллельной обработки изображений всех камер с выводом одной,

выбранной оператором или алгоритмом программы. Как упоминалось выше, функции обработки изображений и распознавания возможных дефектов может быть возложена на микроконтроллер блока управления или с применением отдельного чипа, а также на кристалле ПЛИС блока перемещения. На данный момент вопрос не решенный, зависит от конкретной реализации с применением определенной элементной базы и выработанной стратегии разработки системы. Для обнаружения больших препятствий и поворотов в трубе, можно использовать ультразвуковой датчик расстояния, установленный на торце корпуса робота. Например, модуль HC-SR04 использует акустическое излучение для определения расстояния до объекта, обеспечивает высокую точность и стабильность измерений в диапазоне от 2 до 400 см, и углом измерений в 30°. Оснащенный таким датчиком робот сможет автоматически адаптироваться к ситуации, без вмешательства оператора. И в зависимости от программы, останавливаться, менять направление движения, посылать сообщение и т.п.

В качестве блока связи может быть использован стандартный модуль Wi-Fi, обеспечивающий беспроводную передачу информации с датчиков робота на пульт и прием управляющих команд и инструкций от оператора. Модуль должен обеспечить достаточную пропускную способность передачи видеoinформации в реальном времени, что позволит производить качественное обследование полости трубы во время движения робота. Так, например для использования в промышленности фирма "Siemens Automation & Drives" предлагает Wi-Fi-решения для своих контроллеров SIMATIC в соответствии со стандартом IEEE802.11g в свободном диапазоне 2,4 ГГц и максимальной скоростью передачи 54 Мбит/с, что при первом приближении вполне достаточно для данной системы.

Создание информационно-вычислительной системы адаптивного шагающего робота, обеспечивающей необходимую функциональность, задача не простая, но интересная. В процессе разработки потребуются решить ряд технических вопросов, связанных с обеспечением электропитания нужной мощности, необходимости использования элементной базы с рабочим диапазоном температуры от -60 до +60°C, ограниченности размеров и формы печатных плат устройства, обеспечение связи на большие расстояния. И возможно другие, еще не известные на данный момент, вопросы, которые наверняка возникнут.

1. Игнатъев М.Б. "Кибернетическая картина мира. Сложные киберфизические системы". СПб, 2014.
2. Игнатъев М.Б. "Просто кибернетика". / Михаил Игнатъев.-СПб.: "Страта", 2016.-248 с.
3. Игнатъев М.Б., Липинский Я.А., Жаринов О.О., Ненашев В.А., Макин П.И., Герасимов Г.М. "Автономный адаптивно шагающий робот для диагностики газопроводов". Патент № 2571242.
4. Интернет-ресурсы. (Википедия и др.).

*Ю.В. Подураев*

## **ПОДХОД И ОПЫТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЕДИЦИНСКОЙ КОЛЛОБОРАТИВНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ ХИРУРГИИ И БИОПРИНТИНГА<sup>XXII</sup>**

*МГТУ «СТАНКИН», Москва  
y.poduraev@stankin.ru*

### **Аннотация**

В работе проведен анализ современных тенденций развития и методов построения коллаборативных медицинских робототехнических систем. Предложен подход к проектированию медицинской коллаборативной робототехники, который направлен на целенаправленный научно-технический поиск роботических и мехатронных технологий, позволяющих принципиально превысить возможности естественных систем человека при выполнении медицинских операций. Приводятся результаты разработки исследовательских прототипов медицинских роботов и их экспериментального тестирования на операциях лазерной челюстно-лицевой хирургии и биопринтинга, выполненных совместно специалистами Московского государственного технологического университета «СТАНКИН» и Московского государственного медико-стоматологического университета им. А.И. Евдокимова.

Ключевые слова: коллаборативная робототехника, медицинский робот, роботические технологии, мехатронные технологии, роботы для лазерной хирургии, роботы для биопринтинга.

Главной целью коллаборации робототехники и медицины является повышение эффективности лечения и уменьшение рисков нанесения вреда здоровью человека при выполнении обследования или

операции. Научно-методическая проблематика медицинской коллаборативной робототехники обусловлена в значительной степени междисциплинарной сущностью ее предмета. Перед разработчиками робото-медицинских систем и технологий стоят уникальные проектные задачи, которые затрагивают предметные основы столь ранее обособленных областей научных и прикладных знаний как медицина и инженерия. При этом требуется искать эффективные проектные решения на системном пересечении и синергетическом сочетании современных достижений в этих областях. Важно отметить, что в последние годы резко возрос интерес к робото-медицинским системам, что свидетельствует о высоком интересе научного сообщества к данному направлению [1-4].

Анализ современных тенденций в развитии коллаборативной медицинской робототехники показал, что актуальной задачей является переход к роботам-хирургам от роботов-ассистентов [1-3]. Роботы - хирурги способны под контролем врача автономно выполнять отдельные операции с показателями, многократно превышающими мануальные возможности человека при работе с аналогичными медицинскими инструментами (например, медицинскими лазерами, лапароскопами и др.) [4,5].

Функциональные возможности роботов-хирургов предусматривают:

- строгое соблюдение роботом плана и ограничительных условий, установленных врачом; оперативный контроль хода роботической операции врачом в режиме реального времени;
- работа системы безопасности пациента, включающей комплекс информационно-измерительных и аппаратно-программных устройств защиты;
- дружелюбный интерфейс «Врач - Робот», предусматривающий предварительную компьютерную симуляцию операции и визуализацию операционной зоны;
- персонализация операционного плана для пациента путем использования индивидуальных 3D – графических моделей объектов и зоны операционного вмешательства;
- автоматическая генерация программ движений робота-хирурга в CAD-CAM системе;
- интеллектуальная система поддержки решений для оптимизации программ движения робота и режимов работы медицинского инструмента.

Предлагаемый подход к проектированию медицинской коллаборативной робототехники включает следующие основные этапы:

Этап 1. Анализ эффективности мануальных технологий и операций, выполняемых врачами-хирургами с использованием современных медицинских инструментов.

Этап 2. Формирование функциональных требований, совокупности критериев и показателей эффективности операций. Выделение доминирующих критериев и областей варьирования.

Этап 3. Определение актуальных областей для разработки коллаборативной медицинской робототехники, где принципиально достижимо (на сегодняшнем уровне инженерных знаний и состояния техники) существенное превышение медицинским роботом естественных характеристик механических, сенсорных и интеллектуальных систем человека.

Этап 4. Выбор существующего робота (манипулятора и системы управления) и разработка оригинальных программного обеспечения, медицинских рабочих органов, информационных и сенсорных устройств.

Этап 5. Альтернативный вариант: разработка и изготовление оригинального манипулятора и/или оригинальной системы управления, превосходящих имеющиеся аналоги современных роботов по заданным техническим характеристикам.

На базе предложенного подхода разработаны исследовательские прототипы медицинских роботов, предназначенных для лазерной челюстно-лицевой хирургии и биопринтинга, которые были выполнены совместно специалистами Московского государственного технологического университета «СТАНКИН» и Московского государственного медико-стоматологического университета им. А.И. Евдокимова [1].

В состав роботизированного multifunctional хирургического комплекса (МХК) для лазерной челюстно-лицевой хирургии входят манипуляционный робот-хирург, мануальный тренажёрный комплекс, фантом головы пациента и рабочее место хирурга (рис.1).



Рисунок 1 – Роботизированный multifunctional хирургический комплекс для лазерной челюстно-лицевой хирургии

Робот-хирург реализован на базе манипулятора KUKA LBR 4+ и включает лазерный медицинский инструмент, прототип рабочего органа, лазерную координатно-измерительную машину с программным пакетом для обработки данных и оптическую систему безопасности.

На основе проведённого анализа типовых движений и траекторий медицинского инструмента при проектировании использовались следующие функциональные критерии:

1. Среднеквадратическое отклонение от линейной (полулунной, фестончатой) траектории – величина отклонения в каждой точке от её проекции на среднюю линию.
2. Погрешность величины воздушного зазора между наконечником лазера и обрабатываемой биологической тканью.
3. Погрешность средней скорости движения медицинского инструмента.
4. Среднеквадратическое отклонение от средней скорости движения медицинского инструмента.

Экспериментальное тестирование работы МХК на фантоме челюсти показало, что показатели робота-хирурга существенно выше мануальных возможностей врача на лазерных операциях. Проведенные эксперименты доказали, что точность поддержания роботом заданной величины воздушного зазора между наконечником лазера и биологической тканью лучше в 7 раз и стабильность скорости движения лазера – в 4 раза. Погрешность отклонения от заданной траектории роботом превышает мануальные показатели в 3-4 раза (в зависимости от вида траектории).

Перспективным направлением для развития коллаборативной робототехники являются технологии роботического биопринтинга. Основу технологии биопринтинга составляет 3D печать, т.е. послойное создание физического объекта на базе виртуальной трехмерной модели. В качестве физического объекта в биопринтинге выступают живые органы или отдельные их элементы, которые впоследствии пересаживаются пациенту [6-8]. Применение роботических и мехатронных технологий в биопринтинге позволяет не только улучшить качество печати и разрешающую способность биоприинтера, дает возможность печатать органы с более сложной структурой, но и позволяет перейти к качественно новому этапу развития регенеративной медицины, т.е. биопечати *in vivo* и *in situ*. Актуальная научная проблематика в области роботического биопринтинга заключается в создании нового вида роботических систем и робото-медицинских технологий для принципиально новых задач биофабрикации на базе аддитивных роботических технологий послойного синтеза как совокупности органических и неорганических слоев. Роботические системы нового поколения отличает повышенная безопасность пациента благодаря использованию оригинального CAD/CAM программного обеспечения, 3D-визуализации операционной зоны, силовых и интегральных сенсоров; применению новых методов и измерительно-информационных устройств роботов.

На рис.2 представлен экспериментальный стенд роботической биопечати эмали *in situ* для замены поврежденных или утраченных в результате болезни или травмы участков эмали. Разработка выполнена специалистами МГТУ СТАНКИН, Московского государственного медико-стоматологического университета им. А.И. Евдокимова и компании 3D Bioprinting Solutions.



Рисунок 2 – Экспериментальный стенд роботической биопечати эмали *in situ*

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения государственного задания (задание № 9.3408.2017/4.6).

1. Буйнов М.А., Воротников А.А., Климов Д.Д., Малышев И.Ю., Миронов В.А., Парфенов В.А., Перейра Д.А.С., Подураев Ю.В., Хесуани Ю.Д. Роботические технологии в медицине и биопринтинге: состояние проблемы и современные тенденции // Вестник МГТУ «Станкин» № 1 (40), 2017
2. <https://www.youtube.com/watch?v=a2SdbM4qWkU&feature=youtu.be>
3. Колонтарев К.Б., Пушкарь Д.Ю., Говоров А.В., Шептунов С.А. История развития роботических технологий в медицине // Известия ВУЗов. Поволжский регион. Медицинские науки. 2014. № 4 (32). С. 125—140.
4. Базикян Э.А., Чунихин А.А. Малоинвазивные лазерные технологии на основе роботизированных мультифункциональных комплексов в челюстно-лицевой хирургии и стоматологии // Российский стоматологический журнал - 2016. – Т. 20 (№5) - С. 228-231
5. Чунихин А.А., Саакян М.Ю., Гажва С.И., Базикян Э.А. Разработка наносекундного лазерного модуля, встраиваемого в роботизированный многофункциональный хирургический комплекс для малоинвазивной терапии патологии челюстно-лицевой области и определение эффектов его воздействия на плазму крови. // Современные технологии в медицине – 2016. – Т. 8 (№4). – С. 30-35
6. Mironov V., Kasyanov V., Markwald R. Organ printing: from bioprinter to organ biofabrication line. *Current Opinion in Biotechnology*. 2011. № 22. P. 667—673.
7. Manyi Wang, Jiankang He, Yaxiong Liu, Meng Li, Dichen Li1, Zhongmin Jin. The trend towards *in vivo* bioprinting. *International Journal of Bioprinting*. #1. 2015. Vol. 1. P. 15—26
8. Миронов В.А. Технология трехмерной биопечати. — Режим доступа: [http://umedp.ru/news/vladimir\\_aleksandrovich\\_mironov\\_tekhnologiya\\_trekhmernoj\\_biopec\\_hati.html](http://umedp.ru/news/vladimir_aleksandrovich_mironov_tekhnologiya_trekhmernoj_biopec_hati.html). Дата доступа 30.03.2017
9. Каган В.Г. 50, 40, 30, 20, 10 лет спустя (размышления после IMTS-2000 и РКМ-2). – М.: РАСХН. – 2003. – 76 с., ил.

**A EVACUATION OF A COSMONAUT IN A SPACESUIT DURING EXTRAVEHICULAR ACTIVITY ON THE LUNAR SURFACE WITH ASSISTANCE OF RESCUE ROBOTS**

<sup>1</sup> SPIIRAS, St. Petersburg, Russia.

Email: [anna.gunchenko@gmail.com](mailto:anna.gunchenko@gmail.com) ; [ronzhin@ias.spb.su](mailto:ronzhin@ias.spb.su)

<sup>2</sup> Gagarin Research&Test Cosmonaut Training Center, Star City, Moscow region, Russia.

Email: [a.altunin@gctc.ru](mailto:a.altunin@gctc.ru) ; [b.kryuchkov@gctc.ru](mailto:b.kryuchkov@gctc.ru) ; [v.usov@gctc.ru](mailto:v.usov@gctc.ru)

**Abstract**

In future manned missions, an interest in the use of Autonomous Mobile Robots (AMR) on the surface of planets for a variety of applications, in which a human interacts with a robot in a remote mode, may heighten. AMR have a great potential to reduce the risk of emergencies in human spaceflight and to provide the necessary assistance to a crew during extravehicular activity (EVA) on the moon's surface if the efficiency of a suited cosmonaut worsens.

The decision on the need for emergency medical care, rescue and evacuation for this injured person should be accepted by a healthy capable of working partner, who also performs EVA on the lunar surface, or by one, who stays in the Lunar Lander. The same person should actually lead and control the EVA, involving all available means, including assist of AMR.

The paper attempts to apply the experience of the use of rescue robots in extreme conditions on Earth and on the ISS during EVA for the use of rescue robots during EVA on the lunar surface.

Keywords: Autonomous Mobile Robots (AMR) on the planet surface, extreme environments, extravehicular activity (EVA), space suit, medical emergency, robot-assisted evacuation, rescues robots.

**Introduction**

The problem of rescue of a person in conditions of emergency situations and on battlefield has stimulated the interest in the use of rescue robots and Integrated Medical Systems (such as a robotized platform "Life Support for Trauma and Transport (LSTAT)" to maintain vital functions at the medical evacuation stages as well as of the remote-controlled robotic systems (RTS) for timely diagnosing, medical evacuation and emergency medical care.

Today, in technologically advanced countries there are a number of scientific and technical projects to create RTSs in various fields of medicine, however, additional efforts are needed for their practical introduction in the extreme environment, in particular, for the rescue of persons of hazardous occupations, which are most at risk when performing their professional activities. Emergency and abnormal situations that can lead to the near-accident or actual emergency in such areas as aviation, aerospace, undersea testing, diving operations, etc., evoke a wide public response and may be accompanied by the loss of highly skilled professionals, the training of whose lasts for years, whose experience is invaluable, and this loss cannot usually be compensated in a short time.

This means the need to develop new approaches to the organization and technical support of works on rescuing and evacuating persons of hazardous occupations in extreme environment.

The use of an Autonomous Mobile Robot (AMR) that is designed for the extravehicular activity (EVA) on lunar surface and is able to run in offline navigation mode in a complex environment within a certain condition range is a topical problem for the development of long-term lunar exploration programs.

In addition, AMR has to interact with cosmonauts on the lunar surface in the "Follow Me" (master/Slave) mode to ensure the implementation of some assistive functions. They may include the transfer of cargo and tools, support of the communication and interaction between the participants of EVA. The complicated remote interaction between cosmonauts and AMR in the course of EVA and the feedback needed for a cosmonaut - operator to know environmental conditions require the development of information support using modern information technologies [1-2].

Even greater difficulties are connected with the problem of rescue and evacuation of a suited cosmonaut during EVA into the Lunar Lander in case of failing the spacesuit's life support system and/or the loss of performance by a cosmonaut.

**The current status and prospects for using rescue robots in the field of extreme medicine to rescue and evacuate persons of dangerous professions**

*The experience in the construction and application of rescue robots in the terrestrial environment*

Today there is some experience in designing robots to perform rescue operations, and the volume of publications on this topic continues growing. The analysis shows that the basic approaches and solutions in using rescue robots in "natural conditions" are not homogeneous for some reasons. To a large extent, these decisions are dictated by application conditions: landscape features, soil composition, the possibilities of using various means of navigation and positioning, communications, length of routes between the evacuation stages, etc. In our opinion, when selecting the ways of creating and using robots to rescue persons of hazardous occupations, it is necessary to begin with defining the specific risks and threats that derive directly from the nature of tasks. Rescue robots designed to be used in disaster zones are systematized in [3] on basis of mass contingent, evacuation of which requires additional resources.

When designing the rescue robots, the efforts are mainly concentrated in the following areas:

1) Creation of RTSs that will be used on the first stage of elimination of consequences of emergency situations, namely: general exploration/assessment of the situation in the affected area, clearing away blockages, making paths and routes for other robots and rescuers (project ICARUS) [7];

2) Creation of RTSs operating on the second stage of elimination of consequences of emergency situations.

On this stage, the following types of special-purpose robots are required:

- Robots designed to get inside hard-to-reach areas through manholes and passageways;
- Robots designed to open the locked doors and to move on the fire ladders to perform urgent emergency works (CHIMP project [4]);
- Robots, designed to give first aid and transport the casualties to a safe place (BEAR project) [12].

A great attention is given to robots remotely controlled by a group of experts-operators as well as to robots, which are able to reproduce finely coordinated actions, involving operations with chemical, biological and radiological analysis of samples directly at the emergency area when providing medical assistance to casualties (project HUBO) [14].

It's safe to say that the human factor when designing the interaction between humans and robots during rescue and evacuation operations will continue to play an increasingly important role. On this basis we can distinguish the robots that will operate independently without direct human intervention (project ATLAS) [5]. In this case, a Human Operator (HO) will only perform the expert and advisory functions at the request of the robot, which obviously needs to have highly developed sensory functions options and be capable to adapt to the challenging work environment.

When choosing the method, means and provisions for the evacuation of a casualty, the primary focus will be on the injury type, its localization, human condition, and lesion character. An optimal position of the casualty during transportation is of special importance. Data on the model of defining the position of a casualty during transportation with a glance to/taking into account the character of an injury and general condition of a casualty are systematized in [8].

As far as the design and functionality of a robot are concerned, the analysis given in [4-7, 9, 11, 12, 14] and numerous electronic publications shows several successful and tried constructions promising for the use on the surface of a planet. First worthy of mention is robot named BEAR (*eng.*: Battlefield Extraction-Assist Robot). The BEAR is an assistive robotic system designed for evacuation [12]. Today, the developers want to improve the BEAR's navigation system and its abilities to process the high level commands and to adapt to environment conditions [11].

It is possible that a useful addition to the BEAR may become a snake-like robot manipulator designed to support medical personnel during a remote visual examination of the wounded directly on the battlefield, which was represented by researchers from the American University Carnegie Mellon [16]. The control of such "kinematically redundant manipulator" is realized remotely with the help of a joystick. This robotic device comprises of a plurality of joints, so it can bend in different directions to perform different operations.

There are known technical solutions for the inclusion of such manipulator as a part of robotic platform "Life Support for Trauma and Transport" – LSTAT.

A robot, named "Robocue" and made by Kikuchi Manufacturing (Japan), is similar in design and purpose to the above-described robot BEAR.

In addition to the above variants of mobile crawler-mounted robots, there is a great interest in creating anthropomorphic models designed on different principles of movement, including bipedal walking robots (foreign CHIMP, HUBO, Atlas and domestic SAR-401).

Among various existing robotic systems, mobile robots hold a specific place. The wide range of their functions and permanent readiness for the long use make them useful for emergency response services.

Summing up the above said, it may be noted that today there are prototypes of mobile robotic systems to develop a rescue robot for the transportation of a suited cosmonaut during EVA into the Lunar Lander in case

of an emergency during EVA. At the same time, the differences between the Earth's and lunar environment conditions should be taken into account as this fact brings new risks for human health and life. In addition, the high complexity of EVA operations requires special safety measures and special organization of communication between participants EVA. Some of these issues will be addressed in the following subsection.

*Experience in training cosmonauts for performing rescue operations on the evacuation of the suffered cosmonaut in a spacesuit during EVA*

EVA is one of the most important types of flight operations. It requires well-coordinated work of the crew, strict fulfilling the safety requirements, skills in rescue operations and emergency evacuation. When developing new proposals on the variants of performing EVA, in particular, on the lunar surface it is necessary to take into account the long experience of training cosmonauts for work in a spacesuit, surviving in different climatic and geographical zones, and delivering emergency medical aid aboard space vehicles as well as the experience of performing EVA aboard orbital stations. When planning EVA on the ISS, the great attention is paid to meeting the time limit requirements, associated with the need to ensure the return of a cosmonaut unable to work into the airlock of a space vehicle. Technical characteristics of existing spacesuits provide for a certain time reserve (up to half an hour), during which a cosmonaut will have a sufficient amount of the gas mixture for respiration in case of failure of the life support system of a spacesuit. However, this does not remove the problem, especially if there is even an insignificant integrity damage of the spacesuit, or if a cosmonaut loses consciousness by other reasons.

All cosmonauts should mandatory pass training for transportation of a person unable to work. The training for these operations is conducted in the hydro lab and on the dedicated simulator "Vykhod-2". This kind of training is aimed at the formation of sustainable skills of the safe transportation of an injured cosmonaut along the outer surface of the station towards the airlock under the continuous monitoring of operating parameters of spacesuits. This case introduces the concept "off-nominal situation" (hereinafter – ONS). It can occur in case of malfunctioning the spacesuit's systems, what renders impossible to continue EVA operations or if a crew member, performing EVA, feels unwell.

In conclusion, it should be noted that not all peculiarities, identified during EVA operations on the ISS, can be adapted to the same operations on the lunar surface.

The restricted flexibility of hands of a human inside a spacesuit and narrow field of view of a helmet complicate also the work of cosmonauts on the ISS. However, the spacesuits are designed so that cosmonauts can clearly see the work area within reach of hands, and the field of view through the helmet window allows maintaining spatial orientation. There is a reason to say that the restricted flexibility and narrow field of view of a man in a spacesuit can become more serious interfering factors for EVA on the lunar surface, especially in terms of spatial orientation and navigation. However, the reduced gravity will partly compensate the hardship of travelling across the moon surface due to the features of its soil.

*Prospects for the use of rescue robots in lunar missions: opportunities and principles of their use on the lunar surface during EVA*

The transportation of a casualty towards the Lunar Lander during EVA on the lunar surface is of great importance for a human survive.

In this case, the crew will need the assistance of robotic devices with the reserve of oxygen for the life support system (LSS). Such devices designed to transport casualties can be both special purposed and versatile. Universal mobile devices are preferred since they will allow tackling the main tasks of lunar exploration, whereas the transportation of casualties may be considered as an additional function.

Ergonomic testing of the versatile on-planet rover for transportation of a casualty was conducted by NASA during NASA Analog Mission (NEEMO) [10].

When developing the requirements for the ways of evacuation of a suited cosmonaut from the lunar surface, it is useful to consider the practice of ensuring the safety upon landing of the Descent Module (DM). Evacuation of cosmonauts after landing is a complex operation, getting involved considerable forces and means of the specialized units. This phase is also important in medical aspects. Changes in a human body under the impact of spaceflight conditions may negatively influence the health and psycho-physiological capabilities of cosmonauts what is of special importance when it is required to survive after landing independently. The problem is most acute for off-nominal and emergency landings (splashdown) outside the planned landing site, in hard-to-reach areas, far from settlements. Thus, in order to keep the vitality of a human till the end of evacuation it is required to ensure the relevant transportation means and appropriate equipment for rescue robots.

To select potentially suitable solutions to adapt existing land-based RTSs to the conditions of human exploration of the Moon it is necessary to turn attention to the following important characteristics:

- 1) The weight and size of the robotic device, load capacity, resistance to overturning when carrying loads

comparable in mass with the mass of the robot.

2) Capacity to travel across rough terrain with various densities of soil, to overcome natural and artificial obstacles, maneuverability.

3) Capability to grasp and hold objects of various shapes and hardness. The way of capturing a human body for putting it on the loading platform or transporting in robot's arms.

4) Capability to navigate and position in lunar environment, to use electronic maps, and to execute commands received from a human operator.

5) Capability to track the moving objects, estimate the distances, recognize the landmarks and characteristic objects using computer vision.

6) Possibilities of providing the interaction between a man and a robot, use of multimodal interfaces for remote robot control, contactless control using virtual reality technologies, creation of an expanded and improved visual feedback.

7) Capability to perform fine manipulations in a copy mode and follow a cosmonaut when moving "in tandem" in a master-slave mode.

### **Conclusion**

The paper gives the general representation of the interaction between humans and robots, which can improve organizational arrangements on the rescue and evacuation of a suited cosmonaut on the lunar surface.

1) The first conclusion is that it is necessary to choose such forms of interaction in a mixed team of cosmonauts and robots that allow avoiding collisions and making various management decisions due communication disturbance.

2) The second conclusion follows from existing robotic technologies of supporting medical actions during ground rescue operations, and consists in the fact that already accumulated great experience in designing evacuation means, intended to be used in the field, allow adapting them to analogous rescue operations on the moon.

3) The third conclusion is based on extensive experience of cosmonaut professional training for the rescue and transportation of a suited cosmonaut by own forces taking into account the time constraints owing to limited resources of breathing gas in the life support system. Proven techniques of surviving in extreme environment (simulated on the ground) and established safety provisions should be taken into account for developing algorithms of executing rescue operations with assistance of remotely-controlled robot. Experience in information provision of such training should be creatively converted when developing the data ware system for a cosmonaut-operator, who monitors EVA operations on the lunar surface given significantly limited backing from Earth.

4) The fourth conclusion stems from the specifics of staying cosmonauts in the extreme environment on the lunar surface, when a malfunction of the spacesuit systems and/or damage of a spacesuit create extremely unfavorable conditions for the survival of man. This means of the needs of finding solutions on equipping the rescue robots with standby facilities to replace damaged systems of the spacesuit as well as with telemetry data processing means in the event of a failure of communication between a cosmonaut performing EVA and a cosmonaut – operator in the Lunar Lander. These solutions help to quicken making a decision by a cosmonaut - operator on putting at ready state the medical-technical means of emergency aid aboard the Lunar Lander.

5) The fifth conclusion is based on the experience of modern telemedicine, which testifies the ample opportunities of information support for making medical decisions aboard space vehicles under limited support from the ground mission control center upon conditions of designing appropriate assistive technologies and training personnel for actions in special situations in flight.

1. Kryuchkov B.I., Usov V.M., Karpov A.A. An Ontological approach to build interactive virtual environments for the visual representation of the planned action, when control of a cosmonaut's robot assistant on the ISS in dialog interaction // Proceedings of the VI Intern. scientific.-tech. Conf. "Open semantic technology of intelligent systems" (OSTIS-2016). Minsk: BSUIR. 2016. pp. 477–482. (In Russian).
2. Kryuchkov B.I., Mikhailuk M.V., Usov V.M. Information Technology for ergonomic system "Cosmonaut – Manipulation robot - Working environment" design // Materials of conference "Management in the marine and aerospace systems" (BUTTER-2014). SPb.: JSC "Concern "CRI "Electropribor". 2014. pp. 367–377. (In Russian).
3. Motienko A.I., Ronzhin A.L., Pavlyuk N.A. The modern development of rescue robots, opportunities and principles of their application // Scientific Bulletin of NSTU. 2015. vol. 60. no. 3. pp. 147–165. (In Russian).

4. Haynes G.C. et al. Developing a Robust Disaster Response Robot: CHIMP and the Robotics Challenge // Journal of Field Robotics. 2017. vol. 34. no. 2. pp. 281–304.
5. Kuindersma S. et al. Optimization-based locomotion planning, estimation, and control design for the Atlas humanoid robot // Autonomous Robots. 2016. vol. 40. no. 3. pp. 429–455.
6. Liu J., Zhang X., Hao G. Survey on research and development of reconfigurable modular robots // Advances in Mechanical Engineering. 2016. vol. 8. no. 8. pp. 1687814016659597.
7. Marques M. M. et al. Use of multi-domain robots in search and rescue operations—Contributions of the ICARUS team to the euRathlon 2015 challenge // OCEANS 2016-Shanghai. IEEE. 2016. pp. 1–7.
8. Motienko A.I., Ronzhin A.L., Basov O.O., Zelezny M. Modeling of Injured Position During Transportation Based on Bayesian Belief Networks // Proceedings of the First International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (ITI’16). 2016. pp. 81–88.
9. Murphy R.R. et al. Search and rescue robotics // Springer Handbook of Robotics. 2008. pp. 1151–1173.
10. NASA Analog Mission (NEEMO). URL: <http://www.lpi.usra.edu/lunar/strategies/NASA-Analog-Missions-NP-2011-06-395.pdf> (accessed: 02.05.2017).
11. Theobald D., Allen T. Apparatus with hydraulic power module. U.S. Patent No. 9387895. 2016. URL: <https://www.google.com/patents/US9387895> (accessed: 21.02.2017).
12. Theobald D. Mobile reconfigurable robot. U.S. Patent No. 8106616. 2012. URL: <http://www.google.com/patents/US8106616> (accessed: 21.02.2017).
13. Walker I.D., Choset H., Chirikjian G.S. Snake-Like and Continuum Robots // Springer Handbook of Robotics. 2016. pp. 481–498.
14. Zhang Y. et al. Motion planning and control of ladder climbing on DRC-Hubo for DARPA Robotics Challenge // IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2014). 2014. pp. 2086.
15. Zucker M. et al. A General-purpose System for Teleoperation of the DRC-HUBO Humanoid Robot // Journal of Field Robotics. 2015. vol. 32. no. 3. pp. 336–351.

*А.И. Мотиенко<sup>1</sup>, А.Л. Ронжин<sup>1</sup>, А.А. Алтунин<sup>2</sup>, Б.И. Крючков<sup>2</sup>, В.М. Усов<sup>2</sup>*

### **ЭВАКУАЦИЯ КОСМОНАВТА В СКАФАНДРЕ ВО ВРЕМЯ ВНЕКОРАБЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА ПОВЕРХНОСТИ ЛУНЫ С УЧАСТИЕМ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ РОБОТОВ**

<sup>1</sup> СПИИРАН, Санкт-Петербург, Россия.

*Email: anna.gunchenko@gmail.com ; ronzhin@iias.spb.su*

<sup>2</sup> НИИ ЦПК имени Ю.А.Гагарина, Звездный городок Моск. обл.Россия.

*Email: a.altunin@gctc.ru ; b.kryuchkov@gctc.ru ; v.usov@gctc.ru*

#### **Аннотация**

В будущих пилотируемых полетах может возрасти интерес к использованию автономных мобильных роботов (АМР) на поверхности планет для различных приложений, в которых человек будет взаимодействовать с роботом в дистанционном режиме. АМР имеют большой потенциал для того, чтобы уменьшить риск нештатной ситуации в пилотируемых полетах и предоставить необходимую помощь экипажу при внекорабельной деятельности (ВКД) на поверхности Луны, когда возникает нарушение состояния работоспособности космонавта в скафандре. Решение о необходимости неотложной медицинской помощи, спасении и эвакуации этого члена экипажа может принять работоспособный космонавт – напарник, выполняющий задачи ВКД или работающий в лунном аппарате. Он же должен фактически руководить операцией с привлечением имеющихся средств, в том числе АМР. В работе делается попытка распространить опыт применения аварийно-спасательных роботов в экстремальных условиях на Земле и опыт ВКД на МКС на ситуацию применения робота-спасателя во время ВКД на лунной поверхности.

Ключевые слова: мобильные роботы на поверхности планет, экстремальная среда, внекорабельная деятельность на Луне, космический скафандр, неотложная медицинская помощь, спасение и эвакуация, робот-спасатель.

#### **Введение**

Проблемы спасения человека в условиях чрезвычайных ситуаций (ЧС) и на поле боя стимулировали интерес к применению беспилотных роботов-спасателей и роботизированных транспортных платформ (с «системой жизнеобеспечения и транспортировки) для поддержания

жизненно важных функций на этапах медицинской эвакуации, а также дистанционно управляемых роботизированных систем (РТС) для своевременной диагностики и выполнения манипуляций в объеме неотложной медицинской помощи. Сегодня в технологически развитых странах мира существует ряд научно-технических проектов и перспективных программ создания РТС в различных областях медицины, однако, необходимы дополнительные усилия для практического внедрения РТС в условиях экстремальной среды для спасения лиц опасных профессий, которые подвергаются наибольшему риску при выполнении своей профессиональной деятельности. Непредвиденные и нештатные ситуации, которые приводят к предпосылкам или к самим чрезвычайным ситуациям в таких областях как авиация, космонавтика, морские подводные испытания и др. – вызывают большой негативный общественный резонанс, а потери высококлассных специалистов, профессиональная подготовка которых длится годами, а опыт – бесценен, часто не могут быть компенсированы в сжатые сроки. Из этого следует необходимость разработки новых подходов к организации и техническому обеспечению работ по спасению и эвакуации лиц опасных профессий в экстремальной среде.

Для перспективных программ освоения Луны актуален вопрос использования при ВКД мобильного робота, который способен в пределах определенного диапазона условий к выполнению в автономном режиме навигации в сложной обстановке. Кроме того, АМР может взаимодействовать с космонавтом на поверхности Луны в режиме "Следуй за Мной" (Ведущий/Ведомый), чтобы обеспечить выполнение некоторых ассистивных функций. В их число может входить перенос груза и инструментов, а также поддержка коммуникаций между участниками ВКД. Сложность дистанционного взаимодействия участников ВКД с АМР и построения обратной связи для космонавта-диспетчера о состоянии окружающей среды требует разработки средств информационного обеспечения с применением ряда современных информационных технологий [1-2]. Еще большие трудности связаны с проблемой спасения и эвакуации космонавта в скафандре с поверхности в лунный аппарат в случае отказа системы жизнеобеспечения скафандра и/или потери работоспособности космонавта

### **Современное состояние и перспективы применения роботов-спасателей в области экстремальной медицины для спасения и эвакуации лиц опасных профессий**

#### *Опыт построения и применения аварийно-спасательных роботов в наземных условиях*

Сегодня имеется определенный опыт создания роботов для выполнения аварийно-спасательных работ, и объем публикаций на эту тему продолжает расти. Анализ показывает, что базовые подходы и решения в области наземного применения роботов-спасателей «в натуральных условиях» по ряду причин не однородны. Во многом эти решения диктуются условиями применения: характером рельефа, составом почвы, возможностями использования различных средств позиционирования и навигации, связью, протяженностью маршрутов между этапами эвакуации и др. На наш взгляд, при выборе путей создания и применения роботов для спасения лиц опасных профессий надо начинать с конкретизации тех рисков и угроз, которые непосредственно вытекают из характера решаемых задач. В работе [3] систематизированы спасательные роботы в зонах ЧС, исходя из состава массового контингента, для которого необходимо изыскивать дополнительные ресурсы при проведении эвакуационных мероприятий. В области создания аварийно-спасательных роботов усилия в основном концентрируются в следующих направлениях:

1) создания дистанционно управляемых роботов, ориентированных на работу в первой стадии ликвидации последствий ЧС, то есть на общую разведку/оценку обстановки на месте ЧС, расчистку завалов, прокладку проходов и трасс для других роботов и людей-спасателей (проект ICARUS) [7];

2) создания дистанционно управляемых роботов, действующих на второй стадии ликвидации последствий ЧС.

На этой стадии необходимы следующие классы специализированных роботов:

- роботы, ориентированные на проникновение в труднодоступные помещения через лазы и проходы;

- роботы, способные открывать двери, закрытые на замки, и передвигаться по пожарным лестницам для проведения срочных аварийных работ (проект SHIMP [4]);

- специализированные роботы для оказания первой помощи и транспортировки пораженных в безопасное место (проект BEAR) [12].

Большое внимание уделяется дистанционно управляемым роботам группой специалистов-операторов, а также роботам, способным воспроизводить тонко координированные действия, связанные с химическим, биологическим и радиационным анализом образцов на месте катастрофы и оказанием медицинской помощи пораженным (проект HUBO) [14].

Можно с уверенностью говорить о том, что фактор проектирования взаимодействия людей и роботов при проведении операций спасения и эвакуации в дальнейшем будет играть все более значимую роль. По этому признаку можно выделить роботов, ориентированных в перспективе на полностью автономные действия без прямого участия человека (проект ATLAS) в месте дислокации робота [5]. Человек-оператор (ЧО) в этом случае может лишь выполнять экспертно-консультативные функции по запросу робота, который, очевидно, должен иметь высокоразвитые функции сенсорики и адаптации к сложной рабочей среде.

При выборе способа, средств и положений, в которых будут транспортироваться пораженные, ведущую роль играют виды травм, их локализация, состояние человека, характер поражения. Важным элементом транспортировки является выбор оптимальной позы пораженного. В работе [8] систематизированы данные о модели определения позы пораженного при транспортировке с учетом характера полученных травм и его общего состояния.

Если обратиться к выбору конструкции и функциональности робота, перспективного для планетарного применения, то по результатам проведенного в работах [4-7, 9, 11, 12, 14] анализа, а также многочисленных электронных публикаций, обращает на себя внимание несколько удачных и апробированных на практике конструкций. В первую очередь, заслуживает упоминания ассистивная робототехническая система для эвакуации (в русскоязычной литературе: робот-санитар) BEAR (англ.: Battlefield Extraction-Assist Robot) [12]. В планах разработчиков улучшение способности BEAR обрабатывать высокоуровневые команды, улучшение его навигационной системы и его способности адаптации к окружающей среде [11]. Возможно, полезным дополнением к этому роботу мог бы стать змеевидный робот-диагностический манипулятор, который исследователи из американского университета Карнеги-Меллон разработали для помощи медицинскому персоналу в ходе визуального дистанционного обследования раненого непосредственно на поле боя [13]. Управление таким «кинематически избыточным манипулятором» производится дистанционно, с помощью джойстика. Устройство включает множество шарниров, и может изгибаться в разных направлениях для выполнения различных медицинских операций. Известны технические решения по включению такого манипулятора в состав роботизированных носилок (платформы) «обеспечение жизненно важных функций при травме для транспортировки» (англ.: Life Support for Trauma and Transport – LSTAT).

К описанному выше роботу BEAR близок по конструкции и назначению Robosue – робот, разработанный фирмой Kikuchi Manufacturing (Япония). Кроме выше приведенных вариантов мобильных роботов на гусеничном ходу, необходимо отметить большой интерес к созданию антропоморфных моделей, построенных на различных принципах передвижения, включая двуногую ходьбу (зарубежные роботы SHIMP, HUBO, Atlas и отечественного робота SAR-401).

Среди множества современных робототехнических средств особое место занимают мобильные роботы. Широкий спектр их функциональных возможностей, постоянная готовность к применению делают их привлекательными для служб экстренного реагирования.

Резюмируя сказанное можно констатировать, что сегодня существуют прототипы РТС для разработки робота-спасателя применительно к эвакуации на поверхности Луны космонавтов в скафандре в лунный аппарат в случае нештатной ВКД. Одновременно надо принимать во внимание существующие отличия земных условий и условий на поверхности Луны, так как для человека эта необычная среда обитания несёт новые риски для жизни и здоровья. Кроме того, высокая сложность ВКД требует особых мер безопасности и специальной организации коммуникации участников ВКД. Частично эти вопросы будут освещены в следующем подразделе.

*Опыт подготовки космонавтов к проведению спасательных работ в ходе ВКД с эвакуацией пострадавшего космонавта в скафандре*

ВКД относится к одному из самых ответственных видов полётных операций. Она требует слаженной работы экипажа, строгого выполнения требований безопасности работ, навыков выполнения спасательных работ и экстренной эвакуации. При разработке новых предложений к вариантам реализации ВКД, в частности, на лунной поверхности необходимо учитывать многолетний опыт подготовки космонавтов к работе в скафандре, к выживанию в разных климатогеографических зонах, к выполнению неотложных медицинских мероприятий на борту космического аппарата и, наконец, опыт ВКД на орбитальных станциях. При планировании ВКД на МКС большое внимание уделяется соблюдению требований по временным ограничениям, связанным с необходимостью обеспечения возвращения неработоспособного оператора (НРО) в шлюзовую отсек. Если ориентироваться на технические характеристики современных космических скафандров, то для космонавта предусмотрен определенный резерв времени (до получаса), в течение которого он будет иметь достаточный объем

газовой смеси для дыхания. Однако это не снимает остроту проблемы, особенно в аспектах возможного нарушения герметичности скафандра, даже при незначительной величине утечки газа, и потери сознания по ряду других возможных причин.

Операция по транспортировке НРО является обязательной для отработки всеми космонавтами, при прохождении курса профессиональной подготовки. Подготовка по данной операции проводится в гидролаборатории и на специализированном тренажёре «Выход-2». Она направлена на формирование у ЧО устойчивых навыков по безопасному перемещению НРО по внешней поверхности станции в шлюзовой отсек российского сегмента МКС, с постоянным контролем за рабочими параметрами скафандров (СК). Для этого случая вводится понятие «нештатная ситуация (далее – НшС)», которая может возникнуть при неисправности систем СК, не позволяющих далее выполнять задачи ВКД, и при ухудшении самочувствия ЧО из экипажа «Выхода».

В заключение подраздела можно отметить, что не все выявленные в ходе ВКД на МКС особенности могут быть перенесены в вариант ВКД на поверхности Луны.

Ограниченность движений рук в скафандре, ограниченная зона обзора из шлема современного скафандра вносят дополнительные трудности и при работе на МКС, но скафандр спроектирован таким образом, что космонавт хорошо видит рабочую зону в пределах досягаемости рук, а обзор наблюдаемого через остекление шлема пространства позволяет вести пространственную ориентировку. Есть основания говорить о том, что ограничения подвижности и обзора в скафандре могут стать более серьёзным помеховым фактором для ВКД на лунной поверхности, особенно в плане ведения пространственной ориентировки и навигации. Уменьшенная гравитация будет отчасти компенсировать трудности передвижения по поверхности из-за характера лунной почвы.

*Перспективы применения аварийно-спасательных роботов для миссий на Луне: возможности и принципы их применения на лунной поверхности в ходе ВнеКД*

При проведении «выходов» на поверхность Луны операции по транспортировке неработоспособного оператора (НРО) не теряют своей актуальности и будут связаны с необходимостью перемещения НРО по поверхности планеты к шлюзовому отсеку. В данном случае потребуется помощь роботизированных устройств с запасами для системы обеспечения жизнедеятельности (СОЖ). Такие устройства могут быть как специального назначения, так и универсальные, спроектированные для транспортировки НРО. Универсальные устройства предпочтительнее, так как их использование позволит решать основные задачи по исследованию планеты, а задачи по транспортировке НРО в данном случае будут дополнительными.

Эргономические исследования по использованию универсального напланетного ровера для транспортировки НРО были проведены NASA в процессе выполнения программы NEEMO [10].

При разработке требований к способам эвакуации космонавта в скафандре с лунной поверхности полезно обратиться к практике обеспечения безопасности при приземлении спускаемого аппарата (СА). Эвакуация космонавтов после приземления СА представляет собой сложную операцию, к выполнению которой привлекаются значительные силы и средства специализированных подразделений. Этот этап является ответственным и в медицинских аспектах. Комплекс послеполетных изменений в организме человека может отрицательно сказаться на работоспособности и психофизиологических возможностях космонавтов при необходимости самостоятельно (автономно) выживать после приземления. Наиболее остро эта проблема может проявиться в случаях нештатных и аварийных посадок (приводнений) СА вне расчетных районов, приземления в труднодоступных местах, вдали от населённых пунктов. Тем более важно так построить эвакуацию и в таком объеме предусмотреть оснащение робота-спасателя, чтобы обеспечить сохранность витальных функций организма до момента завершения транспортировки.

Необходимо отбирать потенциально пригодные решения для адаптации существующих наземных РТС к условиям освоения человеком Луны по следующим отличительным признакам:

1) Массогабаритные характеристики, грузоподъемность, устойчивость к опрокидыванию при переносе грузов, сопоставимых по массе с массой робота.

2) Возможности передвижения по пересеченной местности и различным по плотности почвам, возможности маневра, возможности преодоления естественных и искусственных препятствий.

3) Возможности захвата и удержания предметов различной формы, жесткости. Способ захвата тела человека и погрузки на платформу робота или перенос «на руках» робота.

4) Возможности позиционирования и навигации в условиях освоения Луны, использования электронных карт и дистанционно задаваемых команд на виды маневров от человека-оператора.

5) Возможности трекинга подвижных объектов, определения расстояний, распознавания ориентиров и характерных объектов с помощью компьютерного зрения робота.

6) Возможности организации человеко-машинного взаимодействия, применения многомодальных интерфейсов для дистанционного управления роботом, возможности бесконтактных видов управления с применением технологий виртуальной реальности, возможности построения расширенной и улучшенной визуальной обратной связи.

7) Возможность выполнения тонких манипуляций в копирующем режиме и копирующего режима следования за человеком при перемещении «в паре».

### **Заключение**

В данной статье представлены контуры возможного построения взаимодействия людей и роботов в составе команды, которые могут улучшить проведение мероприятий по организации спасения и эвакуации космонавта, работающего в скафандре на лунной поверхности.

Первый вывод заключается в том, что необходимо выбрать такие формы взаимодействия в смешанной команде космонавтов и роботов, которые позволяют избежать коллизий и принятия разнонаправленных управленческих решений по причине нарушения коммуникации.

Второй вывод вытекает из наличия технологий роботизированной поддержки медицинских мероприятий при проведении аварийно-спасательных работ на Земле, и состоит в том, что сегодня накоплен весомый опыт успешного построения эвакуационных средств для применения в полевых условиях, что позволяет адаптировать их в области пилотируемой космонавтики при освоении Луны.

Третий вывод базируется на обширном опыте профессиональной подготовки космонавтов к выполнению своими силами операций по спасению и доставки в шлюзовую камеру космического аппарата космонавта при условии его пребывания в скафандре и необходимости выполнения эвакуационных мероприятий в пределах лимита времени, определяемого запасами дыхательной смеси в системе обеспечения жизнедеятельности. Отработанные приемы при тренировках космонавтов на выживание в экстремальной среде (моделируемых на Земле) и меры обеспечения безопасности должны быть учтены при разработке алгоритмов выполнения операций спасения дистанционно-управляемым роботом. Опыт информационного обеспечения таких тренировок должен быть творчески переработан при построении системы информационного обеспечения космонавта -диспетчера ВКД на поверхности Луны с учетом существенного ограничения поддержки с Земли.

Четвертый вывод вытекает из особенностей пребывания космонавтов в экстремальной среде на лунной поверхности, когда нарушение функционирования систем скафандра и/или его повреждение создает исключительно неблагоприятные условия для выживания человека. Это означает необходимость поиска решений, позволяющих оснастить робот-спасатель средствами дублирования систем жизнеобеспечения для замещения этих средств в составе скафандра, а также средствами обработки телеметрической информации на случай сбоя коммуникации между космонавтом «на выходе» и космонавтом – диспетчером. Эти решения могут помочь ускорить принятие решений космонавтом – диспетчером относительно приведения в готовность медико-технических средств оказания неотложной медицинской помощи на борту лунного аппарата.

Пятый вывод базируется на опыте современной телемедицины, который свидетельствует о широких возможностях информационной поддержки принятия медицинских решений на борту космического аппарата в условиях сниженной поддержки с Земли при условии построения соответствующих ассистивных технологий и обучения персонала действиям в особых случаях полета.

1. Крючков Б.И., Усов В.М., Карпов А.А. Онтологический подход к построению интерактивной виртуальной среды для визуального представления планируемых действий при диалоговом управлении роботом-помощником космонавта на МКС // Материалы VI междунар. науч.-техн. конф. «Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем» (OSTIS-2016). Минск: БГУИР. 2016. С. 477–482.
2. Крючков Б.И., Михайлюк М.В., Усов В.М. Технологии моделирования для эргономического проектирования системы «космонавт – манипуляционный робот – рабочая среда» // Материалы конференции «Управление в морских и аэрокосмических системах» (УМАС-2014). СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». 2014. С. 367–377.
3. Мотиенко А.И., Ронжин А.Л., Павлюк Н.А. Современные разработки аварийно-спасательных роботов: возможности и принципы их применения // Научный вестник НГТУ. 2015. Том 60. № 3. С. 147–165.
4. Haynes G. C. et al. Developing a Robust Disaster Response Robot: CHIMP and the Robotics Challenge // Journal of Field Robotics. 2017. vol. 34. no. 2. pp. 281–304.

5. Kuindersma S. et al. Optimization-based locomotion planning, estimation, and control design for the Atlas humanoid robot // *Autonomous Robots*. 2016. vol. 40. no. 3. pp. 429–455.
6. Liu J., Zhang X., Hao G. Survey on research and development of reconfigurable modular robots // *Advances in Mechanical Engineering*. 2016. vol. 8. no. 8. pp. 1687814016659597.
7. Marques M. M. et al. Use of multi-domain robots in search and rescue operations—Contributions of the ICARUS team to the euRathlon 2015 challenge // *OCEANS 2016-Shanghai*. IEEE. 2016. pp. 1–7.
8. Motienko A.I., Ronzhin A.L., Basov O.O., Zelezny M. Modeling of Injured Position During Transportation Based on Bayesian Belief Networks // *Proceedings of the First International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (ITI’16)*. 2016. pp. 81–88.
9. Murphy R.R. et al. Search and rescue robotics // *Springer Handbook of Robotics*. 2008. pp. 1151–1173.
10. NASA Analog Mission (NEEMO). URL: <http://www.lpi.usra.edu/lunar/strategies/NASA-Analog-Missions-NP-2011-06-395.pdf> (дата обращения 02.05.2017).
11. Theobald D., Allen T. Apparatus with hydraulic power module. U.S. Patent No. 9387895. 2016. URL: <https://www.google.com/patents/US9387895> (дата обращения 21.02.2017).
12. Theobald D. Mobile reconfigurable robot. U.S. Patent No. 8106616. 2012. URL: <http://www.google.com/patents/US8106616> (дата обращения 21.02.2017).
13. Walker I.D., Choset H., Chirikjian G.S. Snake-Like and Continuum Robots // *Springer Handbook of Robotics*. 2016. pp. 481–498.
14. Zhang Y. et al. Motion planning and control of ladder climbing on DRC-Hubo for DARPA Robotics Challenge // *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2014)*. 2014. pp. 2086.
15. Zucker M. et al. A General-purpose System for Teleoperation of the DRC-HUBO Humanoid Robot // *Journal of Field Robotics*. 2015. vol. 32. no. 3. pp. 336–351.

***В.Л. Афонин***

### **РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ПЕРА ЛОПАТОК ГТД**

*ИМАШ РАН, г.Москва, afoninwl@rambler.ru*

Лопатки – самая массовая и ответственная деталь газотурбинных двигателей (ГТД). Газотурбинные авиадвигатели, газовые и паровые турбины, энергетические стационарные и передвижные установки, газоперекачивающие станции широко применяются в промышленности и на транспорте. Данное оборудование используется в военной и гражданской авиации, в судостроении в качестве корабельных газотурбинных установок, в энергетическом машиностроении, в газовой промышленности на газоперекачивающих установках.

От качества изготовления лопаток в решающей мере зависит эффективность работы ГТД, достижение стабильности эксплуатационных характеристик, долговечность и надежность. Так современный ГТД насчитывает до 3000 и более лопаток 20–30 типоразмеров, длиной от 12 до 1000 мм. Материалами для лопаток компрессоров служат трудно обрабатываемые жаропрочные, жаростойкие высоколегированные и титановые сплавы.

Изготовление лопаток (рис. 1) по трудоемкости составляет до 30% общей трудоемкости изготовления ГТД. В свою очередь, в общей трудоемкости изготовления лопаток большой объем (до 45%) занимают финишные ручные полировально-доводочные работы, которые требуют квалифицированных и высокооплачиваемых рабочих.

# Интеллектуальная технологическая операция

## Технологический процесс получения проточной части лопатки

### 1. Предварительные операции получения проточной части

- Механическая обработка
- Электрохимический способ
- Штамповка (вальцевание)
- Литье

### 2. Финишные операции

- Размерное шлифование
- Безразмерное полирование

### Особенности технологического процесса финишной обработки:

- Несоответствие допусков на различные параметры и участки пера лопатки
- Сложность сопряжения различных участков поверхности
- Не стационарность отдельных геометрических размеров

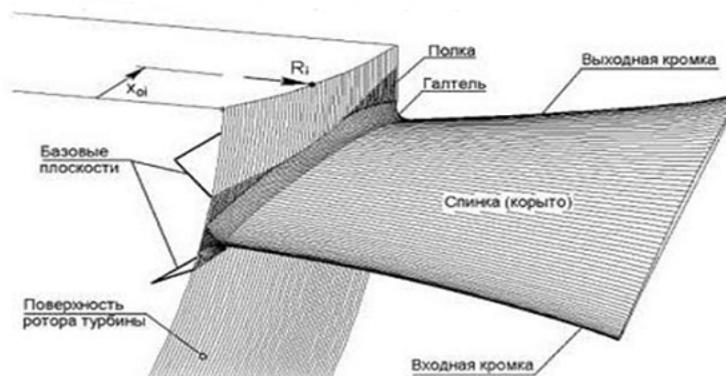
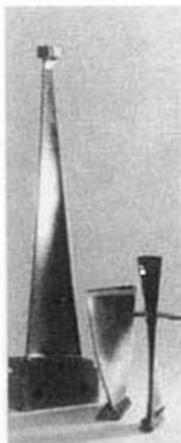


Рисунок 1 – Лопатка ГТД

Известные прогрессивные технологии, такие как круговая электрохимическая обработка, вальцевание, точная штамповка и др. не позволяет получить полностью готовую деталь, особенно на лопатках средних и крупных размеров (свыше 150 мм). Для получения готовой детали требуется выполнить финишные операции шлифование и полирование, которые включают либо полную обработку пера, либо отдельных участков пера: полков, кромок, прикомлевого участка. Трудоемкость данных операций достигает 30–40 минут в зависимости от габаритов лопаток.

После предварительных операций нельзя получить все участки пера лопаток с одним минимально возможным допуском. Так на угол закрутки из-за ажурности пера (особенно это относится к авиационным двигателям 5-го поколения) и его деформации после предварительной обработки назначается большой допуск. Одновременно входная и выходная кромки, усилительные полки требуется выполнять с высокой точностью (минимальный допуск).

*Изложенная выше, казалось бы, тривиальная проблема не позволяет выполнять финишные операции изготовления пера лопаток по одной жесткой программе. Для автоматизации данных операций требуется для каждой заготовки, поступающей на финишную операцию, измерить с высокой точностью геометрию сложной пространственной поверхности проточной части, определить качество поверхности, вписать в нее готовую деталь и для каждой детали назначить индивидуальную программу обработки и режимы обработки.*

Подобную высокоинтеллектуальную операцию в настоящее время способны выполнять только высококвалифицированные специалисты. Данные специалисты должны иметь, в некотором смысле, природные данные (отсутствие повышенного тремора рук, спокойный характер). Малейшие погрешности могут привести к браку на финише изготовления дорогой и ответственной детали.

*С учетом вредности и ответственности изготовления пера лопаток рабочие, выполняющие операции шлифования и полирования, во всем мире являются самыми высокооплачиваемыми, имеют возможность выхода на пенсию в одинаковом возрасте со специалистами, работающим на атомных установках.*

С учетом изложенного выше, для автоматизации финишных операций обработки пера лопаток ГТД требуется создание интеллектуальной технологической системы, способной распознавать геометрию и качество сложной пространственной поверхности с помощью встроенных высокоточных

дистанционных систем контроля, контролировать технологический процесс и выбирать оптимальное управление для каждой индивидуальной детали.

В соответствии с Госконтрактом № 38/18-2000 от 6 июня 2000 г. с Министерством экономики РФ по теме «Разработка и изготовление опытного образца станка для высокоточной финишной обработки сложнопрофильных деталей, в том числе турбинных лопаток» был создан опытный образец робота-станка РОСТ-300 (рисунок 2), на котором в настоящее время в Филиале НИИД АО «Газотурбостроения «Салют» осуществляется отработка технологического процесса.



Рисунок 2 – Робот-станок для обработки пера лопаток ГТД

Данный опытный станок позволил отработать основные элементы интеллектуальной системы. Прошли проверку и испытание три оптические системы, разработанные в НПО "Луч", непосредственно на «Салюте» и в институте высоких температур РАН (ОИВТ РАН). Применение нашла система, разработанная в ОИВТ РАН (рисунок 3), которая по методу измерения позволяет получить требуемую точность определения геометрических размеров.



Рисунок 3 – Оптическая система контроля геометрических параметров пера лопаток

Для автоматизации операции финишной обработки пера лопаток ГТД требуется создание комплекса, включающего робот-станок с системой управления, накопительное устройство и оптическую систему контроля (рисунок 4).

Механика робота-станка РОСТ-300М отработана на опытном образце РОСТ-300. Преимущество данной механики заключается в ее возможности выполнять как рабочие движения, а также транспортные перемещения для установки заготовки и полученной детали в накопительное устройство. Конструкция робота-станка РОСТ-300М получена с учетом устранения погрешностей и недостатков РОСТ-300. Механика станка является собственной разработкой ИМАШ РАН, существенно дешевле и проще зарубежных образцов и защищена патентами.

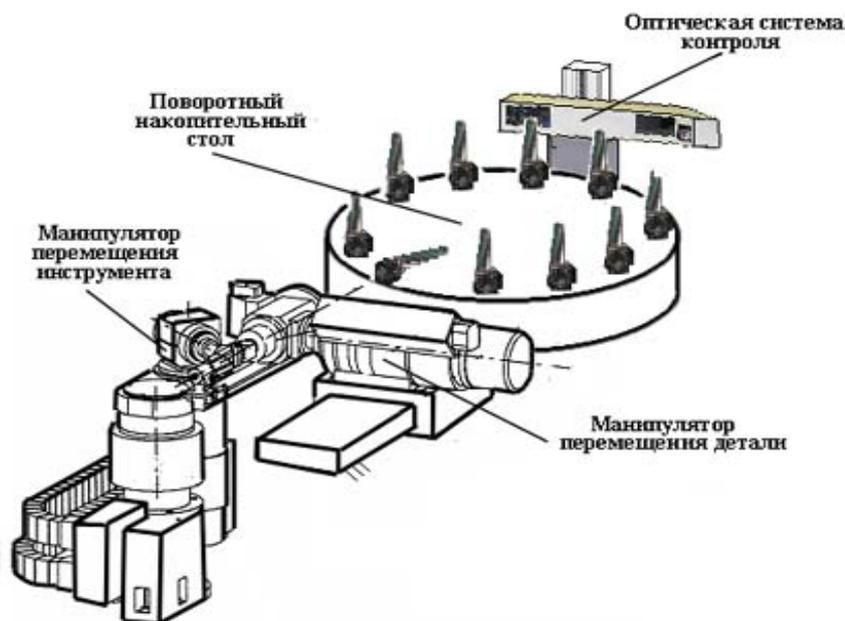


Рисунок 4 – Технологический комплекс обработки пера лопаток ГТД

Накопительное устройство может служить устройством связи с оборудованием предварительной обработки лопаток и позволяет данный комплекс использовать в составе линии законченного цикла изготовления лопаток ГТД, а также как самостоятельный комплекс, в котором загрузку будет выполнять рабочий.

Встроенная оптическая система контроля позволит выполнять контроль как поступающей заготовки, а также готовой детали.

Управление всем комплексом осуществляется от единой вычислительной системы, которая может быть включена в единую вычислительную сеть. Система управления включает базу целей, базу знаний и базу данных. В совокупности данная система должна заменить технологическое бюро, которое в настоящее время занимается разработкой программ станков с ЧПУ

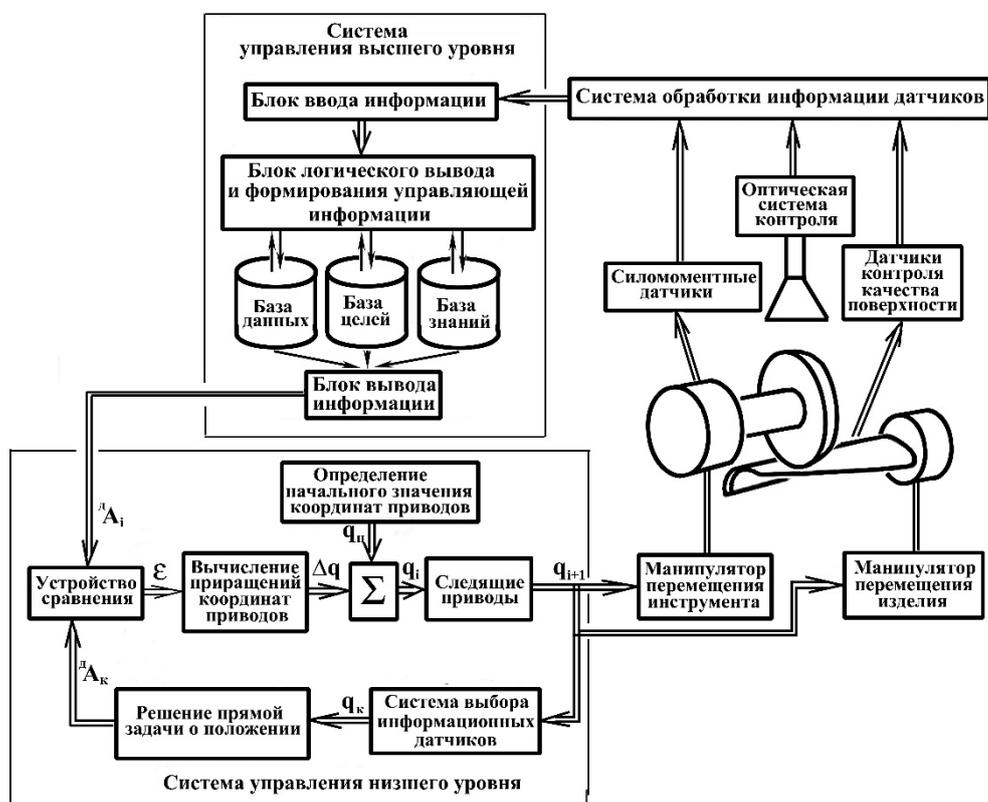


Рисунок 5 – Интеллектуальная технологическая система

Таким образом, комплекс финишной обработки пера лопаток ГТД может быть полностью реализован на российской элементной базе и на российских предприятиях.

Кроме изложенного выше, полученные результаты позволят создавать новое поколение обрабатывающего оборудования, обладающего элементами искусственного интеллекта.

**A.A. Ayskin, A.J. Ksenzenko, Yu.S. Marzanov, E.A. Prycev, V.E. Pryanichnikov, R.V. Khelemendik, S.R. Eprikov**

## **INDUSTRIAL AUTOMATION WITH REMOTE ACCESS AND AUTOMATIC RESOLUTION OF LOGICAL CONTRADICTIONS FOR INDUSTRY 4.0**

*International Laboratory «Sensorika», MSTU “Stankin”, INET RSUH, Moscow  
KIAM Russian Academy of sciences, v.e.pr@yandex.ru*

Keywords: industry 4.0, intelligent manufacturing, sensor systems, Cyber-Physical Systems, Internet of Things, artificial intelligence, automation, logical contradictions, cloud computing, industrial automation, remote monitoring.

1. Since the first industrial revolution, technological advances had significantly, rapidly increase productivity. Briefly describe the global industrial revolutions I-IV can be just one word: mechanization, electrification, automation, intellectualization. The basis for the concept of Industry 4.0 was the synergy of such ideas as: “Internet of Things”, “Big Data”, "Cyber-physical system". Under this concept, one of the main tasks is to ensure effective releasing of even minimal parties with the rapid changes in production lines. Using built-in sensors/actuator network access leads to the necessity of creating new methods of optimisation for resource conservation in a production environment. It was necessary to create a mechanism for predicting the fault of the components or equipment, as well as the possibility of integrating the process of self-repair, finding alternative solutions to current production problems, the resolution of the relevant repair or maintenance. If more recently, consumers of automation did not provide the manufacturer access purchased equipment, in recent years, a large demand for life support equipment. One of the leaders of implementation of this concept is the Concern FESTO, working in more than hundred countries with 300,000 users and in practice, providing just-in-time production.

In the Russian Federation, not all businesses are ready to introduce the concept of "Smart production", as this is a difficult, long and expensive process. At the same time enterprise, created "from scratch", more receptive to such innovations. International laboratory "Sensorika" together with specialists and graduate students MSTU "STANKIN", KIAM RAS, IINET has developed a technology implementation and deployment of "Smart production" by building a new automatic line for manufacturing of sodium glass and products from him in the city of Kimry. The automation system implemented in the framework of this project, based on the previously patented methods automatically resolve logical contradictions (refined to adapt to the needs of the tasks). This technique allows to predict the probable failures of the system in certain situations is one of the foundations of the reliability of the project. Automation implemented into the project is a symbiosis of decentralised systems integrated into a digital network with the possibility of switching to a hard program or manual control if necessary. The developed concept allows to perform non-trivial tasks for the intelligent control of Executive elements of technological process, for example, switching valves, dampers, motor control for input, output, for moving components of the production lines in the manufacturing process. In the process of production involved specialized transport system, developed with the participation of the International laboratory "Sensorika" and is used for drying and moving of castings and finished products in a production space with an area of about 1400 m<sup>2</sup>. This system is made on the basis of individual robotic trucks, which are driven by electro engines and a set of sensor devices. One such transport unit is able to move in complicated paths of internal space elements of the finished product weighing up to 2 tons in conditions of high humidity. Part of the overall management system of the production cycle is the interface, that provides access to it with the purpose of remote monitoring, testing and upgrading process. When developing control systems of transport and manipulation robotic technology "Industry 4.0", in our project initially excluded the peripheral devices, which are not have a characteristics of flexibility. At the same time provides "intelligent data entry" through a system of sensors and feedback controlling the operation of all actuators with logical analysis and the detection of incorrect manufacturing processes, which significantly reduces the probability of violation of the technological cycle and emergency.

*А.А. Арыскин, А.Я. Ксензенко, Ю.С. Марзанов, Е.А. Прысев, В.Е. Пряничников, Р.В. Хелемендик,  
С.Р. Эприков*

## **ПРОМЫШЛЕННАЯ АВТОМАТИКА С ДИСТАНЦИОННЫМ ДОСТУПОМ И АВТОМАТИЧЕСКИМ РАЗРЕШЕНИЕМ ЛОГИЧЕСКИХ ПРОТИВОРЕЧИЙ ДЛЯ ИНДУСТРИИ 4.0**

*Международная лаборатория «Сенсорика», МГТУ «Станкин», МИНОТ РГГУ,  
ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, Москва, v.e.pr@yandex.ru*

Ключевые слова: индустрия 4.0, умное производство, сенсорные системы, Cyber-Physical Systems, Internet of Things, искусственный интеллект, системы автоматике, логические противоречия, облачные технологии, промышленная автоматика, дистанционный контроль.

1. Начиная с первой промышленной революции, технологические достижения позволяли существенно, скачкообразно увеличивать производительность труда. Кратко охарактеризовать мировые индустриальные революции I-IV можно буквально одним словом: механизация, электрификация, автоматизация, интеллектуализация. Основой для концепции Индустрии 4.0 послужила синергия таких идей как: Internet of Things («Интернет вещей»), Big DATA («Большие данные»), Cyber-Physical Systems («Кибер-физические системы»).

2. В рамках данной концепции, одной из основных задач является обеспечение эффективного выпуска даже минимальных партий при быстром внесении изменений в продукцию. Применение встроенных датчиков/исполнительных механизмов с сетевым доступом приводит к необходимости создания новых методов оптимизации для сохранения ресурсов в производственной среде. Стало необходимым создание механизма предсказания момента повреждения компонентов или оборудования, а также возможность включения процесса самовосстановления, нахождения альтернативных решений для текущей производственной задачи, разрешение проведения соответствующих работ по ремонту или техобслуживанию. Если ещё недавно потребители средств автоматизации не предоставляли производителю доступ к закупленному оборудованию, то за последние годы появился большой спрос на пожизненное сопровождение оборудования. Одним из лидеров реализации данной концепции является концерн FESTO, работающий в более, чем ста странах с 300000 потребителей и на практике обеспечивающий just in time production.

В Российской Федерации не все предприятия готовы к внедрению концепции «Умного производства», так как это является сложным, долгим и дорогостоящим процессом. В тоже время предприятия, создающиеся «с нуля», более восприимчивы к подобным инновациям. Международная лаборатория «Сенсорика» совместно со специалистами и аспирантами МГТУ «СТАНКИН», ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, МИНОТ разработала технологию реализации и внедрения «Умного производства» на примере создания новой автоматической линии по приготовлению натриевого стекла и изделий из него в городе Кимры. Система автоматике, внедряемая в рамках данного проекта, строится на основе запатентованной ранее методики автоматического разрешения логических противоречий (дорабатывается для адаптации к потребностям решаемых задач). Эта методика позволяет спрогнозировать вероятные отказы системы в тех или иных ситуациях, что является одной из основ надежности проекта. Автоматика, внедряемая в проект, представляет собой симбиоз децентрализованных систем, объединенных в общую цифровую сеть с возможностью перехода на жесткое программное или ручное управление в случае необходимости. Разрабатываемая концепция позволяет выполнять нетривиальные задачи «умного» управления исполнительными элементами технологического процесса, например, переключением клапанов, задвижек, управлением двигателями для подачи, вывода, перемещения составляющих производственного процесса в процессе изготовления готовой продукции. В технологическом процессе производства задействована специализированная, транспортная система, разработанная при участии Международной лабораторией «Сенсорика» и предназначенная для сушки и перемещения отливок готовой продукции в производственном пространстве площадью порядка 1400 м<sup>2</sup>. Данная система выполнена на основе индивидуальных роботизированных тележек, которые приводятся в движение посредством пар бортовых двигателей и комплекта сенсорных устройств. Одна такая транспортная единица способна перемещать по сложной траектории внутрипроизводственного пространства элементы готовой продукции весом до 2-х тонн в условиях с повышенной влажностью. В состав общей системы управления производственным циклом входит интерфейс, обеспечивающий круглосуточный доступ к ней, с целью дистанционного контроля, тестирования и модернизации технологического процесса. При разработке системы управления

транспортных и манипуляционных роботов по технологии «Индустрия 4.0», в нашем проекте изначально исключались периферийные устройства, которым не свойственна гибкость. При этом предусматривается «интеллектуальный ввод данных» через систему датчиков и обратных связей, контролирующую работу всех исполнительных механизмов с логическим анализом и выявлением некорректного хода производственных процессов, что существенно уменьшает вероятность нарушения технологического цикла и аварийной ситуации.

*A.V. Lopota, S.A. Polovko, P.K. Shubin, E.Yu. Smirnova*

## **CONCEPTUAL ISSUES OF INNOVATIVE DEVELOPMENT OF MARINE RESCUE ROBOTICS IN EXTREME ARCTIC CONDITIONS**

*RTC, Saint-Petersburg*

### **Annotation**

Relevance of development and application areas of unmanned marine robotic safe systems are defined. Implementation principles are set for robotic complexes that are intended to find and rescue in the sea and evacuation from emergency marine facilities. Conceptual development issues of marine rescue robots for use in extreme Arctic conditions are considered. Development concept of avia drop pod amphibious robotic means that are integrated into robotic systems based on the avia marine search and rescue complexes.

Keywords: sea search and rescue, evacuation from emergency marine facilities, innovation development, marine rescue unmanned robotic complex, design concept, unmanned amphibian universal rescue device, avia drop pod robotic means, extreme Arctic conditions

*A.V. Лопота, С.А. Половко, Е.Ю. Смирнова, П.К. Шубин*

## **КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ МОРСКОЙ СПАСАТЕЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ ДЛЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ АРКТИКИ**

*ЦНИИ РТК, Россия, 194064, Санкт–Петербург, Тухоревский пр., 21, alopota@rtc.ru, polovko@rtc.ru, eus@rtc.ru, shubin@rtc.ru*

### **Аннотация**

Определены актуальность создания и области применения морских беспилотных роботизированных спасательных систем. Сформулированы принципы внедрения робототехнических комплексов для решения задач поиска и спасания на море и эвакуации с аварийных морских объектов. Рассмотрены концептуальные вопросы научно обоснованного инновационного развития морской спасательной робототехники для применения в экстремальных условиях Арктики. Предложена концепция создания авиа-десантируемых амфибийных робототехнических беспилотных средств интегрированных в состав роботизированных систем на базе авиационно-морских поисково-спасательных комплексов.

Ключевые слова: поиск и спасание на море, эвакуация с морских аварийных объектов, инновационное развитие, морские роботизированные беспилотные спасательные системы, концепция создания, безэкипажное амфибийное универсальное спасательное средство, авиа-десантируемые беспилотные робототехнические средства, экстремальные условия Арктики.

Роботы внедряются в первую очередь там, где труд человека и его жизнедеятельность затруднены, невозможны или связаны с угрозой для жизни и здоровья [1]. Любая деятельность на море сопряжена с той или иной степенью риска для жизни человека. Поэтому создание эффективных роботизированных беспилотных спасательных систем (РБСС) для поиска и спасания людей, терпящих бедствие на море, в зонах повышенной опасности, характерных для чрезвычайных ситуаций (ЧС), является актуальной задачей [2].

Можно определить следующие области применения РБСС для спасания терпящих бедствие на море:

- Поиск терпящих бедствие людей в сложных условиях (туман, задымление, очаги возгорания, штормовой ветер, волнение);

- Спасение терпящих бедствие людей, включая эвакуацию с аварийных морских объектов (МО) и подбор с поверхности воды, льда и коллективных спасательных средств (КСС);
- Медицинская эвакуация пострадавших (эвакуация в сочетании с оказанием экстренной медицинской помощи);
- Мониторинг обстановки в зоне спасательных работ;
- Поддержка проведения и выполнения аварийно-спасательных работ в зоне ЧС на аварийном МО.

Разработка РБСС в качестве спасательных систем для применения в экстремальных условиях Арктики при выполнении спасательных операций должна проводиться с учетом факторов воздействия сложных климатических условий (полярная ночь, ледяные торосы, сильный, порывистый ветер, штормы, низкие температуры).

Существующие в настоящее время коллективные спасательные средства и спасательные системы (обитаемые подводные аппараты, спасательные плоты и шлюпки, спасательные катера, ледоколы, буксиры, суда с динамическими принципами поддержания, вертолеты, гидросамолеты) имеют ряд недостатков при использовании в тяжелых природно-климатических условиях северных широт [3,6,7]. Основные из указанных коллективных средств спасения на море, имеющие отдельные недостатки, ведущие к снижению уровня безопасности спасателей или эффективности эвакуации и спасания терпящих бедствие людей в условиях Арктики, показаны на рисунке 1.



Рисунок 1 – Существующие коллективные средства спасения на море

Поэтому безусловно актуальным является создание принципиально нового поколения роботизированных спасательных средств и систем, а также технологий их применения [4].

Институтом транспортных систем (ИТС) при НГТУ им.Р.Е.Алексеева и ЦНИИ РТК в рамках выполнения исследовательских и проектных работ по решению задачи спасения и эвакуации людей в экстремальных условиях Арктики разработан опытный образец беспилотного коллективного универсального спасательного средства (БП УСС) на базе амфибийного шасси со шнековым двигателем. Он предназначен для эвакуации и спасения персонала в чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера на Арктическом шельфе. На рисунке 2 представлен внешний вид экспериментального образца и концепт внешнего вида штатного БП УСС. На рисунке 3 показана функциональная схема иерархической системы беспилотного управления.

БП УСС планируется оснастить откидным гидробортом для приема спасаемых с водной и ледовой поверхности, а также системой жизнеобеспечения. Прорабатывается возможность дооборудования манипуляторным устройством (для оперативного извлечения спасаемых с водной поверхности, из ледовой крошки и завалов) и квадрокоптером (для оперативного поиска спасаемых на водной и ледовой поверхности, сброса индивидуальных и коллективных спасательных средств, а также средств жизнеобеспечения).



Рисунок 2 – Внешний вид беспилотного универсального спасательного средства (БПУСС).  
 а) - экспериментальный образец, б) - концепт штатного образца

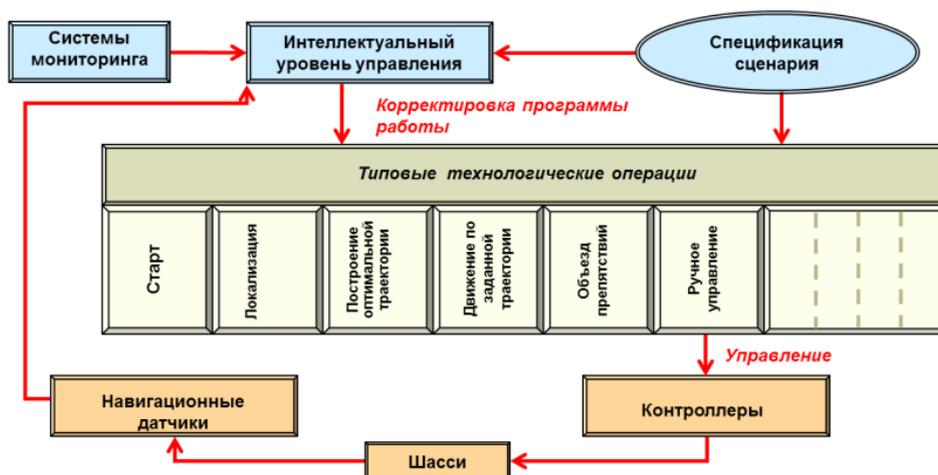


Рисунок 3 – Функциональная схема иерархической системы беспилотного управления БПУСС

Работы, проведенные ЦНИИ РТК по монтажу и комплексированию на борту экспериментального образца БПУСС составных частей бортовой системы управления (БСУ) (см. рисунки 4 и 5) (бортовых вычислителей, системы технического зрения, навигационной подсистемы, подсистемы управления ДВС, подсистемы управления гидроприводом), позволяют обеспечить решение сложных задач навигации, технического зрения и беспилотного управления БПУСС в условиях Арктики.

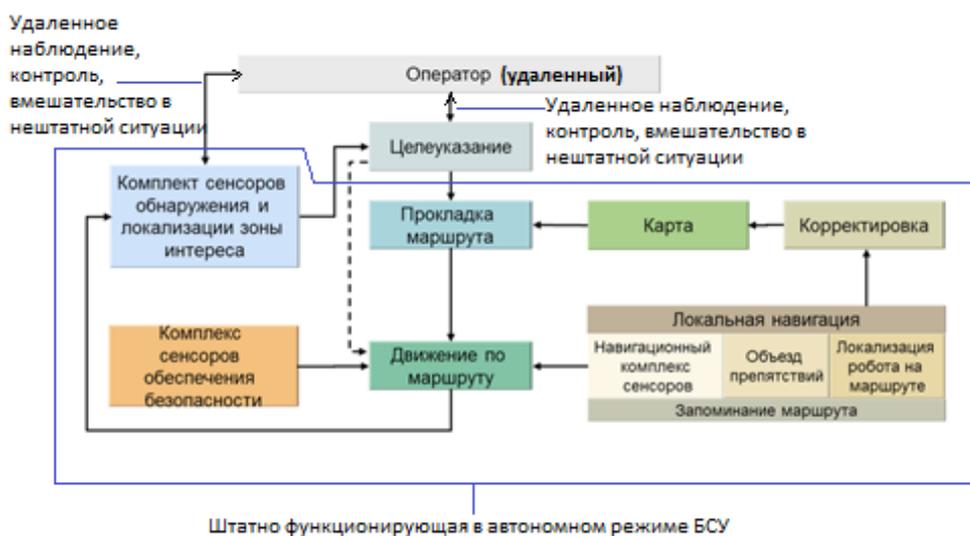


Рисунок 4 – Функциональная схема бортовой системы управления (БСУ)



Рисунок 5 – Основные комплектующие составных частей БСУ для БП УСС

Как показывает морская практика, в общем случае, спасательная операция складывается из следующих этапов:

- эвакуации людей с гибнущего морского объекта;
- периода выживания, который отсчитывается с момента оставления объекта людьми до завершения спасательной операции;
- поиска спасательных средств и спасающихся на водной и ледовой поверхности;
- завершения спасательной операции путем транспортировки и перемещения пострадавших на берег или судно, принимающее участие в спасательной операции.

Сложность выполнения первого этапа спасательной операции связана с многообразием аварийных ситуаций, специфическими условиями чрезвычайной ситуации на аварийном объекте, разнообразием спасательных средств, варьирующимися внешними условиями и т.п.

Сложные погодные условия (например, шельфовой зоны высоких широт) требуют специальной оснастки спасательных средств высококачественными сенсорами, предназначенными для работы в экстремальных условиях, а также порядка проведения спасательной операции с учетом быстромменяющихся условий арктической среды.

Поэтому предложена концепция коллективного спасения (см.рисунок 6), которая подразумевает применение группы БП УСС для решения задачи спасения и эвакуации людей из зоны ЧС. Это одно из перспективных направлений в развитии спасательных технологий. Основное преимущество заключается в существенном повышении производительности спасательных работ на аварийном морском объекте.

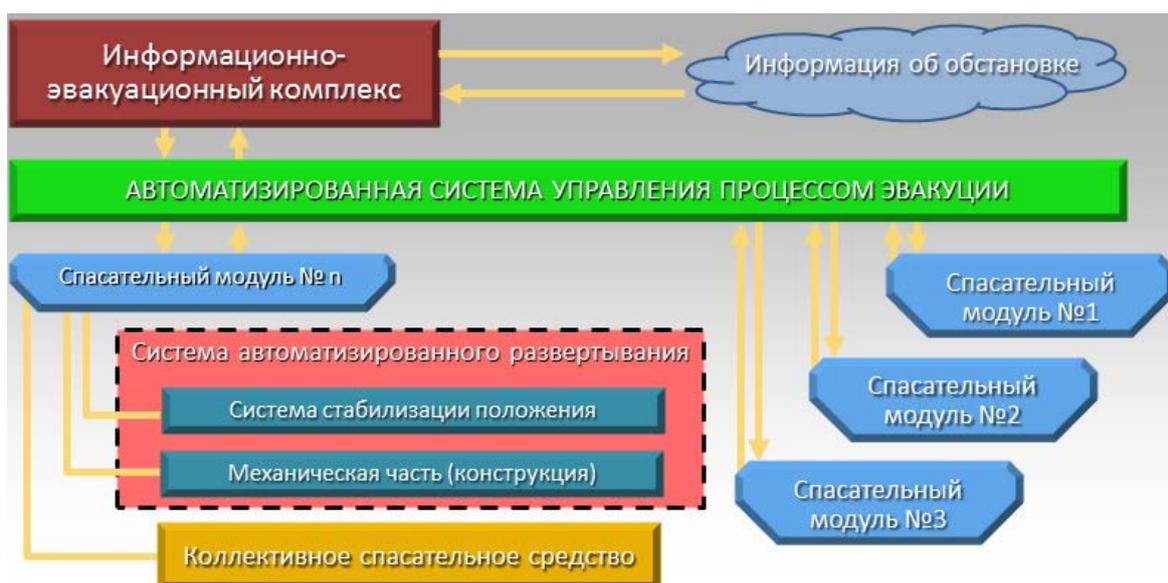


Рисунок 6 – Концепция коллективного спасания

Концепция коллективного спасания может быть реализована в двух основных технологиях:

- на этапе эвакуации с аварийного морского объекта;
- на этапе поиска и подбора людей с водной или ледовой поверхности.

Основной областью применения БП УСС является эвакуации персонала с аварийных объектов шельфовой зоны высоких широт (ШВЗШ) при возникновении угрозы их жизни. В качестве перспективной системы автоматизированного безопасного спуска (АСУ БС) для спасения персонала МЛСП в БП УСС может быть применена тросовая спусковая система с выдвижными телескопическими балками, показанная на рисунке 7.

Отличительной особенностью системы эвакуации и автоматизированного безопасного спуска является наличие интеллектуальной системы управления процессом спуска, обладающей развитыми информационными и алгоритмическими средствами, такими как:

- технические средства определения углов крена и дифферента платформы;
- телевизионный комплекс с обеспечением ночного видения;
- эхо- и радиолокация для анализа окружающей обстановки во время спуска;
- автоматическое определение траектории спускаемого объекта при эвакуации.

Зарубежных аналогов, обладающих сопоставимыми техническими возможностями на данный момент времени не существует.

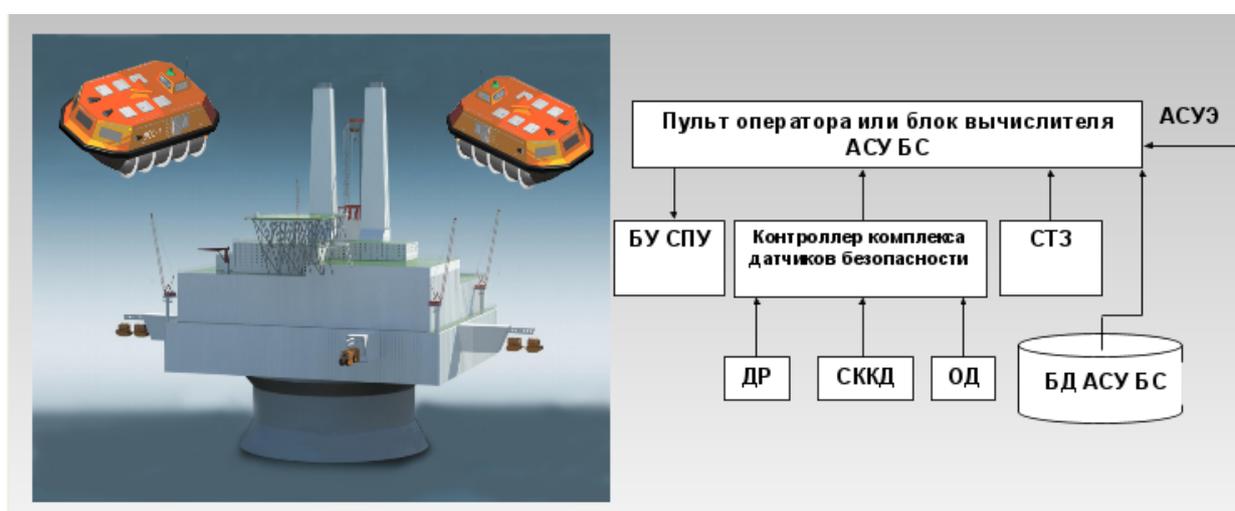
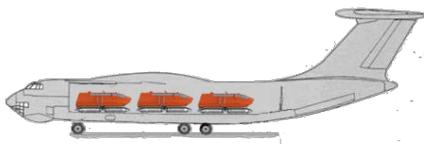


Рисунок 7 – Конструктивный облик перспективной системы автоматизированного безопасного оставления экипажем аварийного МО на основе БП УСС. Блок-схема автоматизированной системы управления безопасным спуском персонала в БЭЖ УСС при оставлении аварийного МО содержит следующие обозначения:

- АСУ БС - автоматизированная система управления безопасным спуском;
- АСУЭ - автоматизированная система управления эвакуацией;
- БУ СПУ - блок управления спускоподъемным устройством;
- ДР – датчик расстояния;
- СККД - система контроля крена и дифферента;
- ОД – датчик контроля скорости спуска;
- СТЗ – система технического зрения;
- БД АСУ БС – база данных АСУ БС.

Как показывает анализ, наиболее перспективными направлениями инновационного развития РБСС для поиска и спасания на море в условиях Арктики могут стать авиадесантируемые БП УСС, интегрированные в состав авиационно-морских поисково-спасательных комплексов (АМПСК), например, на базе ИЛ–76 МФ [5] (см.рисунок 8).



<b>Габариты грузовой кабины, Ш x Д x В, м</b>	3,45 x 24,5 x 3,4
<b>Масса полезной нагрузки, кг</b>	48000-50000
<b>Крейсерская скорость, км/ч</b>	750-800
<b>Дальность полета, км</b>	5200
<b>Практический потолок, м</b>	12000
<b>Экипаж, чел</b>	6/7

Рисунок 8 – Возможная схема размещения БП УСС на борту ИЛ-76МФ и ТТХ роботизированного АМПСК

Последовательность основных действий при проведении спасательной операции АМПСК может быть представлена в следующем виде:

- 1) Получен сигнал об аварии;
- 2) Перелет снаряженного ИЛ-76 МФ к району аварии;
- 3) Допосиск терпящих бедствие в районе аварии;
- 4) Десантирование БП УСС месту бедствия;
- 5) Развертывание БП УСС на месте бедствия;
- 6) Подбор и спасение пострадавших на БП УСС;
- 7) Транспортировка пострадавших в БП УСС к месту медицинской эвакуации.

Модель применения роботизированного АМПСК на основе БП УСС показана на рисунке 9.

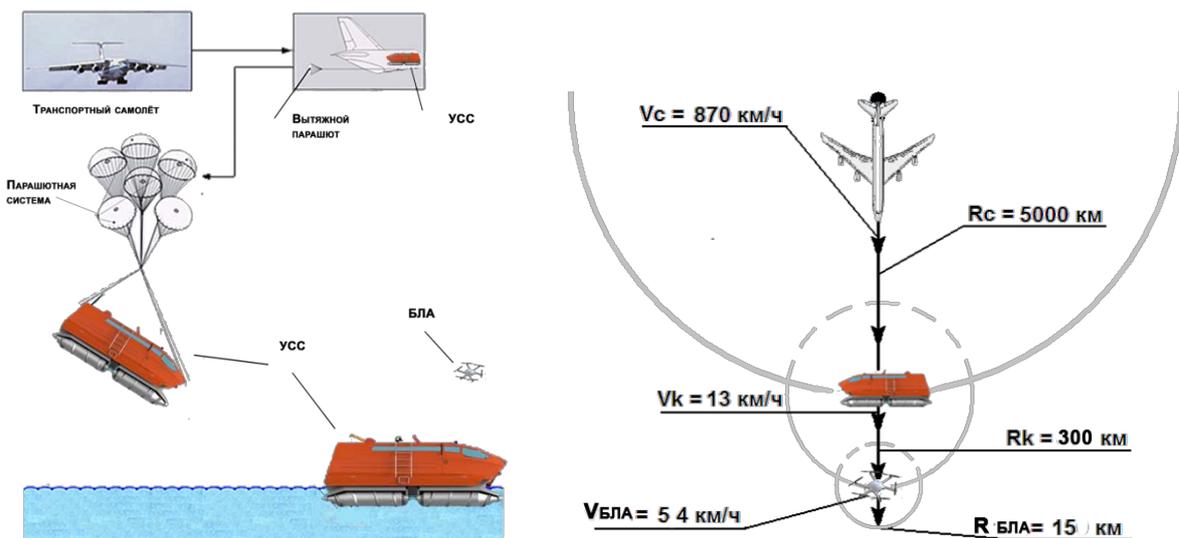


Рисунок 9 – Модель применения роботизированного АМПСК на основе БП УСС

Применение БП УСС в составе РБСС при спасении людей на море и с объектов шельфовой зоны высоких широт при возникновении угрозы жизни соответствует основным критериям эффективности спасательной операции, как это показано на рисунке 10.

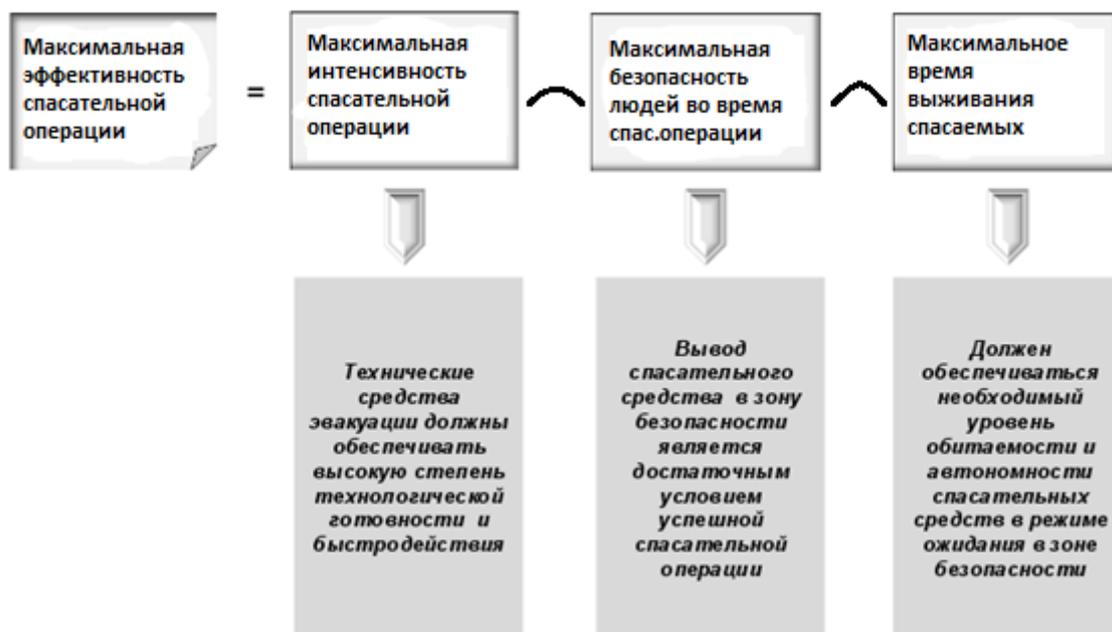


Рисунок 10 – Основные критерии эффективности спасательной операции

Таким образом, в результате проведённого анализа выявлены основные инновационные направления развития РБСС поиска и спасания для экстремальных условий Арктики. В целом, можно сделать вывод о том, что разработка БП УСС, интегрированных в состав РБСС, позволит минимизировать риск для жизни спасателей, повысить функциональные возможности, оперативность и производительность спасательной техники в экстремальных условиях проведения операций по поиску и спасанию в условиях Арктики, а также даст дополнительный стимул основным инновационным направлениям развития морской спасательной робототехники:

- Создание РБСС большого радиуса действия и длительной автономности;
- Создание мультимодульных мехатронных РТК с адаптивной кинематической структурой;
- Обеспечение информационной поддержки управления робототехническими системами;
- Формирование группового и коллективного поведения роботов;
- Дальнейшая эволюция роботов – самоусовершенствование на основе самообучения;
- Унификация, модульное построение, миниатюризация и интеллектуализация роботов;
- Обеспечение надёжности, стойкости к внешним воздействующим факторам и живучести;
- Сочетание непосредственного, супервизорного, автоматического и группового управления;
- Гибридизация по комплексированию разнородных мехатронных модулей и технических средств в составе РТК и РБСС

1. Александров М. Н. Безопасность человека на море. – Л.: Судостроение, 1983.
2. Лопота А.В., Шубин П. К. – Концептуальные вопросы разработки роботизированных систем для поиска и спасания в условиях Арктики, доклад на Международной конференции по судостроению и разработке высокотехнологичного оборудования для освоения Арктики и шельфа, СПб, 2016.
3. <http://roboting.ru/23-asw-usv-robo-kater-idet-na-sluzhbu.html>
4. Морская доктрина Российской Федерации на период до 2020 года (утверждена Президентом Российской Федерации В. В. Путиным 27 июля 2001 г. No Пр-1387).
5. Электронный ресурс: Авиация и Космонавтика / Николай Тиликов. Самолет Ил-76 и его транспортные модификации, <http://www.arms-expo.ru/049056052054124049049056052053.html>

*М.В. Савин<sup>1</sup>, С.Г. Цариченко<sup>2</sup>*

## **РОБОТ ДЛЯ ШАХТНЫХ РАБОТ**

<sup>1</sup> *ФГБУ ВНИИПО МЧС России*

<sup>2</sup> *НИИ «Геодезия»*

### **Аннотация**

Приведены данные о результатах применения робототехнических средств на территории учебной шахты «Северная» Печерского военизированного горноспасательного отряда. Даны предложения по разработке нового робототехнического комплекса для шахтных выработок.

Ключевые слова: аварийно-спасательные и другие неотложные работы (АСДНР), военизированные горноспасательные части (ВГСЧ), робототехнический комплекс (РТК), робототехническое средство (РТС), тактико-техническое задание (ТТЗ).

25 февраля 2016 года на шахте «Северная» произошел внезапный выброс метана, что повлекло серию последующих взрывов, обрушение породы и возникновения многочисленных очагов пожара. В момент аварии под землей находились 111 человек.

С учетом решения Воркутинского городского суда (об установлении факта смерти 26 шахтеров) 6 марта началось осуществление затопления шахты водой с подачей за счет естественного водопритока (около 250 м<sup>3</sup>/мин) и нескольких шахтных источников пожарно-оросительного водоснабжения (800–1000 м<sup>3</sup>/мин), предусмотренное решением Технического совета от 1 марта 2016 года.

К ликвидации аварии и последствий ЧС была привлечена группировка в составе 604 человек и 103 единиц техники, из них 4 воздушных судна, в том числе от МЧС России 501 человек и 82 единицы техники.

27 февраля 2016 года в район ЧС была направлена дополнительная группировка сил МЧС из состава сил и средств Центра по проведению спасательных операций особого риска «Лидер», Государственного центрального аэромобильного спасательного отряда «Центроспас» и ВНИИПО. Оперативная группа была оснащена 3-ми единицами робототехнических средств (далее – РТС) (рис. 1 - 3)) и 5 - ю единицами беспилотных авиационных систем (далее – БАС).



Рисунок 1 – Робототехническое средство Telemax



Рисунок 2 – Робототехническое средство радиационной разведки



Рисунок 3 – Робототехническое средство радиационной разведки и проведения технологических операций

В ходе ликвидации последствий аварии на шахте «Северная», оперативной группой сотрудников МЧС России были исследованы возможности применения робототехнических комплексов, стоящих на вооружении МЧС России.

В целях повышения уровня практических навыков операторов РТС и БАС на территории учебной шахты Печерского военизированного горноспасательного отряда отрабатывались задачи по возможному применению РТС в сложившихся условиях.

По результатам выполненных задач выявлено, что:

- на данный момент РТС, способных выполнять задачи в шахте на глубине 750 метров для проведения разведки и разборов завалов и других работ на оснащении у МЧС нет;
- имеющиеся РТС в спасательных операциях подобного рода не применялись.

Было установлено, что представленные РТС не приспособлены для проведения разведки и аварийно-восстановительных работ в условиях аварийных угольных шахт по трем основным причинам:

- отсутствие взрывобезопасного исполнения;
- отсутствие надежной связи и систем управления в условиях горных выработок;

- низкая проходимость наземных комплексов в условиях аварийных шахт.

Поэтому для дальнейшего эффективного применения РТС при ликвидации последствий ЧС на предприятиях горнодобывающей промышленности необходимо провести опытно-конструкторские работы с целью создания робототехнического комплекса для проведения аварийно-спасательных работ в условиях аварийных угольных шахт.

В качестве прототипов для разработки РТС для работы в условиях аварийных угольных шахт могут быть использованы зарубежные образцы робототехнических комплексов, производства Австрии (рис. 4) и КНР (рис. 5), которые по своим тактико-техническим характеристикам и конструктивным решениям могут эксплуатироваться в условиях угольных шахт и выполнять анализ газообразной среды. При этом они не обладают достаточной проходимостью и надежными каналами связи.



Рисунок 4 – Взрывозащищенный робототехнический комплекс компании Тауроб (Австрия)

Робот способен работать во взрывоопасных средах. Интуитивная система дистанционного контроля с функцией интеллектуальной поддержки для гарантированного легкого управления с планшета (водозащитный, ударопрочный) и встроенного джостика (имеется опция управления с любого ПК (Windows OS) и любого геймпада). Высокая мобильность, высокопрочный и водозащитный, легко обеззараживается. Многоцелевой интерфейс для быстрого монтажа сенсоров и измерительных приборов для выполнения широкого спектра задач.



Рисунок 5 – Спасательный подземный робот для угольных шахт Underground Coal Mine Rescue Robot (КНР)

Робототехнический комплекс Underground Coal Mine Rescue Robot (КНР), который состоит из взрывобезопасного робота и компьютера (располагается в шахте). Компьютер отображает информацию и управляет роботом, его располагают в безопасной зоне. Он может отображать рабочий статус робота и информацию с приборов в реальном времени. Компьютер и робот соединяются 1300 – метровым оптоволоконным кабелем. Кабель протягивается по ходу движения робота автоматически.

Этот робот относится к классу оборудования, применяемого для спасения и разведки в опасной среде после взрывов в угольных шахтах. Данный комплекс может заменить человека для выполнения задач в опасных условиях угольных шахт, обеспечить безопасность личного состава спасательной команды, получать данные для выработки решения и оперативной разработки спасательного плана.

Робот выполнен во взрывобезопасном и водонепроницаемом исполнении. Низкое энергопотребление, низкое тепловыделение, высокая надежность системы управления. Робот имеет модульную конструкцию, прост в ремонте. Интуитивно понятный интерфейс управления. Дополнительная транспортная функция – возможность доставки материалов в опасную зону. Не требует подготовительных работ, при достаточном уровне заряда элементов питания может применяться в любое время.

Для ликвидации последствий ЧС на предприятиях Российской горнодобывающей промышленности необходимо создать новое, отечественное, конкурентно-способное средство для проведения аварийно-спасательных работ в условиях шахтных выработок, которое позволит обеспечить безопасность работ, как для шахтеров, так и для горноспасателей.

В качестве первого шага институтом в 2016 году была проведена научно-исследовательская работа, в результате которой разработано тактико-техническое задание на создание данного робототехнического комплекса. Робот для работ в шахтных выработках должен соответствовать следующим требованиям:

- конструкция РТС должна быть выполнена во взрывобезопасном, искро - пожаробезопасном, термостойком, ударопрочном и влагоустойчивом исполнении;
- разработать принципиально новые движители для РТС в условиях сложной проходимости, в том числе в водной среде;
- РТС должны быть оснащены различными приборами контроля и обнаружения взрывоопасных примесей в воздухе (широкого спектра);
- разработать системы связи и управления в условиях поглощения и переотражения на больших расстояниях и глубинах шахт;
- создать комплексную систему обеспечения бесперебойным энергопитанием РТС более 8 часов.

В качестве возможного технического решения нами предлагается прототип отечественной конструкции, представленный на рис. 6.



Рисунок 6 – Прототип отечественного робототехнического средства для шахты

Данные работы выполняются специалистами нашего института совместно с ведущими научными центрами в области робототехники (лабораторией подземных роботов на базе ФИЦ УУХ СО РАН (институт угля), созданной в соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 16 декабря 2015 года № 623 «О Национальном центре развития технологий и базовых элементов робототехники») и Федеральным государственным унитарным предприятием «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики имени Н.Л. Духова» (ВНИИА).

Для работы в шахтах операторы управления РТС должны быть обучены и аттестованы для работы в этих условиях.

В современных условиях не представляется возможным иметь на каждом предприятии робототехнические комплексы. Решением проблемы может быть создание и оперативное применение мобильной воздушно-наземной группировки робототехнических комплексов способной проводить различные аварийно-спасательные работы и мониторинг зон чрезвычайных ситуаций с высоким уровнем эффективности и минимальным риском для жизни спасателей.

Включаемые в состав группировки технические средства должны быть мобильны для перевозки автомобильным, железнодорожным, воздушным и водным транспортом.

Таким образом, рассмотренные выше вопросы показывают перспективность применения робототехнических комплексов в интересах МЧС России. Но для того, чтобы их эффективное применение стало нормой и неотъемлемой частью технического обеспечения МЧС России для борьбы с ЧС и пожарами, необходимо наращивать парк РТС, готовить специалистов с использованием специализированных тренажеров.

1. Завиркина Т.В., УДК 622.822.22 Статья. Анализ причин эндогенных пожаров угольных шахт, МГТУ, 2012 г.
2. Отчет по НИР «Научно-обоснованные предложения по созданию робототехнического комплекса для проведения аварийно-спасательных работ в условиях шахтных выработок с учетом опыта проведения аварийно-спасательных работ на шахте «Северная» ОАО Воркута-уголь», ВНИИПО, 2016 г.

*A.A. Koshurina<sup>1</sup>, V.E. Gai<sup>2</sup>, R.A. Dorofeev<sup>3</sup>, E.M. Hapilov<sup>4</sup>, S.S. Bobko<sup>5</sup>*

## **THE DEVELOPMENT OF THE ROBOTIC PLATFORM FOR RESCUE OPERATIONS IN EMERGENCY COAL MINES**

*NNSTU, SEC «Transport», Nizhny Novgorod, <sup>1</sup>allakoshurina@yandex.ru, <sup>2</sup>iamuser@inbox.ru, <sup>3</sup>blonde-o@yandex.ru, <sup>4</sup>evgen.ref12@gmail.com, <sup>5</sup>d.o.o.m.e.r@mail.ru*

### **Abstract**

The paper presents the concept of development of the multi-tier robotic platform for rescue operations in emergency coal mines. The robotic platform is aimed at minimizing the degree of risk to life and health of rescuers during primary works in emergency coal mines. The construction and the control system of the created model of one link of the robotic platform are described in the work. The model is designed for testing of remote control systems and technical vision, as well for testing of the accepted design solutions, in order to find the most optimal for emergency coal mine. Results of sea trials of the model are given in the paper. As result, the conclusion about the applicability of the selected technical solutions, as well as plans for the further development of the project is made.

**Keywords:** emergency coal mine, rescue, emergency situation, remote control system, unmanned technologies, technical vision, multi-joint robot, rotary-screw mover, additive technologies.

### **Introduction**

The relevance of the development of the special purpose mobile robots is associated with the implementation of rescue operations that pose a threat to human life. The primary purpose of such projects is to minimize the risk for rescuers in conducting reconnaissance, search and rescue operations in emergency coal mines. The purpose can be effectively achieved only with technical means created using unmanned technologies.

The consequences of accidents in coal mines are dangerous not only for miners blocked in a destroyed mine, but also for those who try to rescue them. The success of any rescue operation depends on the time of its

operation. Therefore, as a solution to the problem of conducting safe and effective rescue operations in emergency coal mines, the underground multi-jointed robotic platform is proposed.

The underground multi-jointed robotic platform is intended for conducting reconnaissance, rescue and search operations to eliminate the consequences of accidents in mines.

Potential consumers of the platform can be emergency rescue services, civil defense and other.

### The concept

The multi-jointed robotic platform is a platform consisting of three or more jointed modules with rotary-screw mover (Figure 1).

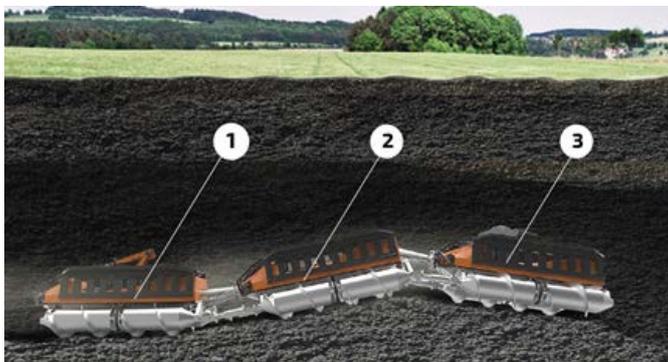


Figure 1 – The concept of the multi-jointed robotic platform

Each module is responsible for a specific task:

- the first module takes probes of soil in the work area using a sampler, as well as visual and instrumental detection of fire by a thermal imager with a laser rangefinder;
- the second module carries equipment for carrying out permanent gas and chemical control in the work area, as well as additional batteries;
- the third module carries the coil with the cable of the remote control system. The coil is equipped with an individual drive, rewinding / unwinding the cable, in order to minimize the drag resistance;
- the additional modules can be equipped with additional equipment or duplicate the functions of the first three modules, increasing the overall survivability level of the platform.

Each module is equipped with several cameras to carry out a circular view and continuous monitoring of the situation in the work area.

### Project implementation

At the present time, the running model of a single segment of the multi-jointed robotic platform has been created (Figure 2).



Figure 2 – The running model of a single segment of the multi-jointed robotic platform

The model is designed to test remote control systems and technical vision, as well for testing of the accepted design solutions, in order to find the most optimal for work in conditions of an emergency coal mine. The model can be equipped with two or more RGB or IR cameras, as well as sensors for monitoring the state of the environment (temperature, humidity, gas content, etc.). Model's design allows installing rotary-screw movers with different configurations, performed of various materials (steel, plastic, rubber).

Figure 3 shows the construction of the model.

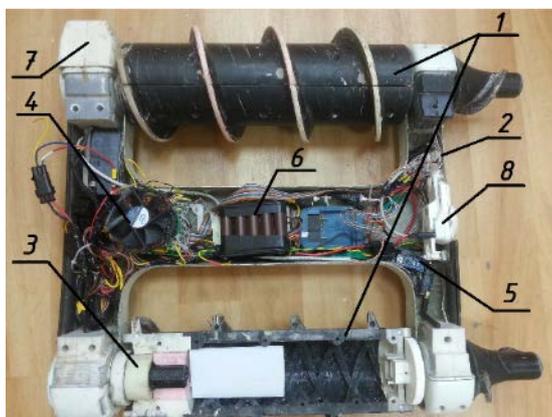


Figure 3 – The construction of the model

Where: 1– rotary-crew movers; 2 – body; 3 – motor gear; 4 – motor drivers module; 5 – communication module; 6 – battery; 7, 8 – cameras.

The model was made using modern technologies of rapid prototyping (3D printing, application of composite materials). Brief specifications of the model are presented in Table 1.

Table 1. Brief specifications of the model

Dimensions (LxWxH), mm	700x650x180/250
Mass, kg	16
Type and material of mover	rotary-crew, ABS
Clearance, mm	45/115
Body material	fiberglass
Control	wireless, radio channel
Motor	25N*m
Transmission	two stage planetary gearbox
Type and capacity of battery	Li-Ion, 6.6 Ah
Vision	two RGB IP cameras

### Control system of the model

Figure 4 shows the scheme for the control system of the model.

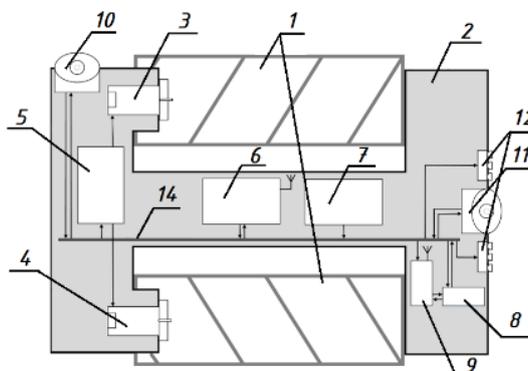


Figure 4 – The scheme for the model control system

Where: 1- movers; 2 - body; 3 - left motor gear; 4 - right motor gear; 5 - motor drivers module; 6 - router; 7 - battery module; 8 - control module; 9 - radio module; 10 - side board camera; 11 - front camera; 12 - front lighting.

The scheme includes the following modules: communication module, control module, driver module, video surveillance module, battery module, two engines, lighting system elements.

As a control device, the microcontroller is used that generates a control pulse width modulated signal (PWM signal) transmitted to the executive device. The microcontroller receives a signal from the communication module using the SPI interface, generates a PWM signal, depending on the required power and transmits it to the driver module. Commands to the communication module come from the remote controller.

For communication between the remote controller and the model, the six-channel radio communication module with a range of up to 100 meters is used.

The radio module receives a radio signal from the remote controller at 2.4 GHz. Communication with the control device is performed via the SPI interface.

The motor drivers module consists of four full-bridge drivers that receive a PWM signal with a variable pulse width, depending on the required motor power. Depending on the input signal of the motors, the driver adjusts the voltage applied to the motors.

The video surveillance module is built on the basis of a router and two IP cameras. The cameras and the router are connected by a network cable, which increases the data transfer rate and reduces the transmission delay time, compared to the wireless connection. Video from cameras, can be received thru connection with an external device (laptop, phone, tablet) to the WI-FI network of the router.

The power module consists of two 18650 lithium battery packs (each unit includes five batteries) having a maximum voltage of 21 V and a total current of 20 A. It is possible to use other types of batteries depending on environmental conditions.

The model uses low-speed DC motors operating in the range from 9 to 20 V and consuming up to 20 A.

The remote controller (Figure 5) is used for control of the model. The controller is a joystick with proportional control of the movers, as well as adjustment of the power of the model's motors. In addition, the remote controller is equipped with a backlight.



Figure 5 – The remote controller

As it was said above, video from the front and side cameras can be broadcasted to a smartphone, tablet, laptop or other portable device (Figure 6).



Figure 6 – Capture the video stream from the front camera

### **The results of the running tests**

Series of the running tests of the model were carried out. The tests were performed in various conditions (broken ice, deep snow, frozen soil, clay, etc.). Fragments of the tests are shown in Figure 7.



a)



b)



c)



d)

Figure 7 – The running tests of the model  
 a) motion among broken ice; b) motion on deep snow;  
 c) motion on deep soil; d) steep incline overcoming

The results of the tests are presented in Table 2.

Table 2. Results of the running tests

Velocity, m/sec:	
– deep snow	0,55
– broken ice	0,42
– soil	0,22
– rigid surface (side motion)	2,2
Maximum incline, degrees	50
Height of obstacles, mm	60-130
Radio signal distance, meters	70
Work time, minutes	20-40

### Conclusion

The concept of the multi-jointed robotic platform for carrying out prospecting and exploration work in an emergency mine was described. Also, the paper described the construction and the control system of the model of the robotic platform. The model was developed by an initiative group consisting of postgraduates, masters and senior students of the NNSTU named after R.E. Alekseev.

Tests of the model allowed to check technical solutions and estimate various parameters (speed, operating time, range, etc.). Tests showed that for the most efficient functioning it is necessary to carry out structural modification of some elements of the construction of the model. One of the main modifications is the increase of the rotary-screw mover diameter and a change in the geometry of the blade the mover. This modification is designed to increase the performance of the platform, and reduce the amount of motion resistance. Also, it is required to refine the control system for stabilization of the motion trajectory in the case of rectilinear motion.

The stabilization can be achieved thanks to the synchronization of the rotational speeds of the movers. Nevertheless, the tests showed the viability of the accepted technical solutions and their possibility of use for solving reconnaissance problems in extreme conditions of coal mines.

The further stage in the development of the project will be the creation of the model of the second module, as well as an active joint, the development of a control system for them.

*А.А. Кошурина<sup>1</sup>, В.Е. Гай<sup>2</sup>, Р.А. Дорофеев<sup>3</sup>, Е.М. Хапилов<sup>4</sup>, С.С. Бобко<sup>5</sup>*

## **РАЗРАБОТКА РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ ПОИСКОВО-СПАСАТЕЛЬНЫХ РАБОТ В АВАРИЙНЫХ ШАХТАХ**

*НГТУ им. П.Е. Алексеева, НОЦ «Транспорт», Нижний Новгород, <sup>1</sup>allakoshurina@yandex.ru, <sup>2</sup>iamuser@inbox.ru, <sup>3</sup>blonde-o@yandex.ru, <sup>4</sup>evgen.ref12@gmail.com, <sup>5</sup>d.o.o.m.e.r@mail.ru*

### **Аннотация**

В данной работе представлена концепция создания многозвенной робототехнической платформы для проведения поисково-спасательных работ в условиях аварийных шахт. Разрабатываемое робототехническое средство направлено на минимизацию степени риска для жизни и здоровья спасателей при проведении первичных работ в аварийных шахтах. В работе приводится конструкция и схема системы управления созданного ходового макета одного звена разрабатываемой робототехнической платформы. Ходовой макет предназначен для отработки систем дистанционного управления и технического зрения, а также принятых конструктивных решений, с целью поиска наиболее оптимальных для условий аварийных шахт. Приводятся результаты ходовых испытаний макета. В заключении делается вывод о применимости выбранных технических решений, а также планы по дальнейшему развитию проекта.

Ключевые слова: аварийная шахта, спасение, чрезвычайная ситуация, система дистанционного управления, безлюдные технологии, техническое зрение, многозвенность, роторно-винтовой движитель, аддитивные технологии.

### **Введение**

Актуальность проекта по созданию робототехнических средств и мобильных подвижных роботов специального назначения связана с выполнением аварийно-спасательных работ, представляющих опасность для жизни человека. Первостепенной целью данных проектов является минимизация степени риска для спасателей при проведении разведывательных, поисковых и спасательных операций в шахтах. Поставленная цель может быть эффективно достигнута только за счет использования технических средств, создаваемых с применением безлюдных технологий.

Последствия аварий в горных шахтах несут опасность не только шахтерам, оказавшимся заблокированными в разрушенной шахте, но и тем, кто пытается освободить их. Успех любой спасательной операции напрямую зависит от времени ее проведения. Поэтому в качестве решения проблемы проведения безопасных и эффективных поисково-спасательных операций в аварийных шахтах предлагается подземное многозвенное робототехническое средство.

Разрабатываемое многозвенное робототехническое средство предназначено для проведения разведывательных, спасательных и поисковых операций для ликвидации последствий аварий в шахтах. Потенциальной потребителями робототехнического средства могут быть аварийно-спасательные службы, службы ГО и ЧС.

### **Описание концепции**

Многозвенное робототехническое средство представляет из себя платформу, состоящую из трех или более сочлененных модулей с роторно-винтовым движителем (рисунок 1).

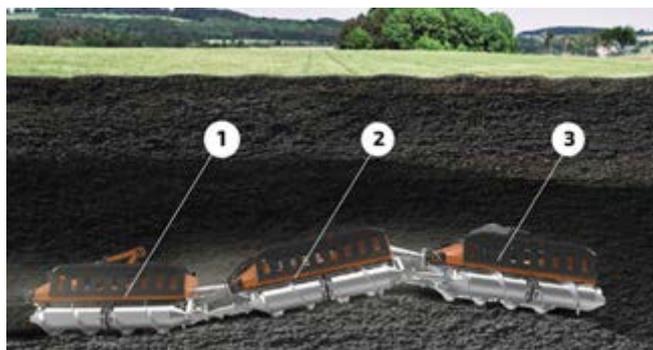


Рисунок 1 – Концепция многозвенного робототехнического средства

Каждый модуль отвечает за выполнение определенной задачи:

- первый модуль осуществляет отбор проб грунта в зоне проведения работ при помощи пробоотборника, а также визуальное и приборное нахождение очагов горения при помощи тепловизора с лазерным дальномером;

- второй модуль несет на себе оборудование для проведения постоянного газово-химического контроля в зоне работ, а также дополнительные аккумуляторные батареи;

- третий модуль несет на себе катушку с кабелем системы дистанционного управления. Катушка оснащена индивидуальным приводом, осуществляющим сматывание/разматывание кабеля, для минимизации сопротивления движения робототехнического средства;

- дополнительные модули могут оснащаться дополнительным оборудованием или же дублировать функции первых трех модулей, повышая общий уровень живучести робототехнического средства.

Каждый модуль оснащается несколькими камерами для осуществления кругового обзора и непрерывного мониторинга обстановки в зоне работ.

### Состояние проекта

В настоящее время создан ходовой макет одного звена подземного многозвенного робототехнического средства (рисунок 2).



Рисунок 2 – Внешний вид ходового макета звена робототехнического средства

Ходовой макет предназначен для отработки систем дистанционного управления и технического зрения, а также принятых конструктивных решений, с целью поиска наиболее оптимальных для условий аварийных шахт. Макет может быть оборудован двумя и более RGB или ИК камерами, а также датчиками для мониторинга состояния окружающей среды (температура, влажность, загазованность и т.д.). Конструкция позволяет устанавливать на макет роторно-винтовые движители с различной конфигурацией, выполненные из различных материалов (сталь, пластик, резина).

На рисунке 3 показано устройство ходового макета.



Рисунок 3 – Устройство ходового макета звена робототехнического средства

Где: 1– роторно-винтовые движители; 2 – корпус; 3 – мотор-редуктор; 4 – модуль драйверов двигателей; 5 – модуль связи; 6 – АКБ; 7, 8 – камеры.

Макет изготавливался с применением современных технологий быстрого прототипирования (3D печать, применение композитных материалов). Краткие технические характеристики ходового макета представлены в таблице 1.

Таблица 1. Краткие технические характеристики ходового макета

Размеры (ДхШхВ), мм	700x650x180/250
Масса, кг	16
Тип и материал движителя	роторно-винтовой, ABS пластик
Клиренс, мм	45/115
Материал корпуса	стеклопластик
Управление ходовым макетом	Беспроводное, радиоканал
Электродвигатель	Коллекторный, 25Нм
Трансмиссия	Двухступенчатый планетарный редуктор
Тип и емкость АКБ	Li-Ion, 6.6Ач
Техническое зрение	Две RGB IP камеры

### Система управления ходового макета

На рисунке 4 изображена модульная схема системы управления ходовым макетом.

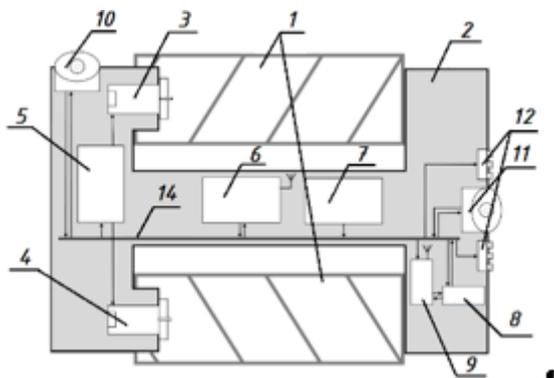


Рисунок 4 – Схема системы управления ходовым макетом

Где: 1– роторно-винтовые движители; 2 – корпус; 3 – мотор-редуктор левого борта; 4 – мотор-редуктор правого борта; 5 – модуль драйверов двигателей; 6 – маршрутизатор; 7 – модуль

аккумуляторов; 8 – модуль управления; 9 – радиомодуль; 10 – камера бортовая; 11 – камера фронтальная; 12 – фронтальное освещение.

В схеме присутствуют следующие модули: модуль связи, модуль управления, модуль драйверов, модуль видеонаблюдения, модуль аккумуляторов, два двигателя, элементы системы освещения.

В качестве устройства управления используется микроконтроллер, который формирует управляющий широтно-импульсно модулированный сигнал (ШИМ-сигнал), передаваемый исполнительному устройству. Микроконтроллер получает сигнал от модуля связи, используя SPI интерфейс, формирует ШИМ сигнал, в зависимости от необходимой мощности и передает его модулю драйверов. Команды на модуль связи поступают от пульта управления платформой.

Для организации связи между пультом управления и платформой используется шестиканальный модуль радиосвязи с дальность действия до 100 метров. Модуль радиосвязи принимает радиосигнал с пульта управления на частоте 2.4 ГГц. Связь с устройством управления выполняется по интерфейсу SPI.

В состав модуля драйвера двигателей входят четыре полномостовых драйвера, которые принимают ШИМ-сигнал с изменяющейся шириной импульса, в зависимости от необходимой мощности двигателя. В зависимости от входящего сигнала двигателей драйвер регулирует напряжение, подаваемое на двигатели.

Модуль видеонаблюдения построен на основе маршрутизатора и двух IP-камер. Камеры и маршрутизатор соединены сетевым кабелем, что увеличивает скорость передачи данных и уменьшает время задержки передачи информации, по сравнению с беспроводным соединением. Для получения видеосигнала с камер необходимо подключение с внешнего устройства (ноутбук, телефон, планшет) к WI-FI сети роутера.

Модуль питания состоит из двух блоков литиевых аккумуляторов форм-фактора 18650 (каждый блок включает пять аккумуляторов), имеющие максимальное напряжение 21 В и общий ток 20 А. Возможно использование других типов аккумуляторов в зависимости от условий окружающей среды.

Ходовой макет использует низкооборотистые двигатели постоянного напряжения, работающие в диапазоне от 9 до 20 В и потребляющие до 20 А.

Для управления ходовым макетом используется пульт управления (рисунок 5), представляющий из себя джойстик с пропорциональным управлением движителями, а также регулировкой мощности электродвигателей ходового макета. Дополнительно пульт оснащается подсветкой.



Рисунок 5 – Пульт управления ходовым макетом

Как было сказано выше, видео с фронтальной и бортовой камер может транслироваться, на смартфон, планшет, ноутбук или другое портативное устройство (рисунок 6).



Рисунок 6 – Захват видеопотока с фронтальной камеры

## Результаты испытаний ходового макета

Был проведен ряд ходовых испытаний макета в различных условиях (битый лед, глубокий снег, мерзлый грунт, глина и др.). Фрагменты испытаний показаны на рисунке 7.



а)



б)



в)



г)

Рисунок 7 – Ходовые испытания макета  
 а) движение в битом льду; б) движение в глубоком снегу;  
 в) движение по грунту; г) преодоление уклона

Результаты испытаний платформы сведены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты испытаний ходового макета

Скорость движения, м/с:	
– по глубокому снегу	0,55
– по битому льду	0,42
– по грунту	0,22
– по твердому основанию (движение боком)	2,2
Максимально преодолеваемый подъем, град.	50
Высота преодолеваемых препятствий, мм	60
Максимальная дальность действия радиосвязи, м	70
Время эффективного функционирования, мин.	20-40

### Заключение

В работе описана концепция создания робототехнической платформы для проведения поисково-разведывательных работ в аварийной шахте. Также в работе описывается конструкция и устройство системы управления ходового макета звена робототехнической платформы, макет разрабатывался инициативной группой, состоящей из аспирантов, магистров и студентов старших курсов НГТУ им. Р.Е. Алексеева.

Испытания ходового макета позволили апробировать технические решения и оценить различные параметры (скорость, время работы, дальность действия и т.д.). В ходе испытаний выяснилось, что для

наибольшей эффективности функционирования необходимо провести конструктивную доработку некоторых элементов конструкции ходового макета. Одной из основных доработок является увеличение диаметра базового цилиндра и изменение геометрии лопасти роторно-винтовых движителей. Данная доработка призвана увеличить показатели проходимости платформы, а также уменьшить величину сопротивления движения. Также требуется доработка системы управления на предмет стабилизации траектории при прямолинейном движении за счет синхронизации скоростей вращения движителей. Тем не менее, проведенные испытания показали жизнеспособность платформы и возможность её использования для решения задач разведки в условиях техногенных катастроф и экстремальных условиях.

Дальнейшим этапом развития проекта станет создание ходового макета еще одного звена, а также узла активного сочленения, разработка системы управления к ним.

*R.S. Mukhin, A.V. Polin*

## **SPECIALIZED END EFFECTOR FOR SPACE MANIPULATION SYSTEM**

*SPbPU, Saint-Petersburg*

### **Abstract**

The paper considers the variants specialized end effector for space manipulation system, requirements for the construction of the specialized end effector are formed. Research tests were conducted on the interaction between the specialized end effector and the base point. The construction of the specialized end effector are proposed.

**Keywords:** Specialized end effector for space manipulation system, base point, rigging element, space manipulation system, testing stand.

1. Rocket and space technology, Proceedings of RCC Energia. Series XII. Issue 1-2 / Ed. M. Yu. Belyaeva - Korolev, 2015.
2. Cup Type Component Sets & Housed Units. CSF & CSG Series. Harmonic Drive gear [Electronic resource]. URL: [http://www.harmonicdrive.net/\\_hd/content/catalogs/pdf/csf-csg-catalog.pdf](http://www.harmonicdrive.net/_hd/content/catalogs/pdf/csf-csg-catalog.pdf) (date of the application: 15.09.2017).
3. Servo kits ILM. Product information. [Electronic resource]. URL: <https://www.robodrive.com/fileadmin/Webdata/Uploads/Downloadbereich/Englisch/RoboDrive-Product-Info-EN-Servo-Kit-ILM.pdf> date of the application: 15.09.2017).
4. RESA absolute angle encoder [Electronic resource]. URL: <http://www.renishaw.com/en/resolute-etr-absolute-encoder-system-with-resa-rotary-angle-ring--11042> (date of the application: 15.09.2017).
5. Industry standard 92-5051-88 Lubricating materials. Stamps allowed for use (with Change N 1).

*Р.С. Мухин, А.В. Полин*

## **СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЕ ЗАХВАТНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ МАНИПУЛЯТОРА КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

*ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург. E-mail: r.muhin@rtc.ru, polin@rtc.ru*

### **Аннотация**

В работе рассмотрены варианты имеющихся конструкций специализированных захватных устройств космического назначения. Сформированы требования к конструкции захватного устройства. Проведены исследовательские испытания взаимодействия макета предлагаемого захватного устройства с базовой точкой. Произведена конструктивная проработка предлагаемого решения.

**Ключевые слова:** Специализированное захватное устройство, базовая точка, такелажный элемент, манипулятор космического назначения, испытательный стенд.

### **Введение**

Захватные устройства (ЗУ) являются важнейшим элементом большинства космических манипуляторов. Они по большей части схожи со стыковочными устройствами космических аппаратов,

в отличие от привычных ЗУ промышленных роботов, что обусловлено рядом требований, которые ставятся перед такими манипуляционными системами:

- манипулятор должен производить захват, удержание, разворачивание и освобождение свободнолетающих космических аппаратов;

- выполнять сборочно-разборочные операции на орбите, обеспечивать опорную площадку для космонавтов при их внекорабельной деятельности (ВКД);

- ЗУ в зафиксированном состоянии должно обеспечивать надёжную фиксацию без проскальзывания и люфтов;

- ЗУ должно обеспечивать захват ТЭ при наличии погрешностей позиционирования и ориентации.

ЗУ является активным элементом системы, и, как правило, крепится на внешнем звене манипулятора. Пассивным элементом является ответный ТЭ или базовая точка (БТ), которые крепятся на полезной нагрузке (ПН), корпусе космической станции и т.д.

В процессе работы манипулятор с ЗУ, управляемый системой сближения и ориентации, с определённой скоростью и допустимым взаимным рассогласованием доводится до ответного элемента. С этого момента начинается процесс стыковки, который завершается жёстким соединением стыковочных узлов. После окончания работ с ПН происходит процесс расстыковки путём освобождения механических связей и расталкивания элементов.

*Цель работы* – разработка конструкторского решения СЗУ для МКН

### **Исходные данные и требования к СЗУ**

Свойства зафиксированного состояния:

- в зафиксированном состоянии обеспечивается надёжная фиксация без проскальзывания и люфтов;

- фиксация должна обеспечивать однозначность положения ЗУ относительно ТЭ с точностью до конечного числа дискретных положений;

- фиксация должна обеспечиваться при потере питания и сохраняться неограниченно долго.

Свойства процесса стыковки и расстыковки:

- система стыковки ЗУ должна обеспечивать захват ТЭ при наличии погрешностей позиционирования и ориентации;

- погрешности позиционирования и ориентации не должны превышать  $10^\circ$  угловых рассогласований (крен, тангаж, рыскание), 10 мм линейных рассогласований;

- система стыковки ЗУ должна обеспечивать стыковку при отклонении сил и моментов стыковки от оптимального направления;

- если процесс стыковки сопровождается (независимо от самой процедуры стыковки) перемещением ЗУ манипулятором, то элементы устройства ЗУ не должны препятствовать такому перемещению вплоть до остановки движения или достижения контакта с ТЭ, когда такое движение станет невозможным;

- для осуществления электрической стыковки электроразъёмов РП10-11 необходимо поступательное перемещение на последнем этапе стыковки размером 8 мм;

- величина усилий, развиваемых манипулятором, не превышает 50 Н.

- процесс расстыковки не должен включать фазу совместного движения манипулятора и стыковочных механизмов ЗУ;

- система ЗУ должна обеспечивать расстыковку при наличии паразитных напряжений/усилий на ЗУ (манипулятор был состыкован в напряжённом состоянии);

если в конструкции ЗУ и ТЭ имеются положения, в которых возможно заклинивание при перемещении или наличии силовых воздействий/остаточных напряжений, то на конечной стадии расстыковки система ЗУ должна расстыковать ЗУ и ТЭ до состояния, где заклинивание невозможно.

### **Разработка конструкторского решения**

Предлагаемая схема СЗУ представлена на рисунке 1.

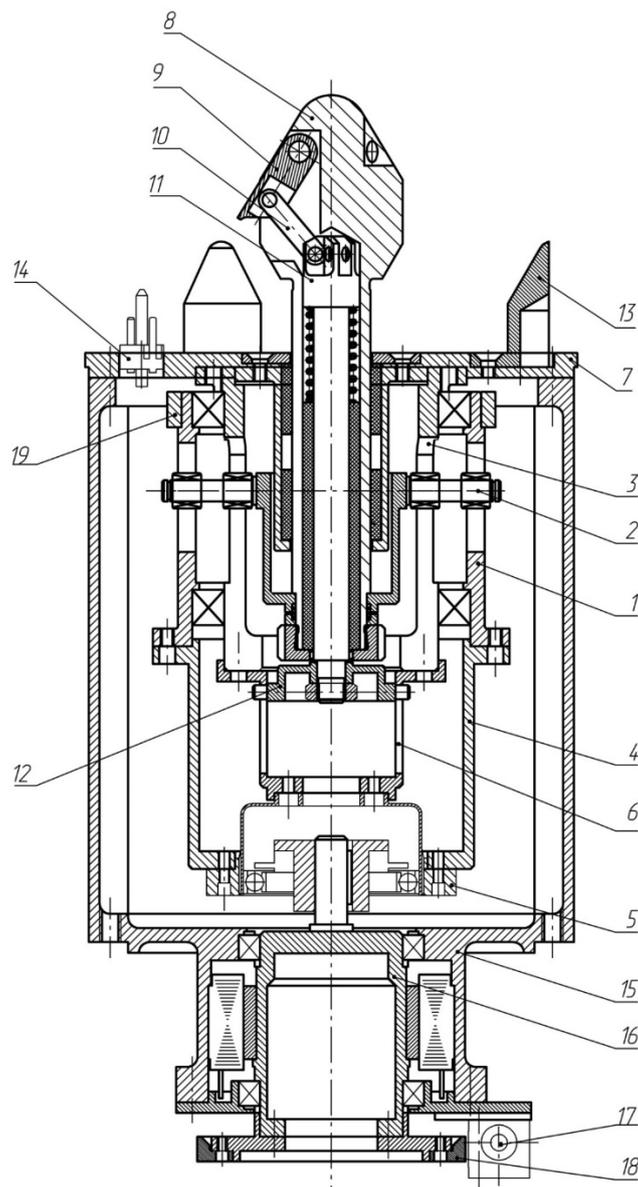


Рисунок 7 – Общий вид активной части СЗУ

Втулка с двумя винтовыми пазами с переменным углом подъема 1 приводит в движение пальцевую втулку с игольчатыми подшипниками 2. Втулка с двумя линейными пазами 3, жестко закрепленная к корпусу 7, препятствует повороту пальцевой втулки 2. Таким образом, вращательное движение втулки 1 преобразуется в поступательное движение втулки 2. Вращение передается через втулку 4 от волнового редуктора 5. С жесткого колеса редуктора снимается крутящий момент, гибкое колесо заторможено.

Пальцевая втулка 2 жестко связана с головкой захвата 8. Внутри головки захвата расположен подпружиненный шток 11, с помощью которого ведется управление тремя защелками 9 через тяги 10. На конце штока расположен стопор 12, необходимый для реализации фазы расстыковки. Стопор 12 линейно перемещается внутри втулки 6, жестко связанной с корпусом 7.

На лицевой стороне корпуса расположены три выравнивающих лепестка 13 и три вилки 14 электроразъема РП10-11.

Статор электродвигателя 15 жестко связан с корпусом 7. Ротор 16 передает вращение на волновой генератор редуктора. Управление двигателем ведется с помощью датчика положения ротора, состоящего из кольца с рисками 18 и считывающей головки 17. Положение втулки 1 можно характеризовать с помощью профильного кольца 19, управляющего тремя микропереключателями.

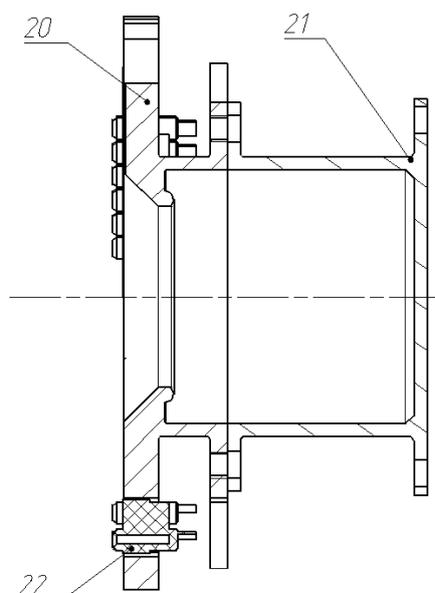


Рисунок 8 – Общий вид БТ

Базовая точка состоит из лицевого фланца 20, жестко связанного со стаканом 21. На лицевом фланце расположены три розетки 22 электроразъема РП10-11 и три выравнивающих паза 23.

На рисунке 3,а) показана развертка винтового паза с переменным углом подъема втулки 1, где продемонстрированы три ключевых положения пальцевой втулки и, соответственно, рабочей части СЗУ: «ЗУ открыто», «готовность к захвату», «ЗУ закрыто».

Габаритные размеры СЗУ: диаметр - 138 мм, осевой габарит в положении «готовность к захвату» – 230 мм.

Габаритные размеры БТ: диаметр – 138 мм, осевой габарит – 70 мм.

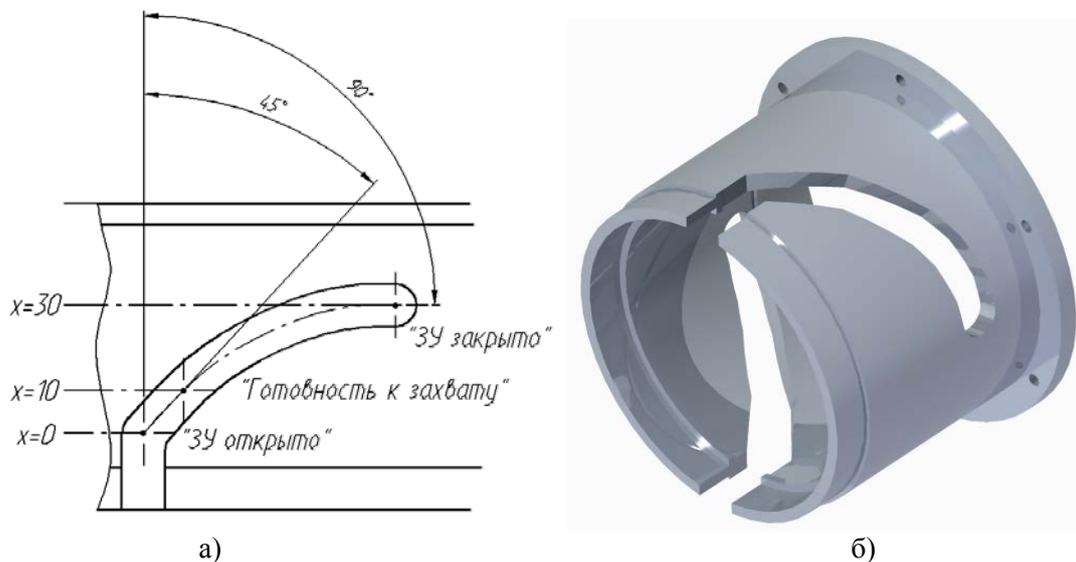


Рисунок 9 – Втулка с винтовыми пазами (а) – развертка винтового паза, б) – CAD-модель втулки)

На рисунках 10 – 12 в упрощенном виде показаны этапы взаимодействия СЗУ с БТ.

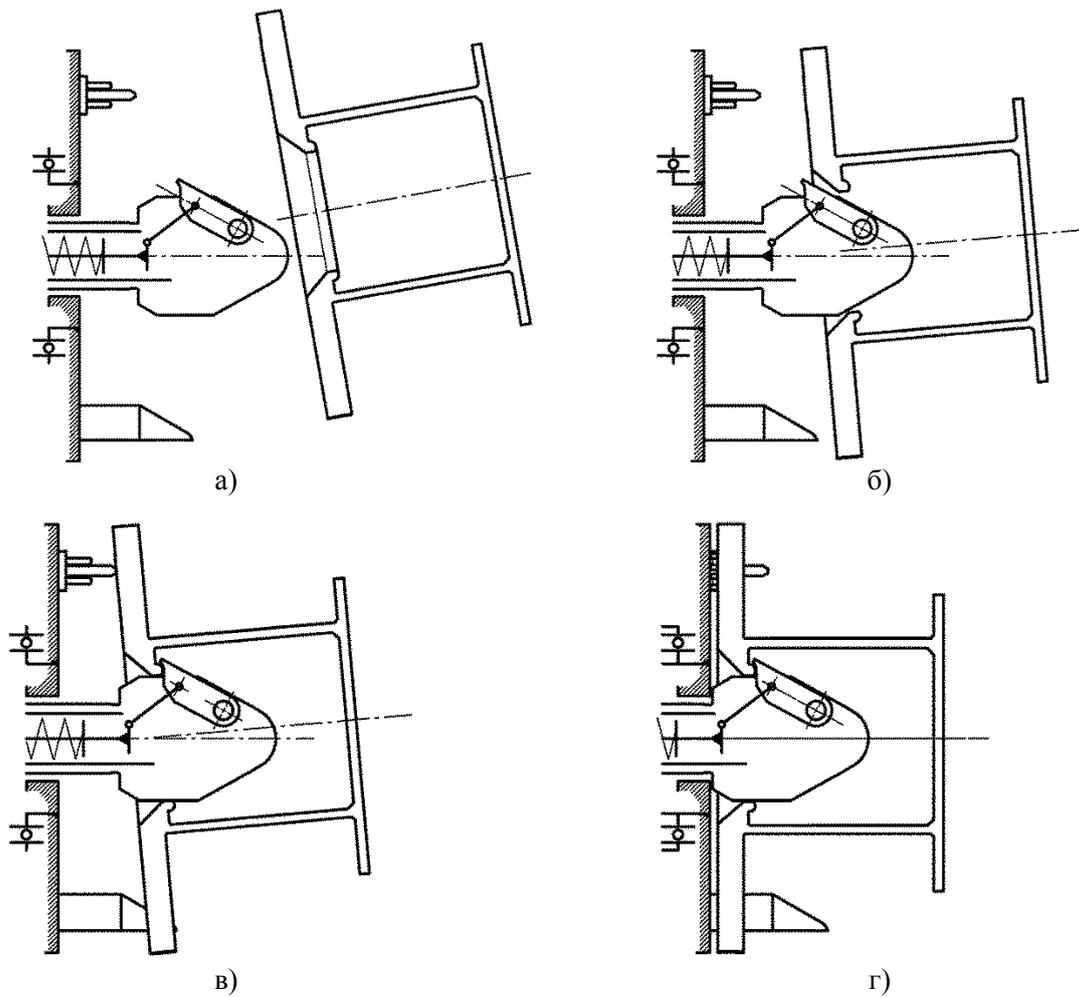


Рисунок 10 – Этапы стыковки СЗУ с БТ ( а), б) – подход с взаимным рассогласованием, в) – предзахват БТ, г) – фиксация БТ)

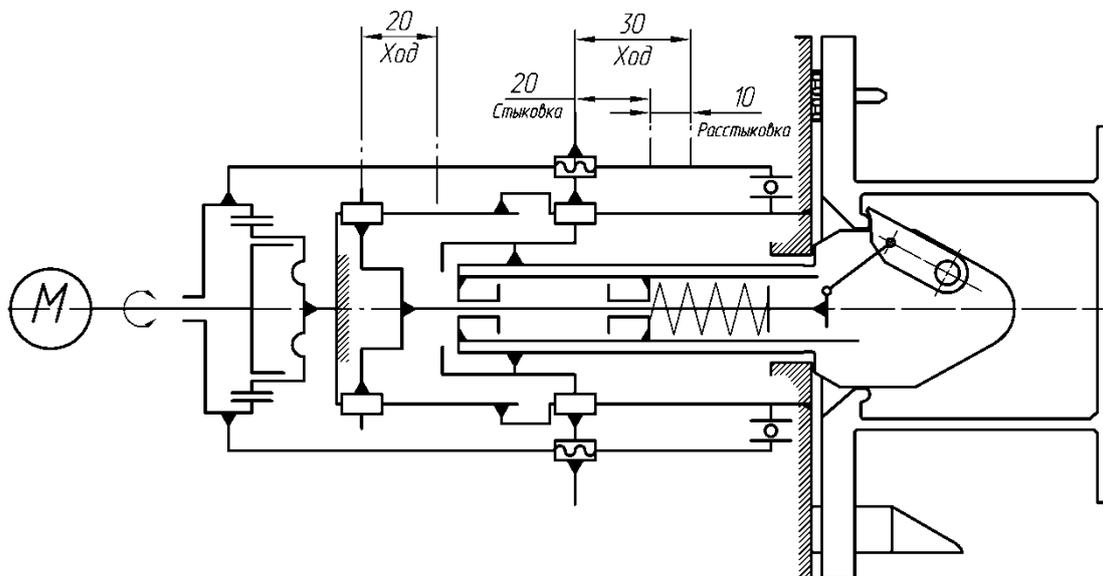


Рисунок 11 – Смещение втулки с пальцами и стопора относительно положения «готовность к захвату» во время фиксации БТ

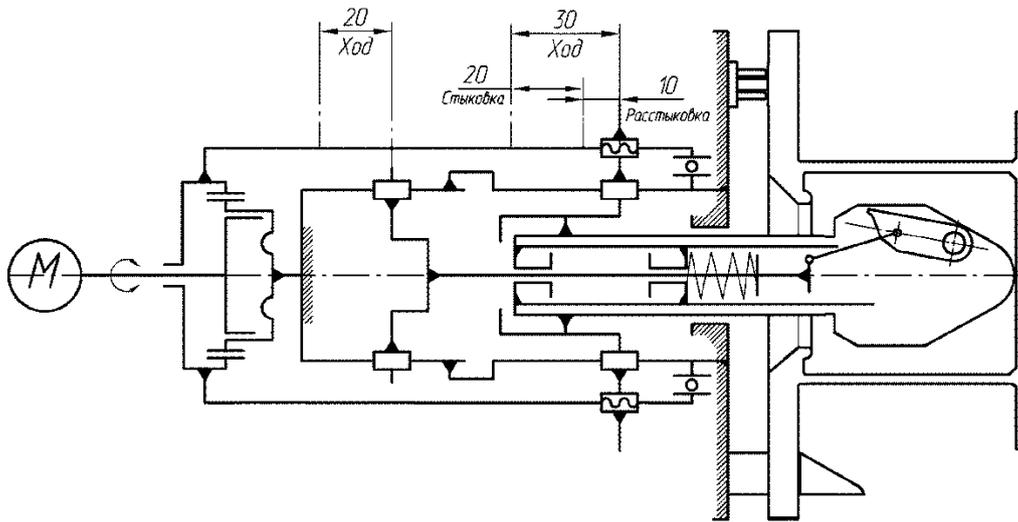


Рисунок 12 – Смещение втулки с пальцами относительно положения «готовность к захвату» во время расстыковки

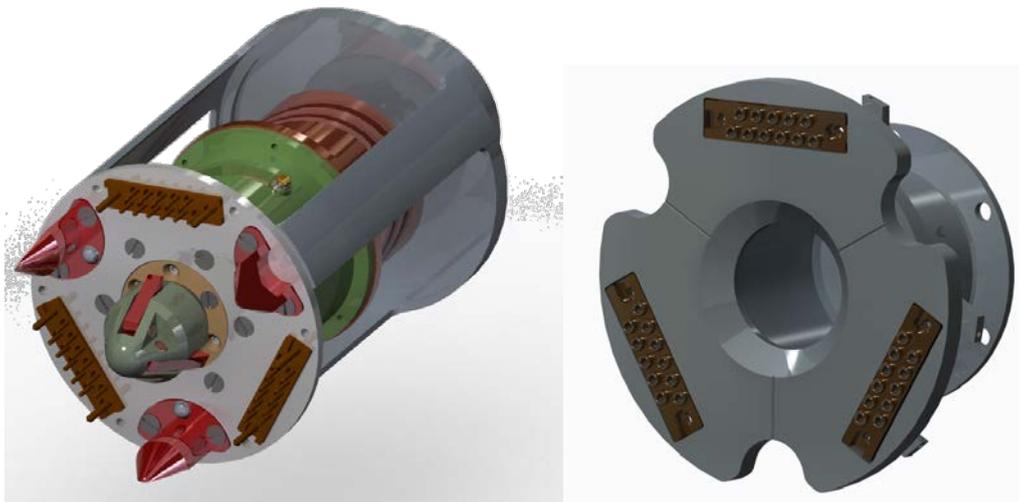


Рисунок 13 – CAD-модель СЗУ и БТ

#### Редуктор

В качестве редуктора выбран малогабаритный волновой редуктор CSF-20-160-2A-GR компании Harmonic Drive (рисунок 14).

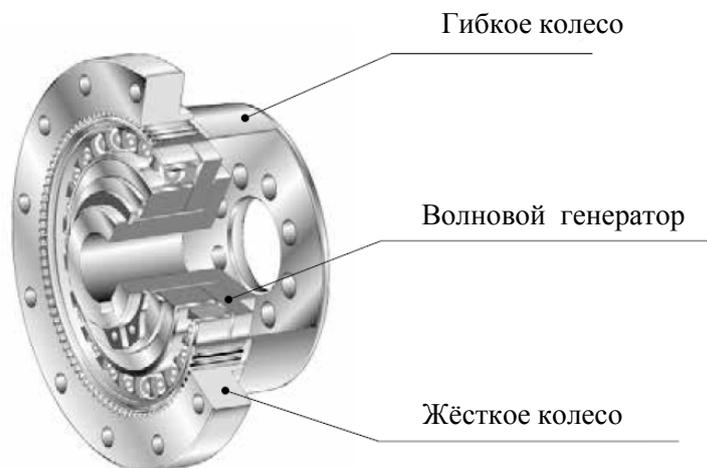


Рисунок 14 – Малогабаритный волновой редуктор серии CSF

Характеристики редуктора [2]:

- внешний диаметр жесткого колеса 70 мм;
- диаметр крепежных отверстий жесткого колеса 60 мм;
- внешний диаметр гибкого колеса 51 мм;
- диаметр крепежных отверстий гибкого колеса 24 мм;
- осевой габарит 34 мм;
- номинальный крутящий момент при 2000 об/мин равен 40 Н·м;
- максимальный повторяющийся пиковый крутящий момент 92 Н·м;
- максимальный средний крутящий момент 49 Н·м;
- максимальный мгновенный пиковый момент 147 Н·м.

Передаточное отношение редуктора зависит от способа снятия крутящего момента. В нашем случае стопорится гибкое колесо, а момент снимается с жесткого колеса (рисунок 15), связанного с втулкой с винтовыми пазами.

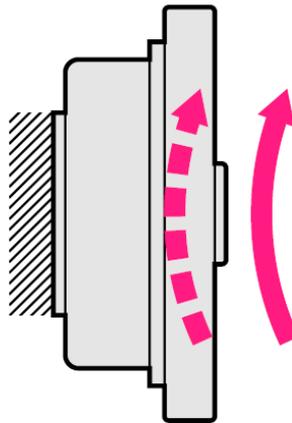


Рисунок 15 – Вариант снятия крутящего момента

При таком способе снятия крутящего момента передаточное число  $i = 161$ .

*Электродвигатель*

В качестве двигателя выбран малогабаритный бесколлекторный двигатель ILM 70x18 компании RoboDrive (рисунок 16).



Рисунок 16 – Двигатель ILM 70x18

Характеристики двигателя [3]:

- мощность 275 Вт;
- номинальный момент 1,25 Н·м;
- пиковый момент 4 Н·м;
- максимальная скорость 2000 об/мин;
- КПД 90%;
- внешний диаметр статора 69 мм;
- внутренний диаметр ротора 42 мм;

– масса 0,34 кг.

*Датчик положения ротора*

Датчик положения ротора состоит из двух основных частей (рисунок 17):

- кольцо с рисками Resa 30U SA 075 B;
- считывающей головки RA 26B VA 115B 30V.



Рисунок 17 – Датчик положения ротора

Характеристики датчика [4]:

- точность градуировки кольца  $\pm 3,82'$ ;
- разрешение энкодера 0,019°;
- масса кольца 0,07 кг;
- масса считывающей головки 0,019 кг.

Таким образом, угол поворота ротора двигателя можно привести к перемещению головки штыря через *i* волновой передачи и угла поворота втулки с пазами.

*Микропереключатели МП12*

Микропереключатели характеризуют информацию о положении головки штыря СЗУ.

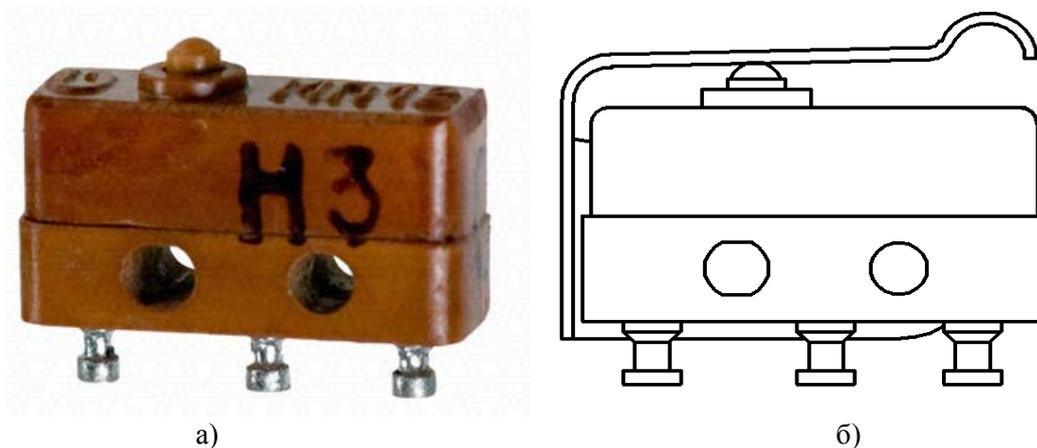


Рисунок 18 – Микропереключатель МП12 ( а) – внешний вид без лапки, б) – схематичное изображение с лапкой)

Срабатывание микропереключателей МП12 инициируется профилированным кольцом (рисунок 19), закрепленным на втулке. Микропереключатель крепится к неподвижному корпусу, кольцо при повороте втулки наезжает на лапку, тем самым характеризуя положение втулки. В таблице 2 показаны положения, которым соответствуют значения, снимаемые с датчиков («1» – лапка нажата, «0» – лапка отпущена).

Таблица 2. Состояния датчиков S1–S3, соответствующие положениям СЗУ

Положение	S1	S2	S3	Угол поворота кольца
«ЗУ открыто»	1	0	0	0°
«Готовность к захвату»	0	1	0	13°20'
«ЗУ закрыто»	0	0	1	78°24'
Промежуточное положение	0	0	0	–

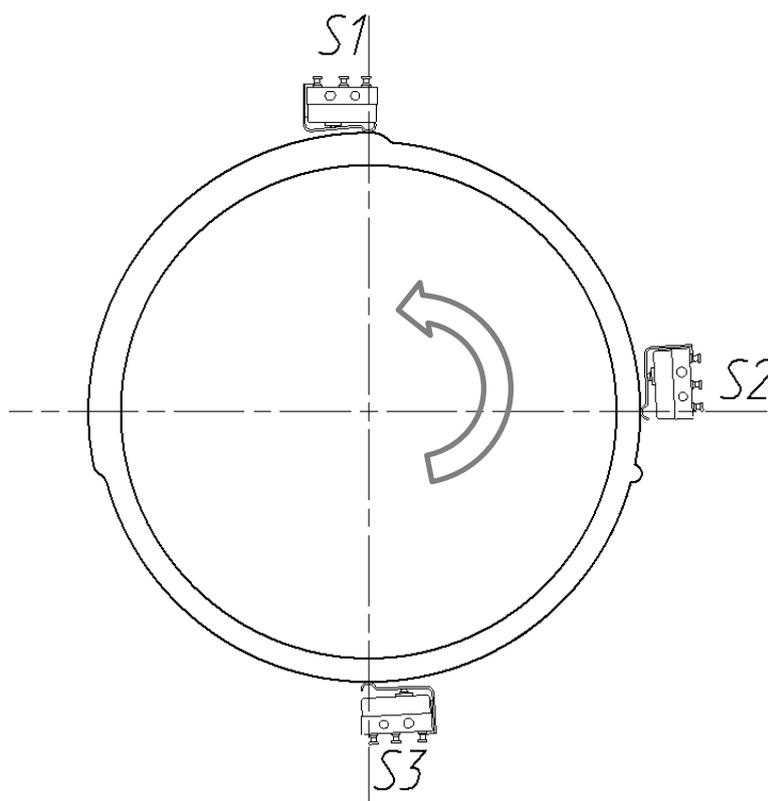


Рисунок 19 – Состояния датчиков, характеризующих положение «ЗУ открыто»

#### *Антифрикционная смазка*

В качестве смазки выбрана антифрикционная низкотемпературная вакуумная смазка «НИКА». Состоит из перфторполиэфира, загущенного в политетрафторэтилене, с добавлением стабилизирующей антикоррозионной присадки [5]. Применяется в вакууме при температурах от (минус) 100 до 160 °С. Испаряемость смазки за час не превышает 6 процентов при рабочей температуре 160 °С. Коэффициент трения  $\mu=0,1$ .

#### **Испытания макета СЗУ**

Макет СЗУ (рисунок 20) состоит из корпуса, к которому тремя винтами жестко крепится головка захвата. Головка захвата удалена от корпуса на расстояние, соответствующее положению «готовность к захвату». На корпусе также расположены три выравнивающих лепестка и три вилки электроразъёма РП10-11. Макет БТ представляет собой корпус с закрепленными в нём тремя розетками электроразъёма РП10-11.

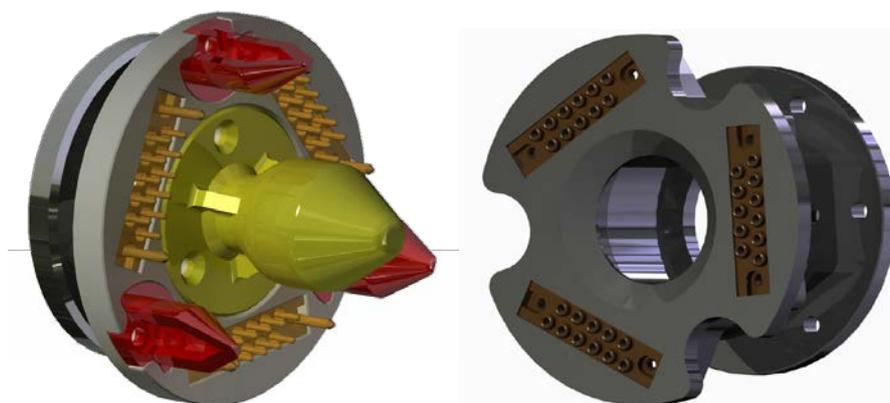


Рисунок 20 – Модель макета СЗУ и БТ

Макеты СЗУ и БТ изготовлены средствами быстрого прототипирования на 3D принтере PICASO DESIGNER pro 250.

Для анализа максимальных усилий стыковки/расстыковки при различных углах рассогласований СЗУ с БТ собран испытательный стенд, схема которого представлена на рисунке 21, а). На данном стенде происходило физическое моделирование взаимодействия жесткой модели манипулятора с закреплённым на нем СЗУ и БТ, закреплённой на неподвижной платформе. Ориентация платформы обеспечивала взаимное рассогласование СЗУ и БТ.

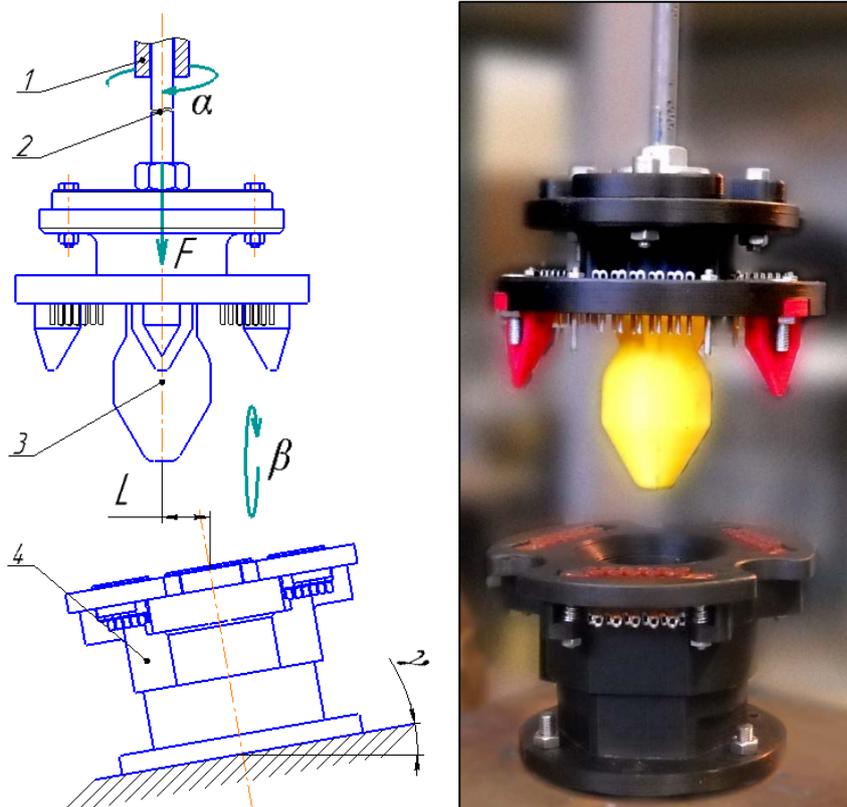


Рисунок 21 – Испытания СЗУ на стенде  
(а) – схема испытательного стенда, б) – внешний вид стенда)

В жёстко закреплённую направляющую 1 вставляется гибкий стержень 2 с заданной жёсткостью, образуя таким образом поступательную пару. На стержень жёстко крепится макет СЗУ 3.

БТ фиксируется на неподвижной опоре с заданными углами рассогласований по крену ( $\alpha$ ), тангажу ( $\beta$ ) и рысканию ( $\gamma$ ), а также с заданным линейным отклонением  $L$  от оси СЗУ. Под действием силы  $F$  СЗУ взаимодействует с БТ, и вследствие податливости стержня происходит совмещение стыков.

Для создания усилий стыковки использовался набор грузов разной массы, которые устанавливались на фланец крепления СЗУ к гибкому стержню.

Для определения усилий расстыковки и жесткостей гибкого стержня использовался пружинный и электронный динамометры.

Анализ стыковки СЗУ с БТ на стенде показал, что существуют такие положения, в которых величина усилия превышает требования ТТЗ к усилию, развиваемому манипулятором (усилие не должно превышать 50 Н) для осуществления фазы «Предзахват». Необходимые усилия для осуществления фазы «Предзахват» при суммарных погрешностях позиционирования  $\alpha \leq 5^\circ$ ,  $\beta \leq 5^\circ$ ,  $\gamma \leq 5^\circ$ ,  $L \leq 10$  мм не превышают требования ТТЗ к усилию, развиваемому манипулятором. В случае увеличения суммарных погрешностей позиционирования целесообразно ввести вторую группу пазов, управляющих механизмом стыковки электроразъёмов после фиксации БТ. Также анализ подтвердил необходимость собственного привода СЗУ для осуществления фиксации БТ.

Анализ расстыковки подтвердил требование к оснащению СЗУ механизмом принудительной расстыковки.

#### *Отработка стыковки СЗУ с базовой точкой при ориентировании оператора по мишени*

Вторым этапом экспериментальной части являлась проверка стыковки макета на реальном манипуляторе, управление которым велось оператором по камере. В качестве манипулятора был выбран МКН КТМС (космическая транспортно-манипуляционная система), показанный на рисунке 22.

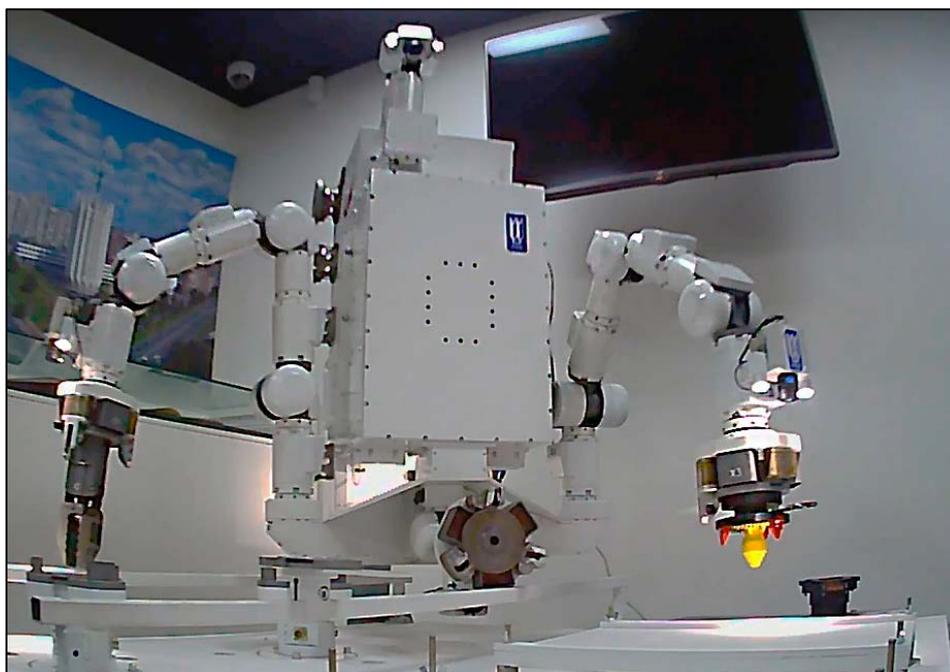


Рисунок 22 – КТМС с закрепленным на ней макетом СЗУ

Ориентирование велось по прицелу, закрепленному на СЗУ, и мишени, расположенной на БТ. На рисунке 23 показан вид с камеры оператора во время стыковки и тот же момент на съёмке сбоку.

Эксперимент подтвердил возможность стыковки макета СЗУ при управлении только по камере без какой-либо посторонней помощи, способность МКН КТМС осуществить стыковку/расстыковку электроразъёмов РП10-11 СЗУ собственным усилием при малых рассогласованиях СЗУ и БТ. По результатам эксперимента принято решение об удлинении цилиндрической части лепестков СЗУ на 10 мм.

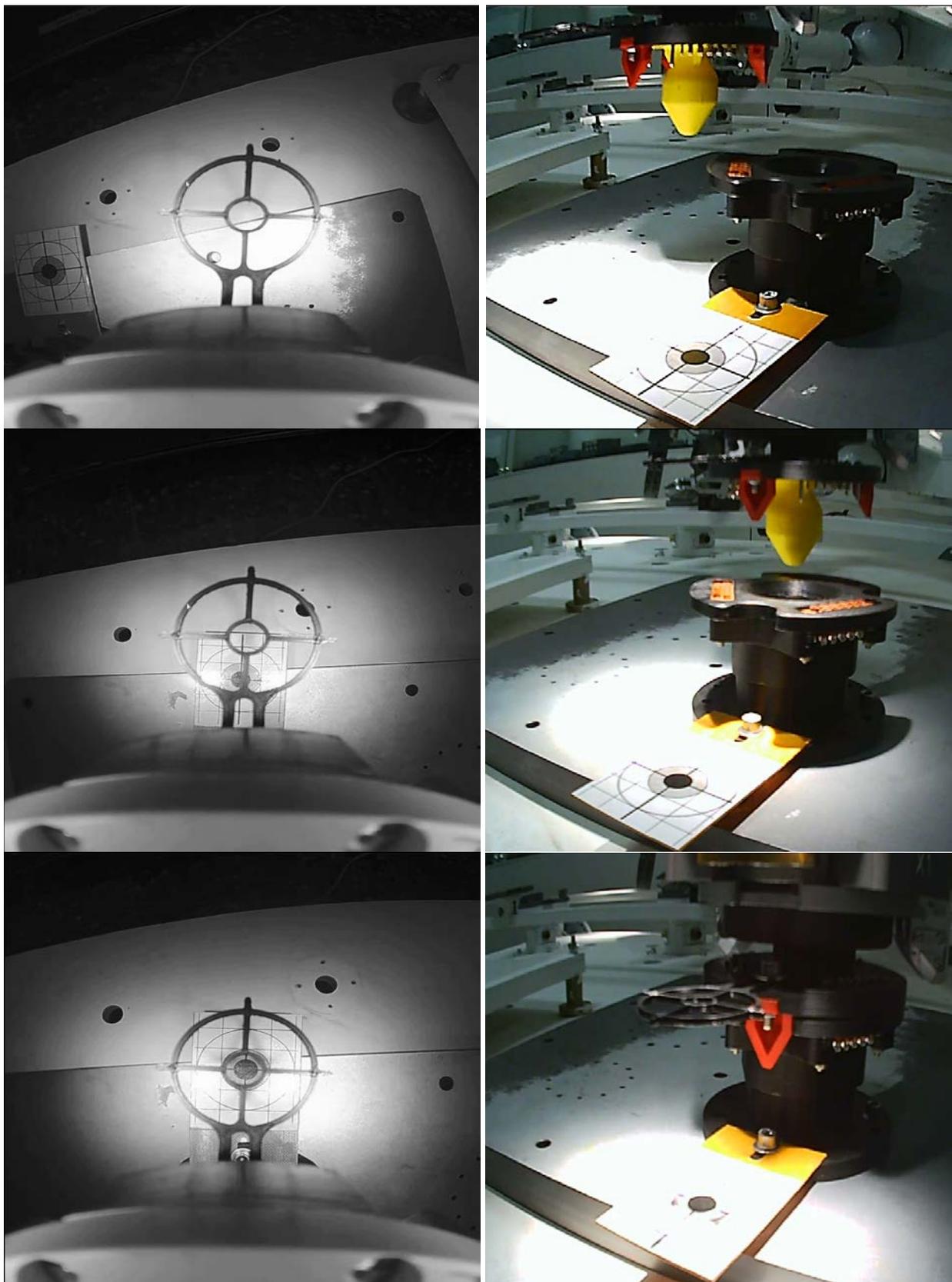


Рисунок 23 – Вид с камер при ориентировании оператором по мишени

1. Ракетно-космическая техника, Труды РКК «Энергия». Серия XII. Выпуск 1-2 / под ред. М. Ю. Беляева – Королёв, 2015.
2. Cup Type Component Sets & Housed Units. CSF & CSG Series. Harmonic Drive gear [Электронный ресурс]. URL: [http://www.harmonicdrive.net/\\_hd/content/catalogs/pdf/csf-csg-catalog.pdf](http://www.harmonicdrive.net/_hd/content/catalogs/pdf/csf-csg-catalog.pdf) (дата обращения: 15.09.2017).

3. Servo kits ILM. Product information. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.robodrive.com/fileadmin/Webdata/Uploads/Downloadbereich/Englisch/RoboDrive-Product-Info-EN-Servo-Kit-ILM.pdf> (дата обращения: 15.09.2017).
4. RESA absolute angle encoder [Электронный ресурс]. URL: <http://www.renishaw.com/en/resolute-etr-absolute-encoder-system-with-resa-rotary-angle-ring--11042> (дата обращения: 15.09.2017).
5. ОСТ 92-5051-88 Материалы смазочные. Марки, разрешенные к применению (с Изменением N 1).

*A.V. Yaskevich, I.E. Chernyshev*

## **DESIGNING OF PARALLEL MANIPULATOR FOR A NEW PERIPHERAL DOCKING MECHANISM**

*Energiya Rocket and Space Corporation  
Andrey.Yaskevich@rsce.ru*

### **Abstract**

The kinematical scheme and principle of operation of new peripheral docking mechanism based on Gough-Stewart platform are considered. Its main features is accumulation of kinetic energy of active spacecraft approach in platform rod springs without theirs recoil and damping. Platform kinematical model with singularity check, links 3D-contact model and special scanning algorithm are used for determination of docking mechanism workspace limited owing to possible but undesirable contacts. Then parameters of rod springs are selected for avoidance of all undesirable contacts in worst case with max value of kinetic energy of active spacecraft approach.

Keywords: spacecraft docking mechanism, Gough- Stewart platform, workspace, contact avoidance.

*A.B. Яскевич, И.Е. Чернышев*

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО МАНИПУЛЯТОРА НОВОГО ПЕРИФЕРИЙНОГО СТЫКОВОЧНОГО МЕХАНИЗМА**

*ПАО Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королева, г. Королев  
Andrey.Yaskevich@rsce.ru*

### **Аннотация**

Рассматривается кинематическая схема и принцип действия нового периферийного стыковочного механизма на основе платформы Гью-Стьюарта. Его основной особенностью является накопление кинетической энергии сближения активного корабля в пружинах штанг платформы без их отдачи и демпфирования. Кинематическая модель платформы с проверкой сингулярности, трехмерная контактная модель звеньев и специальный алгоритм сканирования используются для определения рабочего пространства стыковочного механизма, ограниченного возможными, но нежелательными контактами. После этого выбираются параметры пружин штанг для исключения нежелательных контактов в наихудшем случае с максимальной величиной кинетической энергии сближения активного космического аппарата.

Ключевые слова: стыковочный механизм космических аппаратов, платформа Гью-Стьюарта, рабочее пространство, предотвращение контактов

### **Введение**

Одной из ключевых технологий при создании пилотируемых космических комплексов является их сборка на орбите с использованием стыковочных агрегатов [1]. В последние годы ведущими национальными космическими агентствами при участии РКК «Энергия» и других компаний разработан международный стандарт систем стыковки IDSS [2], обеспечивающий возможность сотрудничества в перспективных космических программах. В соответствии с этим стандартом активную разработку перспективных систем стыковки ведут NASA, ESA, компании Boeing, SpaceX, QinetiQ. Основой IDSS стал интерфейс периферийного агрегата АПАС разработки РКК «Энергия», который предназначался для орбитального корабля «Буран», а эксплуатировался в основном на американских кораблях типа Space Shuttle. Стыковочный механизм (СтМ) этого агрегата был спроектирован для стыковки объектов

массой более 100 тонн с ярко выраженной асимметрией относительно оси сближения. Такое требование определило его кинематическую схему, в которой все шесть штанг параллельного манипулятора [3] – платформы Гью-Стьюарта (Gough-Stewart) [4, 5] связаны дифференциальными механизмами, обеспечивающими выделение отдельных компонент движения для их демпфирования устройствами соответствующей энергоемкости и ограничение рабочего пространства с помощью механических упоров [6]. Необходимая эффективность применяемых в этом СтМ электромагнитных демпферов достигается увеличением скорости вращения их валов за счет использования многоступенчатых редукторов с большими коэффициентами передачи. Эти особенности определили большую инерционность механизма, значительное усложнение его конструкции и большую трудоемкость изготовления. В соответствии с IDSS в ближайшие 30 лет все активные стыкуемые космические аппараты (КА) будут обладать свойством осевой симметрии, а их максимальная масса не будет превышать 30 тонн. То есть возможности существующего сложного СтМ АПАС значительно перекрывают требования международного стандарта. Поэтому в настоящее время в РКК «Энергия» ведется разработка нового, более простого периферийного СтМ, в котором, в отличие, например, от [7 – 9] для поглощения кинетической энергии сближения активного КА традиционно используются механические, наиболее надежные элементы и простое цикловое управление. В докладе рассматривается кинематическая схема этого механизма, а также модели и алгоритмы, используемые для расчета его параметров в зависимости от внешних проектных ограничений.

**Кинематическая схема нового периферийного стыковочного механизма.** Кинематической основой нового СтМ является платформа Гью-Стьюарта без дифференциальных связей, что упрощает конструкцию и уменьшает инерцию механизма, улучшая условия сцепки. Управляемым телом параллельного манипулятора в данном случае является стыковочное кольцо с направляющими элементами, механизмами сцепки и датчиками. Конструктивная реализация каждой направляющей кинематической цепи платформы с поступательным шарниром далее для краткости называется штангой.

В традиционных механизмах демпфирования случайных ударных воздействий, например, в подвеске автомобиля, пружины предназначены для восстановления исходного положения звеньев и возможности поглощения энергии следующих ударов. Стыковка КА, завершающая их целенаправленное сближение, может быть реализована без восстановления потерянного хода СтМ. В новом механизме пружины аккумулируют энергию сближения, не возвращая ее обратно в механическую систему двух взаимодействующих КА. Блокировка отдачи пружин обеспечивается управляемыми муфтами. При этом отпадает необходимость использования демпферов.

После сцепки СтМ должен обеспечить втягивание стыковочного кольца ниже стыковочной плоскости для образования жесткого соединения КА. На конечной фазе втягивания необходимо преодолеть достаточно большую силу сопротивления механических и электрических элементов стыковочного интерфейса, а также пружин штанг. При отсутствии в СтМ дифференциальных связей наиболее простым техническим решением, обеспечивающим необходимую величину развиваемой силы, является использование тросовой системы стягивания, которая впервые была реализована в периферийном стыковочном механизме американского корабля Apollo, состыковавшимся с кораблем «Союз» в 1975 г. при выполнении программы ЭПАС [1].

Кинематическая схема одной пары штанг нового периферийного СтМ приведена на рис. 1. Стыковочное кольцо 1 (управляемое тело параллельного манипулятора) связано с основанием 2 СтМ шестью двигающимися независимо штангами 3. Корпус 4 каждой штанги связан с основанием 2 универсальным шарниром 6. Шток 5 каждой штанги, двигающийся поступательно относительно ее корпуса 4, одним своим концом связан со стыковочным кольцом 3-степенным шарниром вращения 7. На другом конце штока установлен шарико-винтовой преобразователь (ШВП) 8, который входит в соосное зацепление с винтом 9. В результате поступательное движение штока преобразуется во вращение винта, передаваемое через паразитную шестерню 10 на вал 11, закручивающий пружинный механизм (ПМ) 12 и являющийся входным для храпового механизма 13, выходной вал которого соединен с электромагнитной фрикционной муфтой (ЭФМ) 14. При выключенной ЭФМ вращение выходного вала храпового механизма заблокировано и вал 11 может вращаться только в одном направлении, усиливая закрутку ПМ. Включение ЭФМ снимает эту блокировку и ПМ может возвращать накопленную энергию, вращая вал 11, винт и через ШВП выдвигая шток из корпуса. На каждой штанге также имеется не показанное на рисунке устройство контактное (УКШ), которое фиксирует достижение штоком положения, соответствующего исходному положению (ИП) СтМ. Втягивание кольца под стыковочную плоскость 15 обеспечивается тремя тросами 16, каждый из которых проходит через

направляющее устройство 17 и соединен одним концом с барабаном 18, а другим – с компенсирующей пружиной 19, установленной на корпусе 20 механизма защелок 21, расположенного под направляющим выступом 22. Все три барабана с помощью передач приводятся во вращение одним приводом (на рис. не показаны). На кольце рядом с направляющими выступами расположены три датчика 23 совмещения колец (ДСК) при сцепке, а на основании СтМ – три датчика 24 втянутого положения 25 кольца.

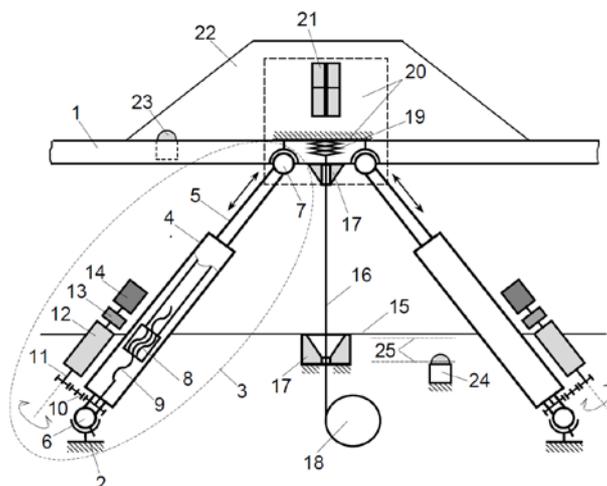


Рисунок 1 – Кинематическая схема пары штанг стыковочного механизма

Перед стыковкой СтМ и его кольцо находятся в полностью втянутом положении. Блок управления выдает сигнал на электропривод для вращения барабанов 18 в направлении размотки тросов и сигналы на включение ЭФМ всех штанг, разрешая вращение валов 11 в направлении ослабления пружин ПМ и соответственно выдвигание штоков из корпусов штанг. В результате стыковочное кольцо движется вдоль продольной оси СтМ в направлении удаления от стыковочной плоскости агрегата. В каждой штанге при достижении длины выдвинутого штока, соответствующей ИП СтМ, УКШ подает сигнал в блок управления, который в ответ выключает ЭФМ этой штанги, блокируя вращение вала 11 в направлении ослабления пружины ПМ и выдвигания штока. После выключения ЭФМ всех штанг блок управления фиксирует достижение ИП СтМ. При этом электропривод продолжает вращать барабаны в направлении размотки тросов, увеличивая их свободную длину до максимально допустимой.

Во время стыковки при первом контакте с агрегатом пассивного КА стыковочное кольцо отклоняется от своего ИП, и хотя бы в одной из штанг уменьшается длина выходящего из корпуса штока и соответственно обнуляется сигнал УКШ. Блок управления при обнулении сигнала хотя бы одного УКШ подает сигналы на включение ЭФМ всех штанг, что приводит к вращению валов 11 в направлении ослабления пружин ПМ и к выдвиганию всех штоков из корпусов, то есть к выдвиганию вперед стыковочного кольца. При сцепке (срабатывании механических защелок) плоскости стыковочных колец совмещаются. На это указывают сигналы от трех ДСК, при получении которых блок управления включает таймер и выключает ЭФМ всех штанг, блокируя вращение валов 11 в направлении ослабления пружин ПМ и увеличения длин штоков, выходящих из корпусов штанг. После этого ПМ штанг только поглощают энергию сближения активного КА.

Через фиксированный интервал времени после достижения сцепки, достаточный для поглощения основной части энергии сближения активного КА, блок управления подает сигнал на электропривод для вращения барабанов в направлении намотки тросов, что приводит к втягиванию СтМ. При этом стыковочное кольцо давит на штоки, заставляя их втягиваться в корпуса штанг и через ШВП вращать винты и валы 11 в направлении закрутки ПМ, отдача которых заблокирована выключенными ЭФМ. При полном втягивании штоков кольцо пересекает стыковочную плоскость и обжимает датчики втянутого положения, сигналы с которых через блок управления инициируют выключение привода.

**Особенности проектирования стыковочного механизма.** Основными функциями СтМ являются позиционирование для обеспечения сцепки, поглощение энергии сближения активного КА и стягивание стыковочных интерфейсов для последующего образования жесткого соединения. На всех этапах движения механизма должны быть исключены не демпфируемые контакты его звеньев между собой и с корпусом стыковочного агрегата, которые могут привести к неконтролируемым нагрузкам. Кроме того, платформа механизма не должна иметь сингулярных конфигураций, при переходе через которые теряется управляемость и нарушаются относительные положения звеньев, обеспечивающие

выполнение основных функций. При отсутствии дифференциальных связей и простом цикловом управлении эти требования обеспечиваются выбором геометрических параметров звеньев платформы и сил сопротивления штанг.

Для процесса проектирования СтМ характерны следующие особенности:

- на выбор значения базовых геометрических параметров (координат шарниров и высоты платформы) значительное влияние оказывают конструктивные ограничения, связанные с компоновкой как СтМ в стыковочном агрегате, так и агрегата в составе КА;
- в каждой конкретной стыковке механизм реализует случайную траекторию движения вследствие случайных начальных условий сближения, поэтому предъявляемые к нему требования должны выполняться для наихудшего случая, который характеризуется максимальной величиной кинетической энергии, определяемой из заданных в IDSS максимальных значений компонент относительных поступательной и угловой скоростей активного КА и его максимальных инерционных параметров;
- требования отсутствия контактов перемещающихся в пространстве сложных нелинейных поверхностей звеньев трудно формализуется, что затрудняет использование математических алгоритмов оптимизации конструкции;
- проектируемый СтМ не обладает отдачей, в нем отсутствуют возвратные движения штоков штанг, поэтому нежелательные контакты звеньев могут возникать только в процессе поглощения энергии сближения активного КА;
- благодаря использованию ШВП с большим коэффициентом передачи для поглощения энергии сближения используются малогабаритные ПМ кручения, параметры жесткости которых могут быть легко адаптированы к изменяющимся требованиям к силе сопротивления штанг.

Поэтому проектирование СтМ основано не на использовании математических методов оптимизации, а на многократном, итерационном выполнении следующих процедур:

- сканирование всего рабочего пространства параллельного манипулятора с заданными базовыми геометрическими параметрами с целью проверки отсутствия сингулярных конфигураций и выделения возможных точек контакта звеньев между собой и с корпусом стыковочного агрегата;
- определение сил сопротивления штанг, которые обеспечивают поглощение заданной максимальной величины кинетической энергии до достижения каждой из выделенных точек контакта;
- повторное контрольное сканирование всего рабочего пространства для проверки поглощения заданной величины кинетической энергии при выбранных характеристиках ПМ без достижения нежелательных контактов.

**Алгоритмы и модели для выбора параметров 6-степенной платформы.** Данный раздел является развитием и обобщением работы [10]. При сканировании рабочего пространства механизма в каждой его точке используется кинематическая модель платформы, которая позволяет определить относительное положение звеньев СтМ на основе решения обратной задачи кинематики для параллельного манипулятора, то есть по значениям координат его управляемого тела – стыковочного кольца. Для этого применяется алгоритм, аналогичный [11, 12 и др.]. Контроль отсутствия сингулярности выполняется по значению определителя матрицы Якоби [13]. При этом вследствие конечной величины шага сканирования анализируется не достижение нулевого значения, а смена знака определителя.

Контактная модель предназначена для выявления всех потенциально возможных контактов элементов конструкции СтМ и стыковочных агрегатов. Величина шага сканирования рабочего пространства параллельного манипулятора значительно больше, чем приращение координат на шаге интегрирования при моделировании динамики стыковки, поэтому алгоритм устанавливает только факт наличия контакта, то есть пересечения поверхностей. Величина контактного внедрения и контактные реакции не определяются. Контакттировать могут показанные на рис. 2 элементы конструкции СтМ и агрегатов: корпуса 1, штоки 2 и блоки 3 устройств поглощения энергии (содержащие ПМ, храповые механизмы и ЭФМ) штанг, стыковочное кольцо 4, корпус 5 и плоскость стыка 6 активного стыковочного агрегата и расположенные на нем упоры 7 для срабатывания защелок при сцепке, направляющие выступы 8 и плоскость стыка 9 пассивного агрегата. Определены типы контактов, то есть возможные пары этих элементов. Каждый элемент конструкции в зависимости от типа контакта описывается тем или иным набором геометрических примитивов, которыми являются отрезок прямой, цилиндр со сферическими торцами, цилиндрическая поверхность, плоскость. Для каждой пары примитивов

используются математические соотношения, результат вычисления которых указывает на наличие или отсутствие их пересечения. Определение пересечения отрезка с плоскостью выполняется тривиально, а с цилиндрической поверхностью – на основе оценки расстояния его вершин от оси поверхности. Для пар «цилиндры со сферическими торцами» и «цилиндр со сферическими концами - отрезок» разработана модификация алгоритма [14] с определением расстояния между отрезками по методу [15].

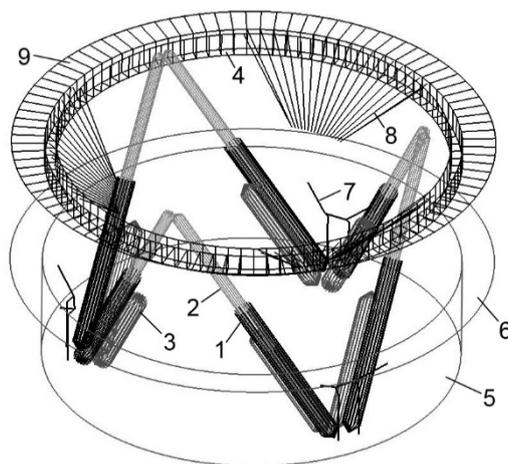


Рисунок 2 – Аппроксимация СтМ и стыковочных агрегатов геометрическими примитивами

Определение рабочего пространства параллельных манипуляторов производится обычно сканированием многомерного куба, границы которого выбираются с некоторым запасом по отношению к ожидаемому объему исследуемой области. Для повышения эффективности используются метод половинного деления, рекурсивные алгоритмы и эвристические приемы [16, 17 и др.]. Контакты подвижных элементов конструкции СтМ, которые имеют сложную форму, существенно изменяют форму и объем рабочего пространства «чистого» параллельного манипулятора. Поэтому перебор точек многомерного куба приведет к выявлению очень большого числа избыточных точек пересечения, которые не соответствуют реальному контактному взаимодействию. Поэтому используемый алгоритм сканирования основан на решении обратной кинематической задачи и изменении координат стыковочного кольца, начиная от продольной оси СтМ, которая гарантированно принадлежит рабочему пространству. Положение центра кольца изменяется с некоторым шагом в цилиндрической системе координат, в каждом его положении производятся угловые движения во всех направлениях. Такой порядок позволяет сократить объем вычислений на основе учета симметрии конструкции СтМ в декартовой системе координат. Изменение по любой координате завершается при достижении ограничения на ход штока штанги или при обнаружении факта контакта, то есть пересечения геометрических примитивов, описывающих элементы конструкции. Координаты кольца в точке пересечения примитивов и соответствующие им хода штоков штанг запоминаются в файле. В результате такого сканирования определяется неизбыточное число точек потенциального контакта, обработка описания которых позволяет рассчитать требуемые силы сопротивления штанг.

В установленных на штангах ПМ кручения, поглощающих энергию сближения, используются нормальные спиральные пружины (пружинные ленты) [18], коэффициент жесткости которых изменяется в достаточно узком диапазоне. Поэтому их основным изменяемым параметром является момент сопротивления при длине штока, соответствующем ИП СтМ. Величина этого момента реализуется выбором ширины пружинной ленты. Исходными данными для выбора этого параметра являются длина (ход штоков) штанги в ИП СтМ и коэффициент жесткости ПМ кручения. Процесс выбора основан на последовательном просмотре всех выделенных при сканировании точек контакта и расчете по известным для этих точек ходам штоков силы сопротивления штанги (момента сопротивления ПМ) в ИП, при которой суммарная энергия, накопленная в ПМ всех штанг, равна заданной максимальной величине кинетической энергии сближения активного КА. Если для очередной точки контакта требуется большее значение силы, то оно заменяет предшествующее текущее значение. В результате такого просмотра всех точек определяется искомое значение параметра.

После определения момента сопротивления ПМ штанг выполняется повторное, контрольное сканирование, при котором в каждой очередной точке рабочего пространства, характеризующейся набором координат стыковочного кольца, выполняется расчет энергии поглощенной СтМ. Если величина этой энергии превышает максимальную кинетическую энергию сближения активного КА, то

сканирование в выбранном направлении завершается, то есть новое значение очередной изменяемой координаты не генерируется. При повторном сканировании точки контакта определяться не должны.

**Выводы.** Описанные выше кинематическая схема и принцип работы нового периферийного СТМ, модели и алгоритмы для выбора его параметров являются методической основой для разработки конструкции платформы механизма и устройств поглощения энергии.

1. Сыромятников В.С. Стыковочные устройства космических аппаратов – М.: «Машиностроение», 1984 – 216 с.
2. International Docking System Standard (IDSS) Interface Definition Document (IDD) – <http://internationaldockingstandard.com>. Дата обращения 19.05.2017.
3. ParalleMIC – the Parallel Mechanisms Information Center. <http://www.parallemic.org>. Дата обращения 19.05.2017
4. Gough V. E., Whitehall S.G. Universal tyre test machine. Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Technical Congress. FISITA, May, 1962, pp. 117-137.
5. Stewart D. A Platform with six degrees of freedom. Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers. (London), Vol. 180, pt. 1, no. 15, 1965, pp. 371-386.
6. Яскевич А.В. Математическая модель периферийного стыковочного механизма. Часть 1. Уравнения движения дифференциальных механизмов. //Мехатроника, автоматизация, управление, № 7, 2012 г., с.63-70.
7. IBDM – International Berthing & Docking Mechanism, 2005. – VRI Newsletter, April, p. 3.
8. Lewis J.L., Monty B.C., Le T.D. et al., NASA. Low-Impact Mating System. Patent US 7,543,799 B1, June 9, 2009.
9. Ghofranian S., Chuang L-P., Motaghedi P., The Boeing Company. Spacecraft Docking System. Patent US 20,150,266,595 A1, September 24, 2015.
10. Чернышев И.Е. Комбинированная математическая модель параллельного манипулятора для проектирования стыковочного механизма космических аппаратов. - Экстремальная робототехника. // Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции. Санкт-Петербург: Изд-во «Политехника-сервис», 2012, с. 362 – 369.
11. Jakobovic D., Jelenkobic L. The Forward And Inverse Kinematics Problems For Stewart Parallel mechanisms. University of Zagreb. URL: <http://www.zemris.fer.hr/~yeti/download/cim2002.pdf>. Дата обращения 19.05.2017
12. Satheesh G., Bikshapathi M., Nagarajan T., Srinivasa Y. G., Stiffness Analysis and Kinematic Modeling of Stewart Platform for Machining Applications. PEIL Laboratory, Mechanical Engineering, IIT Madras, Chennai, India. URL: [http://www.aspe.net/publications/Annual\\_2004/posters/2equip/1analy/1516.pdf](http://www.aspe.net/publications/Annual_2004/posters/2equip/1analy/1516.pdf). Дата обращения 19.05.2017
13. Gosselin C., Angeles J., Singularity Analysis of closed loop Kinematic Chains, IEEE Transactions Robotics in Automation, Vol.6 No.3, 1990, pp. 281-290.
14. Youhong Gong, Design Analysis of a Stewart Platform for Vehicle Emulator Systems, Materials Engineering Shanghai Jiao Tong University 1984, Submitted to the Department of Mechanical Engineering in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Master of Science in Engineering at the Massachusetts Institute of Technology. January 1992, pp. 44-47.
15. G. Hoffmann. Distance Between Line Segments. URL: <http://docs-hoffmann.de/xsegdist03072004.pdf>. Дата обращения 19.05.2017
16. Hrishi L. S., Kinematic, Dynamic and Workspace Analysis of a Novel 6-DOF Parallel Manipulator. A thesis submitted to the Faculty of the Graduate School of the University at Buffalo, State University of New York in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science. Department of Mechanical and Aerospace Engineering, August 2010, pp. 23-43.
17. Lapusan C., Maties V., Hancu O. Workspace Analysis and Design of a 6-DOF Parallel Robot. Proc. of the 8th WSEAS International conference on signal processing, robotics and automation. pp. 337-340.
18. Пономарев С.Д., Андреева Л.Е. Расчет упругих элементов машин и приборов. – М.: Машиностроение, 1980. – 326 с.

*I.A. Galkin*

## **ORGANIZATION OF NAVIGATION SUPPORT FOR MARINE ROBOTIC COMPLEXES IN OPERATIONALLY IMPORTANT AREAS OF THE WORLD OCEAN**

*Naval academy, Saint-Petersburg  
ilyaalgalkin@gmail.com*

### **Abstract**

The article considers the current state of navigational support for marine robotic complexes in the interests of the Navy in the operationally important areas of the World Ocean, revealed contradictions, proposed the concept and organization of an autonomous local navigation system that allows for rapid deployment in the area, positioning with the necessary accuracy to ensure, including group use, marine robotic complexes, at the same time operating in different environments.

Keywords: navigation support, marine robotic complexes, autonomous local navigation system.

*И.А. Галкин*

## **ОРГАНИЗАЦИЯ НАВИГАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МОРСКИХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ В ОПЕРАТИВНО-ВАЖНЫХ РАЙОНАХ МИРОВОГО ОКЕАНА**

*Военный учебно-научный центр ВМФ «Военно-морская академия», г. Санкт-Петербург  
ilyaalgalkin@gmail.com*

### **Аннотация**

В докладе рассмотрено существующее состояние навигационного обеспечения робототехнических комплексов военного назначения, применяемых в интересах Военно-Морского Флота в оперативно-важных районах Мирового океана, выявлены противоречия, предложена концепция и организация автономной локальной навигационной системы, позволяющей производить оперативное развертывание в заданном районе, выработку навигационных параметров с необходимой точностью для обеспечения, в том числе и группового применения, робототехнических комплексов военного назначения, одновременно действующих в различных средах.

Ключевые слова: навигационное обеспечение, морские робототехнические комплексы военного назначения, автономная локальная навигационная система.

В настоящее время, в интересах Военно-Морского Флота проводится ряд научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию морских робототехнических комплексов военного назначения (МРТК ВН) для действий как в воздушной среде, на поверхности акваторий, так и под водой, а также ряд научно-исследовательских работ по разработке функциональных моделей, обоснованию форм и способов их применения, в том числе и в составе групп.

В перспективе, групповое применение МРТК ВН целесообразно при выполнении задач по предназначению за минимальное время на больших пространствах Мирового океана, например: производстве съемки рельефа дна, лидарной съемки мелководья и побережья, измерения океанологических величин, освещения подводной обстановки, противоминных действий, обследования подводных гидротехнических сооружений и инфраструктуры (прокладки кабелей и трубопроводов, дноуглубительных и других работ, требующих высокоточной координатной привязки), создания поля ретрансляторов, привязки боевых порядков, организации навигационного обеспечения группового применения робототехнических комплексов военного назначения при выполнении ими задач в оперативно-важных районах Мирового океана.

Существующая организация навигационного обеспечения действий робототехнических комплексов военного назначения, а также традиционных сил Военно-Морского Флота в оперативно-важных районах Мирового океана осуществляется с использованием спутниковых навигационных систем (СНС) и радионавигационных систем (РНС), – при выполнении ими задач на водной поверхности и в воздушном пространстве, и с использованием гидроакустических навигационных систем (ГАНС), – под водой.

Однако, использование спутниковых навигационных систем не всегда удовлетворяет требованиям, предъявляемым к точности, необходимой для выполнения ряда задач силами ВМФ, особенно в районах, находящихся вне зоны покрытия контрольно-корректирующих станций. Кроме этого, в определенных районах Мирового океана, сигналы космических аппаратов, содержащие информацию о навигационных параметрах, могут быть отключены, подавлены, существенно загроулены или заменены на ложные вероятным противником. В таких условиях выработка навигационных параметров, с необходимой точностью, с помощью спутниковых навигационных систем будет сильно затруднена или вовсе невозможна.

Существующие радионавигационные системы, используемые для обеспечения сил ВМФ навигационной информацией, позволяют определять координаты объектов на дальностях до 3000 км от местонахождения станции, но, при этом, обладают большой погрешностью, составляющей от 50 до 700 м в зависимости от РНС [1]. Существуют также морские радионавигационные системы высокой точности, позволяющие обеспечить необходимую точность выработки навигационных параметров до 1 м, но дальность таких РНС составляет порядка 150 км. Для использования таких РНС, их необходимо разворачивать в непосредственной близости от выполнения задач обеспечиваемыми силами, что в настоящее время для удаленных акваторий не реализовано.

Вопросы навигационной поддержки автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), имеющих большую автономность и дальность действия, существенно превышающую дальность действия обычных дальномерных гидроакустических систем, достаточно актуальны [2-3]. Эти проблемы довольно успешно решаются в составе аппаратов большого водоизмещения, имеющих инерциальные навигационные системы, систему бортовой навигации, корректируемую, как правило, по дальномерным данным с заблаговременно расставленной сети маяков-ответчиков по трассе движения или в районе работ. Маяки-ответчики (различают донные маяки-ответчики и поверхностные маяки-ответчики) устанавливаются для обеспечения работы гидроакустической навигационной системы с длинной базисной линией (ГАНС ДБ или LBL).

Для аппаратов с малым водоизмещением и с учетом требований к высокой мобильности АНПА, желание исключить маяки, значительно увеличивающие стоимость и время проведения работ [3], является вполне оправданным. Вместе с тем, гидроакустические навигационные системы с ультракороткой базисной линией (ГАНС УКБ или USBL), когда движущийся АНПА сопровождает судно обеспечения с буксируемой приемной антенной, также недостаточно хороши, прежде всего, из-за увеличения погрешности выработки навигационных параметров, по сравнению с ГАНС ДБ, а также значительного увеличения сложности буксируемого устройства, которое, кроме антенны УКБ, должно содержать датчики угловой ориентации антенны, датчики курса, глубины, систему передачи данных и т.д. Важным является также то, что УКБ системы в ряде случаев не обеспечивают необходимой точности при выполнении задач в интересах ВМФ.

Существуют также навигационные гидроакустические системы комбинированного типа (например, LUSBL), совмещающие использование донных маяков-ответчиков и буксируемой гидроакустической системы с ультракороткой базисной линией. Такие системы используют в районах большой протяженности. Недостатком таких систем является необходимость заблаговременной подготовки района выполнения задач (постановка донных маяков-ответчиков), а также необходимость судну обеспечения следовать за АНПА.

Существующие способы навигационного обеспечения имеют ряд недостатков, влияние которых возможно минимизировать в мирное время за счет увеличения временных затрат на выполнение мероприятий по заблаговременному оборудованию района выполнения задач МРТК ВН в навигационном отношении. Это не позволяет производить эффективное навигационное обеспечение при оперативном развертывании МРТК ВН, особенно в оперативно-важных районах Мирового океана.

Таким образом, возникает противоречие между возрастающей роботизацией современных сил ВМФ [4], что влечет за собой и разработку новых методов, моделей применения робототехнических комплексов военного назначения в различных условиях обстановки, в удаленных районах Мирового океана, где существующие системы навигационного обеспечения вырабатывают навигационные параметры с большой погрешностью, либо вовсе отсутствуют, и необходимостью производить эффективное обеспечение МРТК ВН с достаточной оперативностью и заданной точностью в удаленных районах Мирового океана, в случае возможного противодействия противника, а также под водой, при необходимости выполнения оперативных задач, не позволяющих заблаговременно произвести развертывание навигационной системы, невозможности задействовать при выполнении задач суда обеспечения.

Особенно актуальной данная проблема становится в случае группового применения МРТК ВН, т.к. возникает необходимость одновременной выработки навигационных параметров для объектов, действующих в различных средах, осуществление их навигационной привязки и определения взаимного расположения друг относительно друга для успешного выполнения поставленных задач, безопасных совместных действий, исключающих создание аварийных ситуаций и взаимных помех применению вооружения и технических средств.



Рисунок 1 – Модель автономного навигационного подвижного буя

Таким образом, вопросы оперативного навигационного обеспечения МРТК ВН в настоящее время проработаны слабо. Все существующие решения обеспечения МРТК ВН навигационной информацией возможно применять только в условиях мирного времени, с заблаговременной подготовкой района, действием в районе судна обеспечения. Не проработаны вопросы:

- оперативного развертывания навигационных систем в оперативно-важных районах Мирового океана (которые могут быть существенно удалены от действующей инфраструктуры навигационных систем), в том числе в условиях возможного противодействия;
- организации выработки навигационной информации с необходимой точностью для МРТК ВН, действующих в различных средах;
- возможности оперативного наращивания масштаба системы вплоть до полного покрытия района военных действий;
- возможности создания единого информационного пространства, организованного на одинаковых сетевых принципах, которое позволит свободно включаться в него или покидать любому участнику, снабженному соответствующей абонентской аппаратурой, для более гибкого применения МРТК ВН в составе групп.

В качестве решения выявленных противоречий необходимо разработать автономную локальную навигационную систему, сочетающую в себе возможности оперативного развертывания, одновременную выработку высокоточной навигационной информации для определенного числа потребителей, действующих в различных средах, их координатную привязку и выдачу данных об их взаимном расположении.

Автономная локальная навигационная система должна обеспечить выполнение следующих задач:

- определение с высокой точностью дальности и пеленга до обеспечиваемого объекта;
- определение местоположения обеспечиваемого объекта относительно элемента системы – автономного навигационного подвижного буя;
- оперативный контроль траектории движения обеспечиваемого объекта.

В качестве функционального элемента данной системы перспективным было бы использование специальных автономных аппаратов (рис.1): автономных навигационных подвижных буев, способных произвести самостоятельное развертывание автономной локальной навигационной системы в заданном районе, выработку навигационной информации с необходимой точностью для надводных, подводных объектов, а также объектов, действующих в воздушном пространстве, возможность сворачивания системы и самостоятельное следование к кораблю-носителю по окончании обеспечения сил ВМФ.

Эффективное применение МРТК ВН может быть обеспечено только в условиях полного и непрерывного покрытия зоны его эксплуатации. Для этого, в зоне развертывания, автономная локальная навигационная система должна обеспечить надежную и безошибочную выработку информации о местоположении потребителей в пространстве. Это достигается непрерывной выработкой навигационной информации и предоставлению ее потребителям по их запросам.

Организация автономной локальной навигационной системы построена на основе самоорганизующихся сетей. Все автономные навигационные подвижные буи определяют взаимное расположение друг друга, создавая замкнутую локальную сеть. Один или несколько элементов сети определяет свое местоположение относительно корабля-носителя, либо особенностей рельефа

местности, либо, в случае функционирования спутниковых навигационных систем – по этим системам (рис. 2).

Все абоненты автономной локальной навигационной системы определяют свое местоположение относительно ее элементов, которые находятся в дрейфе. В итоге происходит построение мобильной динамической локальной системы определения местоположения потребителей – движущихся объектов. Относительно близкое местоположение элементов системы позволит минимизировать ошибки

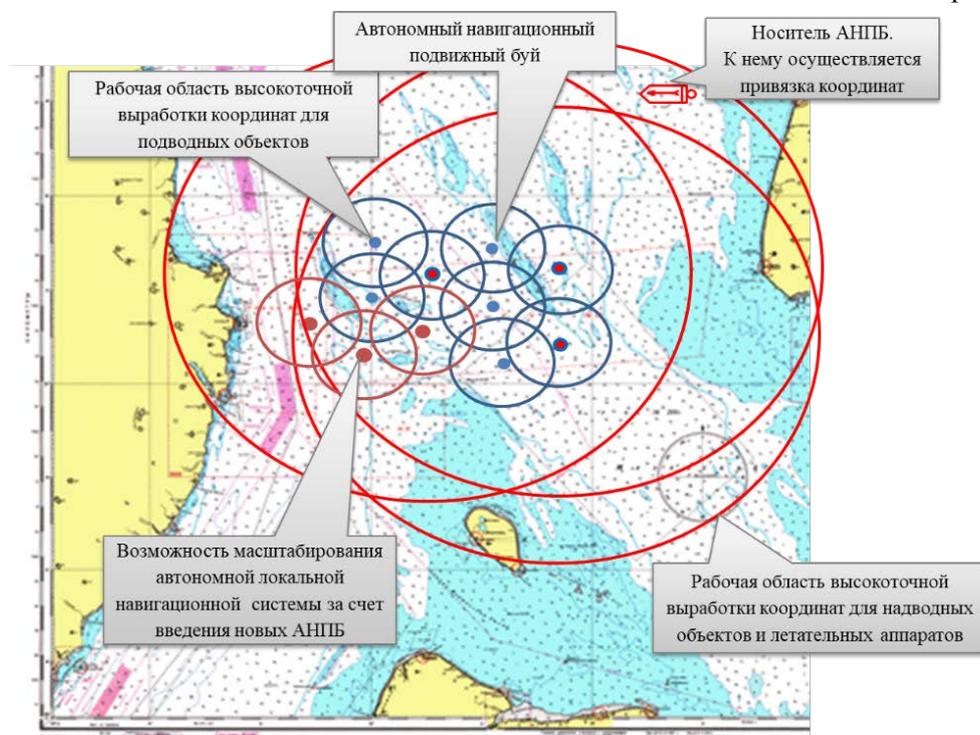


Рисунок 2 – Автономная навигационная система

взаимного определения их местоположения.

Инфраструктура автономной локальной навигационной системы: автономные навигационные подвижные буи, должны обеспечивать возможность оперативного наращивания масштаба системы вплоть до полного покрытия района военных действий. Должны быть включены в единое информационное пространство, организованное на одинаковых сетевых принципах, которое позволяет свободно включаться в него или покидать любому участнику, снабженному соответствующей абонентской аппаратурой [5].

Ключевой особенностью автономной локальной навигационной системы является возможность обеспечения потребителей навигационной информацией с точностью (в рамках заданного района), превышающей точность позиционирования по «традиционным» навигационным системам (например, спутниковым навигационным системам), а также ее мобильность, – основа обеспечения ее оперативного развертывания в заданном районе, быстрого перемещения и развертывания в смежном районе, в случае необходимости.

Для организации выработки навигационной информации автономной локальной навигационной системой предлагается оснастить ее элементы – автономные навигационные подвижные буи высокоточной радионавигационной системой, – для обеспечения надводных объектов и летательных аппаратов, и гидроакустической навигационной системой с длинной базисной линией, – для обеспечения автономных обитаемых подводных аппаратов, определения их координат и элементов движения. К настоящему времени ГАНС ДБ являются хорошо освоенным и надежным навигационным средством, позволяющим обеспечивать заданное количество потребителей навигационной информацией, в особенности, когда предъявляются повышенные требования к точности навигационного обеспечения.

Кроме навигационного обеспечения, в случае установки соответствующего оборудования, автономная локальная навигационная система дополнительно может выступать в качестве системы ретрансляторов, обеспечивая обмен информацией как между центрами управления и МРТК ВН, так и между аппаратами, действующими в различных средах непосредственно в районе выполнения задач.

Создание единой информационно-коммутиционной сети, основанной на принципах построения сетевидного пространства, связывающей источники освещения обстановки, центры управления силами и непосредственно силы, действующие в районе выполнения задач, позволит осуществлять более гибкое и эффективное управление силами, повысить динамику боевых действий, эффективность применения вооружения и технических средств [6]. Но, организация такой сети требует решения достаточного количества проблем (например, согласования потоков передачи данных между двух сред) и выходит за рамки данной статьи.

Таким образом, автономная локальная навигационная система должна будет обеспечить одновременное определение местоположения нескольких потребителей, действующих в различных средах, а также их взаимное расположение, в том числе и с привязкой к географическим координатам. Для функционирования такой системы необходима группировка, состоящая не менее, чем из трех автономных навигационных подвижных буев. Это позволит обеспечить выработку навигационной информации для воздушных, надводных и подводных объектов с необходимой точностью. Для реализации подобного обеспечения «традиционными» средствами с выработкой навигационных параметров равной точности, необходимо развернуть системы, в состав которых входят радионавигационные станции (не менее двух), поверхностные, либо донные маяки-ответчики (не менее трех). Такое обеспечение повлечет дополнительные финансовые, временные и эксплуатационные затраты.

1. Алёшечкин, А.М. Опыт создания радионавигационной системы для морских потребителей / А.М. Алёшечкин // Электронный научный журнал «ИССЛЕДОВАНО В РОССИИ», 2015.
2. Агеев, М.Д., Илларионов Г.Ю. и др. Необитаемые подводные аппараты военного назначения. / М.Д. Агеев, Г.Ю. Илларионов и др. Владивосток, Дальнаука, 2005.
3. Агеев, М.Д. Автономные подводные роботы. Системы и технологии. / М.Д. Агеев, Л.В. Киселев, Ю.В. Матвиенко и др. М.: Наука, 2005.
4. Гаврилкин, С.Н. Основные направления развития и существующие проблемы создания подводной робототехники «двойного» назначения. / С. Н. Гаврилкин // Труды Всемирной морской технологической конференции, СПб, 2012.
5. Илларионов, Г.Ю. Применение подводных роботов в сетевидных войнах. / Г.Ю. Илларионов, К.З. Лаптев // Материалы международной научно-технической конференции «Технические проблемы освоения Мирового океана», Владивосток: ИПМТ ДВО РАН, 2007.
6. Драбенко, В.А. Сетевидные аспекты группового поведения автономных подводных аппаратов / В.А. Драбенко, А.И. Иванов, Н.А. Лазутина, И. У. Сахabetдинов // Труды конференции «Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения». – М., 2010.

*А.И. Опарин*

## **ОПЕРАТИВНОЕ КОМПЛЕКТОВАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ГРУППИРОВОК РАЗНОРОДНЫХ СРЕДСТВ ВЕДЕНИЯ ПОДВОДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАБОТ**

*Федеральное государственное казённое военное образовательное учреждение «Центр подготовки специалистов в области глубоководной деятельности» Министерства обороны Российской Федерации*

### **Аннотация**

Введено понятие мобильного роботизированного технологического комплекса как оперативно формируемой группировки разнородных технических средств выполнения подводных исследований и работ. Представлены отличительные характеристики, проблемы комплектования и применения оперативно формируемых группировок разнородных подводных аппаратов и других технических средств ведения подводных исследований и работ.

Ключевые слова: мобильный роботизированный технологический комплекс, оперативная группировка разнородных робототехнических комплексов.

### **Введение**

Термином, который позволяет наиболее полно охватить все многообразие современных средств ведения подводных исследований и работ, является «мобильный робототехнический комплекс». Мобильный робототехнический комплекс – это сформированный в виде подводного аппарата модуль,

включающий мобильное робототехническое средство (робот), функциональное (технологическое, рабочее) оборудования, систему управления и средства их технического обслуживания. Любой такой комплекс — это готовое техническое изделие, которое обладает детерминированными характеристиками и обеспечивает реализацию в определенном спектре условий некоторого наперед известного перечня функций. В практике такие комплексы часто используются в составе их оперативно формируемых группировок, в которые могут быть включены любые средства проведения подводных исследований и работ (самолеты, вертолеты, беспилотные летательные аппараты, необитаемые и обитаемые подводные и надводные аппараты, суда, корабли, водолазные средства и т.п.). Ниже обсуждаются некоторые проблемы комплектования таких группировок и управления ими.

### **Принятая терминология**

В целях исключения неоднозначных трактовок излагаемых ниже соображений принята следующая терминология:

- робототехническое средство (РТС) - “средство, которое выполняет функции, предписанные виды работ или операции без непосредственного участия человека в опасной зоне” [1];
- мобильное робототехническое средство (МРТС) (мобильный робот - МР) - робототехническое средство, которое обладает локомоционными способностями и имеет сенсорную систему, обеспечивающую их реализацию;
- мобильный робототехнический комплекс (МРК) – ориентированная на решение заранее заданной совокупности родовых задач и сформированная в виде единого модуля совокупность мобильного робототехнического средства (робота), функционального (технологического, рабочего) оборудования, системы дистанционного управления и средств их технического обслуживания;
- мобильный роботизированный технологический комплекс (МРТК) – территориально распределенная группировка мобильных робототехнических комплексов (МРК), обеспечивающих реализацию всех операций процедуры решения критериальной задачи в соответствии с ее условиями и требованиями.

Употребленные в последних определениях термины “родовая задача” и “критериальная задача” требует некоторого пояснения.

В эргономике различают критериальные (индивидуальные) задачи и родовые (типовые) задачи. Ситуация родовой задачи формулируется в общем виде без указания конкретных значений тех параметров, которые могут варьироваться. Родовая задача - это класс (спецификация, множество) задачных ситуаций и требований задачи, имеющих некоторый общий алгоритм решения. Чтобы реализовать этот алгоритм нужно родовую задачу представить в виде критериальной. Критериальная задача – это вариант родовой задачи, в описании ситуации которой зафиксированы значения всех варьируемых параметров. Критериальная задача может быть решена путем реализации алгоритма решения родовой задачи. Любое техническое средство проектируется и создается для решения родовых задач, а применяется - для решения критериальных задач.

### **Характеристики мобильных роботизированных технологических комплексов**

Из приведенных выше дефиниций следует, что любой МРК — это готовое техническое изделие, т.е. “продукция, прошедшая все технологические стадии производства и годная к использованию для удовлетворения потребностей в том виде, в котором она выпущена предприятием-изготовителем, без дальнейшей доработки” [2]. Будучи ориентированными на решение наперед заданных родовых задач МРТС (МР) и МРК обладают детерминированными тактико-техническими характеристиками (ТТХ), которые обеспечивают реализацию в определенном спектре условий некоторого известного перечня внешних функций.

Уже в тактико-техническом задании на разработку любого МРК определяется его общее целевое предназначение, задаются характеристики основных условий его работы и перечень тех родовых задач, который он должен решать. Несмотря на это, вариативность окончательного проектного решения чрезвычайно высока. Так, например, М.Д. Агеев в отношении поисковых МРК определяет следующий набор проектных альтернатив [3]: *“Носители: буксируемые аппараты, автономные аппараты, легкие (обзорные) телеуправляемые аппараты, тяжелые (рабочие) аппараты. Навигационные средства и средства технического зрения: гидроакустические навигационные системы (с длинной (ДБ) и ультракороткой (УКБ) базами), гидролокаторы бокового и секторного обзора, многолучевой эхолот (картографирование и поиск), акустический профилограф, телевизионные и фотосистемы, системы электромагнитного и магнитометрического поиска. Рабочие исполнительные устройства: легкие*

манипуляторы, тяжелые манипуляторы и инструменты к ним, специальные механизмы (кабельные резаки и пр.)” [3]. Подобное многообразие проектных альтернатив имеет место в каждом из определенных в ГОСТ Р 56960-2016 [4] классов ПА (поисковые, обследовательские, рабочие, океанологические (исследовательские), двойного применения, многоцелевые).

Вариативность проектных решений на имеемом многообразии исходных альтернатив определяет корректность следующих соотношений:

- конкретные образцы МРК, которые в рассматриваемых условиях обеспечивают реализацию одних и тех же функций, могут иметь существенные конструктивные отличия и по имеемой номенклатуре классифициционных признаков принадлежать к различным категориям;
- возможность и целесообразность применения того или иного МРК в тех или иных конкретных условиях для выполнения той или иной функции может быть определена только на основе сравнительного анализа условий и требований критериальной инженерной (поисковой, исследовательской и т.п.) задачи с ТТХ и функциональными возможностями конкретного образца МРК.

В соответствии с своими проектными заданиями все МРК ориентируются на решение вполне определенных родовых задач. Однако, как и любые другие технические системы, МРК могут реализовать свойственный им набор функций в целях решения любой другой задачи, условия выполнения которой совпадают со спектром условий, характерных для МРК. Если набор функций, который МРК может выполнять, включает в себя наборы функций, необходимые для решения двух родовых задач, то такой МРК в ГОСТ Р 56960-2016 определяется как МРК “двойного применения” [4]. Если набор функций, реализуемых МРК, обеспечивает решение нескольких родовых задач, то такой МРК в соответствии с ГОСТ Р 56960-2016 [4] является многоцелевым.

Выше МРТК был определен как совокупность МРК, которая обеспечивает решение критериальной задачи в соответствии с ее условиями и требованиями. Поэтому для создания любого МРТК, нужно иметь формулировку той критериальной задачи, которую необходимо решить. Для того, чтобы обеспечить решение критериальной задачи МРТК должен гарантировать реализацию всех операций (функций), входящих в алгоритм решения этой задачи именно в тех условиях, которые определены в задаче. Другими словами, в состав МРТК могут быть включены только те МРК, которые могут:

- 1) функционировать в среде, характеризующейся параметрами (глубина, прозрачность, соленость, рельеф, удаленность от носителя, удаленность от системы управления и т.д.), указанными в условиях задачи;
- 2) выполнять те действия (операции, функции), которые входят в алгоритм (процедуру, функциональную структуру и т.п.) решения задачи.

В отличие от МРК, которые имеют детерминированную структуру и представляют собой совокупность РТС, расположенных на одном носителе, в общем случае МРТК имеют вариативную пространственно распределенную структуру, конфигурация которой определяется текущим взаимным расположением имеемой группировки МРК. При этом единичный МРК может рассматриваться в качестве МРТК тогда, когда он один способен выполнить требования рассматриваемой критериальной задачи с соблюдением всех ее условий и ограничений.

Представляется целесообразным отметить отличия МРТК от других терминов, которые используются для обозначения совокупностей МРК, а также других, аналогичных им объектов (например, БПЛА и ННА). Так в ряде публикаций [5,6,7,8 и др.] используются термины “группа роботов” и “рой (стая) роботов” (МРК, НПА, БЛА, ННА и т.п.)

“Под “роем (группой, стаей и т.п.)” роботизированных устройств принято понимать группировку из нескольких машин, действующих в рамках общей задачи. Такой рой может различаться по степени автономности своих элементов, по их специализации (встречаются гомогенные и гетерогенные группировки, состоящие, соответственно, из однотипных или различных “участников”), по уровню взаимодействия роботов (в ряде случаев у группировки есть центральный компьютер, управляющий отдельными устройствами, а иногда машины ориентируются в пространстве, учитывая исключительно свое местоположение относительно других элементов роя) и т.д.” [5]. “Группа имеет ограниченное число возвращаемых к точке приёма агентов. ... Рой (стая), представляет собой “облако умной пыли”, образованное неограниченным числом миниатюрных, часто невозвращаемых подводных аппаратов” [6]. “В группе роботов всегда присутствует известное количество устройств, каждое из которых выполняет одну и ту же поставленную задачу, продвигая группу к выполнению общей цели. Выход из строя какого-либо члена группы делает невозможным достижение конечной цели. В рое роботов количество “особей” может быть неопределенным, а распределение задач происходит динамически по

мере появления свободных роботов” [7]. “Рой является более независимым и жизнеспособным видом объединения устройств в единое целое, ведь, в случае чего, просто “отряд не заметил потери бойца” [8].

Различия МРТК и группы (роя) роботов определяются тем, что в них реализуются два различных вида групповой деятельности.

В эргономике групповая деятельность рассматривается как организованная система активности взаимодействующих субъектов, направленная на целесообразное производство некоторых объектов. Она разделяется на совместную и кооперативную деятельности. Совместная деятельность – вид групповой деятельности, в которой все индивидуальные деятельности имеют ту же цель, что и групповая деятельность. Кооперативная деятельность – вид совместной деятельности, в которой индивидуальные деятельности: 1) могут иметь цели отличные от цели групповой деятельности; 2) являются взаимообусловленными (специализированными и иерархизированными), поскольку должны реализовываться в строгой последовательности, когда итог одной операции служит условием начала другой.

Отсюда основные отличия МРТК от группы и роя роботов состоят в следующем:

1) один элемент группы (роя) роботов обычно не способен реализовать ни одну из функций группы (роя), а МРК может являться компонентом МРТК только в том случае, если он самостоятельно способен реализовать какую-то функцию МРТК;

2) в группе и в рое роботов все их элементы действуют вместе и одновременно (аналог совместной деятельности), а в МРТК отдельные МРК могут задействоваться по необходимости и действовать самостоятельно (аналог кооперативной деятельности).

Из приведенного выше соотношения понятий МРТК и группы (роя) роботов следует, что несколько МРК, входящих в состав МРТК и выполняющих его составе одну и ту же функцию, могут использовать в качестве группы роботов и управляться в соответствии с принципами управления, характерными для управления группой или роем роботов. Примеры разработок, подтверждающих справедливость последнего вывода, представлены в [6,9, 10,11,12,13,14,15].

Все множество МРТК по признаку участия промышленности в их создании целесообразно разделить на два класса: 1) промышленно-произведенные МРТК (ПП МРТК); 2) оперативно формируемые МРТК (ОФ МРТК).

ПП МРТК также как и МРК представляет собой готовое техническое изделие, которое обладает известными ТТХ и обеспечивает в определенном спектре условий решение заранее известного набора родовых (типовых) задач. В.В. Ханычев для обозначения ПП МРТК вводит термин “морская роботизированная система”.

“Морская роботизированная система (МРС) – это пространственно распределенная структура, включающая силы и средства, объединенные сетевой связью во взаимодействующие подсистемы наблюдения, управления и оружия...” [16].

В соответствии с этими положениями в “под аббревиатурой МРС объединяются разноплановые работы по проектированию, созданию и взаимной увязке различных морских робототехнических комплексов и традиционных средств для комплексного решения задач в конкретном районе” [16].

В свою очередь, ОФ МРТК - это совокупность разнородных МРК (БЛА, ННА, НПА, судов, кораблей, водолазных средств и т.п.), которая оперативно формируется из имеемых в наличии образцов МРК в целях решения критериальной задачи.

В качестве примера такой оперативно формируемой территориально распределенной совокупности разнородных МРК можно привести ОФ МРТК, созданную Русским Географическим Обществом для проведения комплексных исследований озера Голубое (Чирик – Кель), расположенного в Кабардино-Балкарии (см. рис. 1).

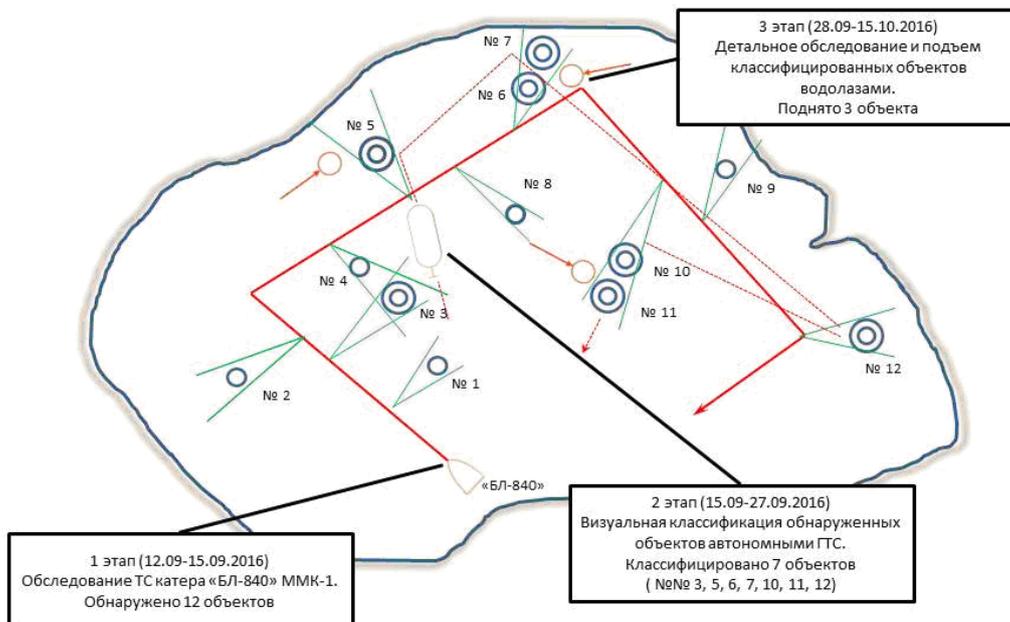


Рисунок 1 – Схема комплексного обследования озера Голубое (Чирик – Кель)

В период с 12 сентября по 15 октября 2016 г. Русское Географическое Общество проводило комплексное исследование озера Голубое (Чирик – Кель), в Черекском районе Кабардино-Балкарской республики.

Решались следующие задачи: 1) поиск и подъем затонувших объектов; 2) изучение геоморфологических и карстовых процессов, происходящих в озере; 3) забор образцов грунта со дна озера.

Группировку разнородных сил МРТК составили:

- катер «БЛ-840» – носитель ММК-1 (рис. 2);
- необитаемый многоцелевой мобильный комплекс обследования донной обстановки «Морской мобильный комплекс (ММК-1)»;
- обитаемый мобильный комплекс для проведения подводно-технических работ (МКПТР);
- телеуправляемые НПА;
- группа водолазов, способных работать на глубине до 80 метров.

Поставленные задачи были решены успешно.



Рисунок 2 – Катер «БЛ-840» – носитель ММК-1

Основные отличия ПП МРТК (МРС) от ОФ МРТК состоят в следующем:

1) ПП МРТК (МРС) проектируется и создается заранее для решения некоторой совокупности родовых задач, а ОФ МРТК может быть создан только после постановки единственной критериальной задачи;

2) в состав ПП МРТК могут включаться технические средства, которые еще предстоит спроектировать и разработать, а ОФ МРТК комплектуется исключительно из имеемых в наличии готовых промышленных образцов.

Из этих отличий следует, ПП МРТК (МРС) может составить базовую основу для формирования ОФ МРТК и управления им.

Каждый ПП МРТК является готовым промышленным продуктом, в процессе испытаний которого проверяются его возможности, выявляются и устраняются недостатки. Комплектация и характеристики любого ОФ МРТК чаще всего уникальны, поскольку он комплектуется один раз для решения критериальной (конкретной) задачи. Последнее определяет необходимость анализа проблем, выявляемых в процессе использования ОФ МРТК.

### **Проблемы оперативного комплектования и управления группировками разнородных мобильных робототехнических комплексов**

В наиболее явном виде проблемы создания и применения ОФ МРТК проявились в поисково-спасательной операции, проводившейся на месте катастрофы самолёта ТУ-154Б в Черном море 25 декабря 2016 года, которая была широко и подробно представлена в средствах массовой информации.

Эта операция проводилась (см. рис. 3) в районе г. Сочи с 25 по 30 декабря 2016 года.

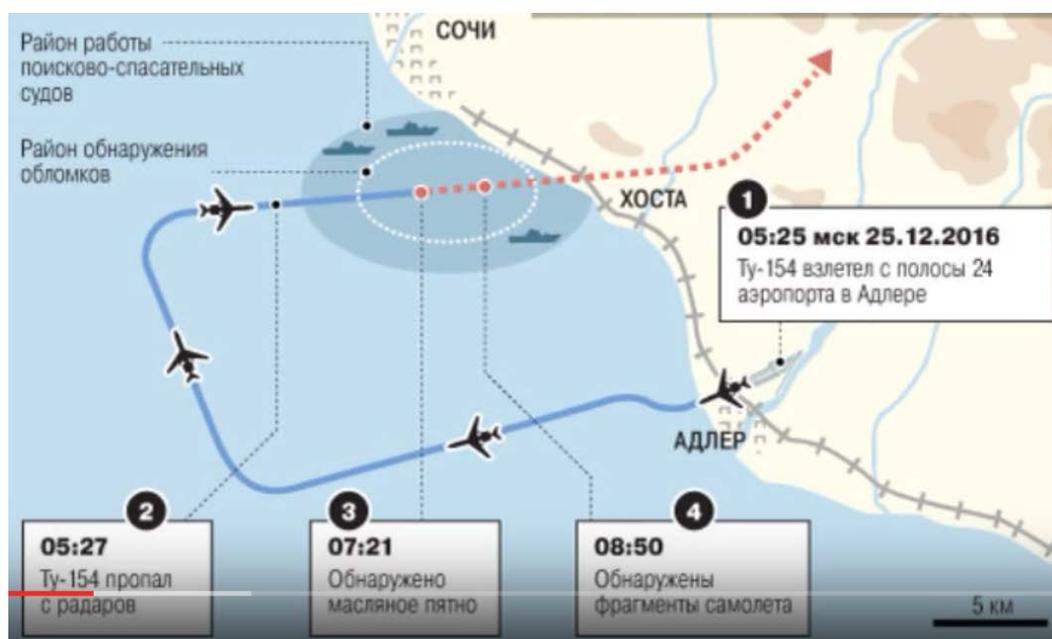


Рисунок 3 – Схема района поисково-спасательной операции на месте катастрофы самолёта ТУ-154Б

Группировку МРК на море составили технические средства МО, МЧС, Русского Географического Общества и ООО “Сочиморстрой”. По данным МО РФ [17] на заключительном этапе операции по состоянию на 21:00 26.12.2016 было задействовано 45 кораблей и судов, 15 ПА, 192 водолаза, 12 самолетов и 5 вертолетов. Поставленные задачи группировкой были выполнены. Однако в процессе выполнения как этой, так и других подобных операций, был выявлен ряд недостатков в организации и управлении ОФ МРТК.

К основным из этих недостатков были отнесены: 1) отсутствие универсального подхода к формированию МРТК; 2) отсутствие надежной и безопасной организации оперативного взаимодействия между МРК, входящими в ОФ МРТК.

Первый недостаток возникает вследствие того, что в основе комплектования ОФ МРТК лежат экспертные оценки. В результате определенной субъективности этих оценок и отсутствия представленного в явном виде описания процесса их формирования возникают ситуации следующих видов: 1) необходимые компоненты МРТК в ее состав не включаются или включаются в недостаточном количестве, в результате чего выполнение поставленных задач задерживается или производится

неэффективно; 2) в состав МРТК включаются явно ненужные компоненты, доставка и развертывание которых мешает проведению необходимых мероприятий; 3) в состав МРТК включается явно избыточное число некоторых нужных компонент, наличие которых существенно затрудняет решение задач оперативного управления ими.

Второй недостаток проявляется в виде ситуаций неконтролируемого взаимодействия отдельных компонентов МРК, входящих в МРТК. Ряд случаев такого взаимодействия был документально зафиксирован в процессе проведения поисково-спасательной операции на месте катастрофы ТУ-154Б.

Операция по поиску и подъему самолёта ТУ-154Б характеризовалась плотным взаимным расположением компонент МРТК, в явном виде представленным на рис. 4.



Рисунок 4 – Визуальная обстановка в районе поиска самолета ТУ-154Б 26 декабря 2016 года

Особенности операции старший аэромобильной группировки Центра по проведению спасательных операций особого риска (ЦСООР) «Лидер» (МЧС) в Сочи подполковник П. Гриценко описывает следующим образом:

«В акватории одновременно работало, во-первых, колоссальное число специалистов и техники ... Второй особенностью операции стало то, что бок о бок работали сотрудники разных ведомств. В одной акватории океанские корабли министерства обороны стояли бок о бок с надувными лодками и спасательными водолазными катерами... в одном месте скопилось много судов и специалистов разных ведомств. Концентрация внимания была предельно высока: один расчет, например, поднимает турбину, второй тут же рядом поднимает фрагменты обломков, и ты постоянно следишь, чтобы кто-то не оказался под турбиной, которая не дай бог сорвется. Таким образом, ты следишь за своей безопасностью, за безопасностью товарища и из своего, и из чужого подразделения. ... Абсолютно нормальной ситуацией было услышать от водолаза с глубины: *«Я вижу робота»* и ответить ему: *«Ну, ничего страшного, следи за чистотой сигнального конца, чтобы вы не переплелись вместе, и продолжай работу»*.

Рассмотрим более подробно ситуацию неконтролируемого взаимодействия конечных компонент двух МРК.

В качестве взаимодействующих могут выступать любые сочетания конечных компонент (человек-водолаз, ОПА, АНПА, РТПА, ТПА и др.) любых МРК, входящих в состав ОФ МРТК. Любая из этих компонент является частью конструктивно законченного промышленного изделия — МРК, включающего в себя транспортную систему, специальную (технологическую, рабочую) систему и систему управления. Любой МРК может самостоятельно выполнять любую из свойственных ему функций. Другими словами, система управления любого МРК способна адекватно управлять как транспортной, так специальной системой. В процессе выполнения свойственных функций в составе ОФ МРТК конечный компонент любого МРК может обнаружить конечный компонент другого МРК. При этом даже в случае взаимного обнаружения и оповещения соответствующих систем управления ни сами конечные компоненты взаимодействующих МРК, ни их системы управления не смогут гарантировать

согласованность, а значит и безопасность возникшего взаимодействия, ввиду отсутствия правил такого взаимодействия.

Налицо противоречие между необходимостью плотного взаимодействия МРК, входящих в состав ОФ МРТК, и отсутствием правил и методов организации взаимодействия разнородных МРК.

Следует отметить, что это противоречие справедливо и в отношении ПП МРТК, где оно частично разрешается за счет исключения случаев непосредственного взаимодействия МРК. Последнее достигается двумя способами: 1) применением МРК, способных выполнить всю процедуру решения поставленной критериальной задачи; 2) исключением случаев опасного сближения и взаимного обнаружения используемых МРК.

Использование МРК, способных выполнить всю процедуру решения поставленной задачи, исключает необходимость передачи контакта с исследуемым (обследуемым, спасаемым, уничтожаемым и т.п.) объектом другому МРК в целях продолжения работы с ним. Другими словами, первый способ исключает необходимость непосредственного взаимодействия конечных компонентов различных МРК для выполнения всей процедуры решения поставленной задачи. Однако, любой МРК, будучи способен реализовать всю процедуру целиком, может быть не способен осуществлять ее с заданной результативностью (эффективностью). Последнее вызывает необходимость применения не одного, а группы МРК. В такой ситуации используется второй способ, который исключает возможность опасного сближения и взаимного обнаружения используемых МРК за счет директивного планирования траекторий их перемещения.

Однако исключить случаи опасного сближения и взаимного обнаружения взаимодействующих МРК даже при централизованном управлении невозможно, когда погрешности системы навигации становятся соизмеримы с дистанциями сближения МРК. С учетом последнего следует считать, что противоречие между необходимостью плотного взаимодействия МРК и отсутствием правил и методов организации взаимодействия разнородных МРК имеет место во всех видах современных МРТК.

### **Заключение**

Разработка методов, моделей и процедур управления взаимодействием разнородных мобильных робототехнических комплексов в составе их оперативно формируемых группировок представляет собой одну из наиболее актуальных проблем подводной робототехники. Эта проблема является частью более общей проблемы - проблемы функциональной совместимости всех беспилотных систем, которая рассматривается в “Комплексной дорожной карте развития беспилотных систем на 2011 – 2036 годы” (Unmanned Systems Integrated Roadmap FY2011-2036) МО США в качестве проблемы номер один.

1. Мобильные робототехнические комплексы для проведения аварийно-спасательных работ и пожаротушения. Классификация. Общие технические требования. Методы испытаний. [Текст]: ГОСТ Р 54344-2011. – Введ. 2012-07-01. - М.: Стандартинформ, 2015. – 30 с. URL: <http://meganorm.ru/Index2/1/4293794/4293794887.htm> (дата обращения: 12.03.2017)
2. Словарь-справочник терминов нормативно-технической документации / Словарное издательство ЭТС (Электронные и Традиционные Словари), 2008. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.ets.ru/pg/r/dict/ru\\_term.htm](http://www.ets.ru/pg/r/dict/ru_term.htm) (дата обращения: 12.03.2017)
3. Агеев М.Д. и др. Автономные подводные роботы: системы и технологии – М.: Наука, 2005. – 398 с. URL: <http://www.twirpx.com/file/681403/> (дата обращения: 12.03.2017)
4. Аппараты необитаемые подводные. Классификация [Текст]: ГОСТ Р 56960-2016. – Введ. 14.06.2016. -М.: Стандартинформ, 2016. – 7 с.
5. Роботы и дроны [Электронный ресурс]. - URL: <http://prorobots.livejournal.com/101597.html> (дата обращения: 12.03.2017).
6. Иванов А.И., Лазутина Н.А., Сахabetдинов И.У. Сетевые аспекты группового поведения автономных подводных аппаратов / Сб. “Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения”: Материалы конференции с международным участием. – М.: Институт проблем управления им. Трапезникова РАН, 2010. - С. 548-551. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=22503581> (дата обращения: 12.03.2017)
7. Иванов Д.Я. Формирование строя в большой группе мобильных роботов с использованием метода паттернов // Робототехника и техническая кибернетика. 2016. № 2 (11). С. 39-44. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=26153340> (дата обращения: 12.03.2017).
8. Рой роботов. [Электронный ресурс]. - URL: <http://www.krasfun.ru/2014/08/roj-robotov/> (дата обращения: 12.03.2017).

9. Инзарцев А.В., Павин А.М., Багницкий А.В. Планирование и осуществление действий обследовательского подводного робота на базе поведенческих методов // Подводные исследования и робототехника. 2013. № 1 (15). С. 4-16. URL: [http://elibrary.ru/download/elibrary\\_20889718\\_2238108.pdf](http://elibrary.ru/download/elibrary_20889718_2238108.pdf) (дата обращения: 12.03.2017)
10. Инзарцев А.В., Грибова В.В., Клещёв А.С. Интеллектуальная система для формирования адекватного поведения автономного подводного робота в аварийных ситуациях // Подводные исследования и робототехника. 2015. № 2 (20). С. 4-11. URL: [http://elibrary.ru/download/elibrary\\_25311606\\_18541543.pdf](http://elibrary.ru/download/elibrary_25311606_18541543.pdf) (дата обращения: 12.03.2017)
11. Матвиенко Ю.В., Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Щербатюк А.Ф. Перспективы повышения эффективности автономных подводных роботов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 1 (174). С. 123-141. URL: [http://elibrary.ru/download/elibrary\\_25994588\\_43281381.pdf](http://elibrary.ru/download/elibrary_25994588_43281381.pdf) (дата обращения: 12.03.2017)
12. Мартынова Л.А., Машошин А.И., Пашкевич И.В., Соколов А.И. Система управления – наиболее сложная часть автономных необитаемых подводных аппаратов // Морская радиоэлектроника. 2015. № 4 (54). С. 23-32. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=25258079> (дата обращения: 12.03.2017)
13. Мартынова Л.А., Машошин А.И., Пашкевич И.В., Соколов А.И. Интегрированная система управления автономного необитаемого подводного аппарата / Материалы 8-й Всероссийской мультиконференции по проблемам управления, Дивноморское, 28 сентября – 3 октября 2015г. – Т. 3. – С. 191-193.
14. Мартынова Л.А., Машошин А.И., Пашкевич И.В., Соколов А.И. Алгоритмы, реализуемые интегрированной системой управления АНПА // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. №1 (162). URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/algoritmy-realizuemye-integrirovannoy-sistemoy-upravleniya-apra> (дата обращения: 12.03.2017)
15. Машошин А.И., Соколов А.И. Интегрированная система управления автономного необитаемого подводного аппарата / Материалы 3-й Всерос. научно-техн. конф., Дивноморское, Геленджик, 29 сентября – 4 октября 2014 г. – Т. 2 – С. 136-141. URL: <http://www.twirpx.com/file/1638290/> (дата обращения: 12.03.2017)
16. Клячко Л.М., Ханычев В.В. Планирование развития морских робототехнических комплексов военного назначения // Проблемы развития корабельного вооружения и судового радиоэлектронного оборудования. 2015. №4. С. 59-65 URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=23820420> (дата обращения: 12.03.2017)
17. YouTube | Брифинг официального представителя Минобороны России по ситуации с крушением самолета Ту-154 в районе Сочи по состоянию на 21:00 (мск) 26.12.2016 [Электронный ресурс]. - URL: <https://www.youtube.com/watch?v=9F5Zl2tanXU> (дата обращения: 12.03.2017)

*V. Kozhemyakin*

## **GAMMA RADIATION DETECTION UNITS FOR USE WITH REMOTELY PILOTED AIRCRAFTS FOR RADIATION MONITORING PURPOSES**

### Abstract

Because of intensive development and practical application of small unmanned aerial vehicles into practice, it seems appropriate and effective to apply equipment of this class to radioecological monitoring. The range of new smart gamma radiation detection units for use as part of such small UAVs, capable of dosimetric and spectrometric remote monitoring of territories and sites, is offered.

The results of full-scale tests conducted in contaminated zones on the territory of the Republic of Belarus and their comparison with simulation data are presented. Examples of use of individual detection units in assembly with small UAVs are given.

Keywords: small unmanned aerial vehicles, gamma radiation, remote radiation monitoring, dose rate, equipment for radiation monitoring, gamma radiation detection units, altitude conversion coefficient, Monte Carlo simulation.

## БЛОКИ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СОСТАВЕ ДИСТАНЦИОННО УПРАВЛЯЕМЫХ БЕСПИЛОТНЫХ СРЕДСТВ РАДИАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА

Научно-производственного унитарное предприятие «АТОМТЕХ», Республика Беларусь, г. Минск  
info@atomtex.com

### Аннотация

В связи с интенсивным развитием и внедрением в практику беспилотных малоразмерных летательных аппаратов (БМЛА) представляется целесообразным и эффективным привлечение технических средств этого класса в сферу радиоэкологического мониторинга. Для использования в составе БМЛА предлагается линейка созданных интеллектуальных блоков детектирования гамма-излучения для дозиметрического и спектрометрического дистанционного контроля территорий и объектов.

Представлены результаты натурных испытаний, проведенных в радиоактивно-загрязненных зонах Республики Беларусь, их сравнение с данными моделирования. Приведены примеры использования отдельных блоков детектирования в составе БМЛА.

Ключевые слова: беспилотные малоразмерные летательные аппараты, гамма-излучение, дистанционный радиационный мониторинг, мощность дозы, аппаратура радиационного контроля, блоки-детектирования гамма-излучения, высотный пересчетный коэффициент, Монте-Карло моделирование.

Широкое распространение малоразмерных беспилотных систем в качестве средств обнаружения разноплановых наземных объектов стимулировало нарастающий интерес к бортовым малогабаритным устройствам детектирования гамма-излучения. Цель их применения в составе малоразмерных и миниатюрных летательных аппаратов – обеспечение дистанционного радиационного мониторинга окружающей среды в зонах, прилегающих к радиационно-опасным и радиационно-чувствительным объектам.

Для использования в составе таких летательных аппаратов предлагается линейка интеллектуальных блоков детектирования (датчиков) гамма-излучения, способная выполнять следующие функции в зависимости от их назначения и решаемых задач [1,2]:

- обнаруживать источники радиоактивного загрязнения;
- измерять уровни радиации на высоте полета;
- приводить измеренное значение мощности дозы на высоте полета к уровню 1 метр (при наличии информации о высоте полета над поверхностью объекта);
- осуществлять идентификацию радионуклидного состава загрязнения по гамма-спектрам;
- оценивать плотность поверхностного загрязнения гамма-излучающими радионуклидами.

В таблицах 1-2 приведены основные технические характеристики интеллектуальных блоков детектирования гамма-излучения, из числа которых может быть выбран потребителем приемлемый вариант в соответствии с допустимой массой полезной нагрузки и целевым применением. Во всех типах блоков детектирования осуществляется полная обработка информации до получения измеряемой величины (мощность дозы, спектр гамма-излучения), поступающей по интерфейсу связи на бортовые устройства беспилотных малоразмерных летательных аппаратов (БМЛА).

К настоящему времени сцинтилляционные блоки детектирования БДКГ-11М, БДКГ-24, БДКГ-04, БДКГ-211М, а также другие типы близких к ним по техническим характеристикам уже нашли свое применение в составе БМЛА.

Таблица 1. Спектрометрические блоки детектирования на основе сцинтилляторов NaI(Tl)

Основные характеристики	БДКГ-201М	БДКГ-203М	БДКГ-205М	БДКГ-11М БДКГ-211М	БДКГ-19М БДКГ-219М
Детектор NaI(Tl)	Ø25x16 мм	Ø25x40 мм	Ø40x40 мм	Ø63x63 мм	Ø63x160 мм

Диапазон энергий	20 кэВ – 3 МэВ				
Диапазон измерения мощности амбиентного эквивалента дозы (МД)	50 нЗв/ч – 1 мЗв/ч	30 нЗв/ч – 500 мкЗв/ч	30 нЗв/ч – 300 мкЗв/ч	30 нЗв/ч – 150 мкЗв/ч	0,03 – 50 мкЗв/ч
Предел основной относительной погрешности измерения МД	±20%				
Энергетическая зависимость относительно энергии 662 кэВ	±20% (40 кэВ – 3 МэВ)				
Чувствительность к гамма- излучению <sup>137</sup> Cs, (имп·с <sup>-1</sup> /мкЗв·ч <sup>-1</sup> )	165	400	800	2450	6000
Временная дискретность измерения	1/3 с	1/3 с	1/3 с	1/3 с	1/3 с
Типовое энергетическое разрешение для энергии 662 кэВ ( <sup>137</sup> Cs)	8%	8%	7,5%	7,5%	8%
Степень защиты	IP68	IP68	IP68	IP54 IP68	IP54 IP68
Интерфейс	USB / RS232 / RS485				
Диапазон рабочих температур	-35...+55°C	-35...+55°C	-35...+55°C	-20...+50°C -35...+55°C	-20...+50°C -35...+55°C
Относительная влажность воздуха (≤35°C без конденсации влаги)	≤98%	≤98%	≤98%	≤95% ≤98%	≤95% ≤98%
Габаритные размеры, масса	Ø63x313мм, 1 кг	Ø63x333м м, 1 кг	Ø63x333м м, 1 кг	Ø78x320м м, 1,7 кг Ø90x350м м, 2 кг	Ø76x422м м, 3 кг Ø90x430м м, 3,3 кг

Таблица 2. Дозиметрические блоки детектирования на основе сцинтилляционной пластмассы

Основные характеристики	БДКГ-04 БДКГ-204	БДКГ-24 БДКГ-224	БДКГ-30 БДКГ-230	БДКГ-32 БДКГ-232	БДКГ-103
Детектор на основе сцинтилляционной пластмассы	Ø30x15 мм	Ø50x40 мм	Ø50x40 мм	Ø70x80 мм	200x180x 70 мм
Диапазон энергий	15 кэВ – 3 МэВ 60 кэВ – 3 МэВ	30 кэВ – 3 МэВ	50 кэВ – 3 МэВ	35 кэВ – 3 МэВ	80 кэВ – 3 МэВ

Диапазон измерения мощности амбиентного эквивалента дозы	50 нЗв/ч – 10 Зв/ч	30 нЗв/ч – 1 Зв/ч	–	30 нЗв/ч – 500 мЗв/ч	30 нЗв/ч – 50 мЗв/ч
Диапазон измерения мощности поглощенной дозы	–	–	30 нГр/ч – 1 Г/ч	–	–
Предел основной относительной погрешности измерений	±20%	±20% ±15%	±20% ±15%	±20%	±20%
Чувствительность к гамма-излучению <sup>137</sup> Cs, (имп·с <sup>-1</sup> /мкЗв·ч <sup>-1</sup> )	70	530	600 имп·с <sup>-1</sup> / мкГр·ч <sup>-1</sup>	1700	15000
Энергетическая зависимость относительно энергии 662 кэВ	±35% ±25%	±25%	±25%	±25%	±40%
Временная дискретность измерения	0,1 с	0,1 с	0,1 с	0,1 с	0,1 с
Степень защиты	IP64 IP57	IP64 IP67	IP64 IP67	IP64 IP67	IP64
Интерфейс	RS232 RS485	RS232 RS485	RS232 RS485	RS232 RS485	RS232 RS485
Диапазон рабочих температур	-35...+55°C	-40...+50°C -40...+55°C	-40...+50°C -40...+55°C	-40...+50°C -40...+55°C	-40...+55°C
Относительная влажность воздуха (≤35°C без конденсации влаги)	≤98%	≤98%	≤98%	≤95% ≤98%	≤95%
Габаритные размеры, масса	Ø60x205м м, 0,45 кг Ø60x230м м, 0,55 кг	Ø60x200м м, 0,65кг Ø60x250м м, 0,75кг	Ø60x200м м, 0,65кг Ø60x200м м, 0,75кг	Ø76x245м м, 0,78 кг Ø76x245м м, 0,9 кг	360x220x x80 мм, 5 кг

В частности, высокочувствительный блок детектирования БДКГ-111 и широкодиапазонный блок детектирования БДКГ-104 гамма-излучения (дозиметрические) используются в аппаратуре дистанционного радиационного контроля БАРК-АТ102, созданной для оснащения белорусского летательного аппарата «Гриф-100» (рисунок 1а), а также используемой в составе белорусского БМЛА «Буревестник» (рисунок б)

Высокочувствительный спектрометрический блок детектирования БДКГ-11М, способный обеспечивать измерение мощности дозы гамма-излучения, а также спектра гамма-излучения для последующей идентификации радионуклидов в наземном комплексе управления и приема информации, установлен и апробирован на октокоптере «БАС» в Болгарии (рисунок 1в) для построения карты радиационной обстановки в зоне пункта захоронения радиоактивных отходов.

Широкодиапазонный дозиметрический блок детектирования БДКГ-24 апробирован в составе октокоптера и БМЛА планерного типа российской компании «ZALA AERO GROUP» (рисунок 1г, д).

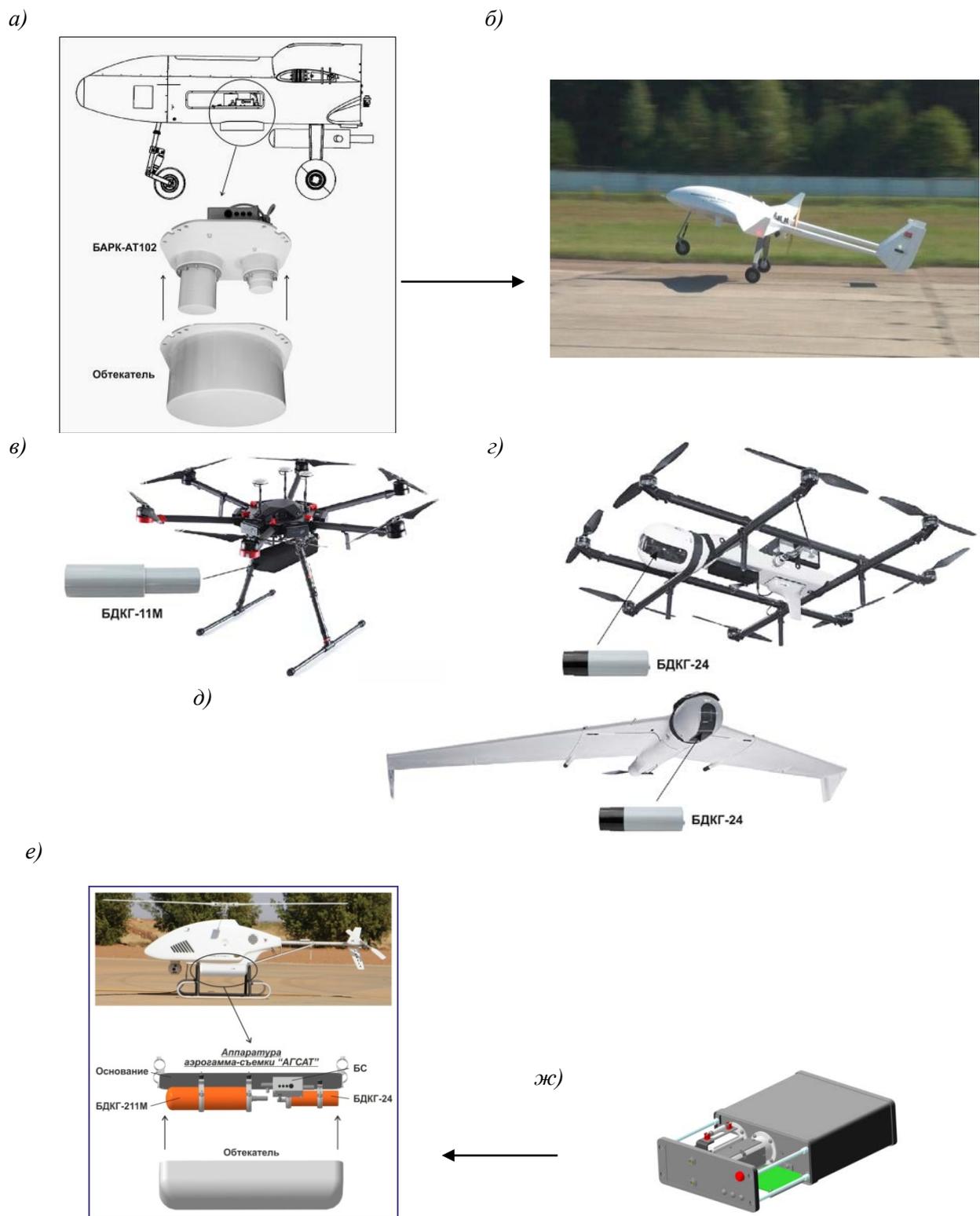


Рисунок 1 – Аппаратура радиационного контроля для: а) летательных аппаратов «Гриф-100» и б) «Буревестник»; в) октокоптера «БАС»; г) октокоптера и д) БМЛА планерного типа «ZALA AERO GROUP»; е) и ж) – варианты для беспилотного вертолета «INDELLA»

Для белорусского БМЛА INDELA SKY/AT вертолетного типа создан экспериментальный образец аппаратуры «АГСАТ» на основе блоков детектирования БДКГ-211М и БДКГ-24 (рисунок 1е), а также макет «АГСАТ-1» на основе блока детектирования БДКГ-103 (рисунок 1ж).

Принцип дистанционной гамма-спектрометрии с последующей идентификацией радионуклидов во всех приведенных в таблице 1 блоках детектирования, а также других типов с использованием NaI(Tl) – сцинтилляционных спектрометров, наиболее эффективен для измерений на высотах полета не более 50 м. В таких случаях аппаратный спектр не перенасыщен компонентой рассеянного гамма-излучения, что позволяет успешно осуществить распознавание радионуклидов по линии полного поглощения в пределах энергетического разрешения.

Принцип дистанционной дозиметрии заключается в определении усредненных по площади уровней радиации на высоте полета с использованием «высотных коэффициентов пересчета» к уровню 1 м от поверхности земли. Наименьшая зависимость (методическая погрешность) этих коэффициентов от энергии гамма-излучения наземных излучателей обеспечивается при высотах полета не более 150 м. Энергия первичного гамма-излучения – наиболее влияющий, но не единственный фактор, сказывающийся на точности определения уровней мощности дозы на высоте 1 м. Другие факторы – аппаратная погрешность, погрешность из-за влияния реальных условий измерений и др. также вносят свой вклад, в итоге суммарная погрешность [3] дистанционных измерений в диапазоне высот полета до 150 м составляет 50 % при доверительной вероятности равной 0,95.

Проблема оценки масштаба и плотности загрязнения местности радионуклидом  $^{137}\text{Cs}$  по-прежнему актуальна на территории стран, пострадавших от последствий Чернобыльской катастрофы, а также в Японии после аварии на АЭС «Фукусима». Имеется широкий спектр приборов и аппаратуры, позволяющий провести измерение мощности дозы и спектрального распределения гамма-излучения в полевых условиях с GPS-привязкой на местности. Но без соответствующего программного средства комплексный анализ полученных данных крайне трудоемкий и непроизводительный.

Ранее нами было разработано программное обеспечение «GARM», которое служит инструментом визуализации и анализа данных радиационных измерений, выполненных приборами и аппаратурой с наличием функции GPS-привязки на местности. В процессе полевых испытаний оборудования радиационного контроля (использовался прибор МКС-АТ6101С с блоками детектирования БДКГ-11М и БДКГ-04) на зараженной местности совместно с МАГАТЭ, подготовительной комиссией Организации договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ОДВЗЯИ), Полесским государственным радиационно-экологическим заповедником (ПГРЭЗ) и другими организациями [4] была выявлена необходимость в предоставлении пользователю аналитической информации о масштабе и поверхностной плотности загрязнения местности радионуклидом  $^{137}\text{Cs}$  на основе данных воздушной радиационной съемки. Для оценки масштаба загрязнения был разработан и реализован алгоритм построения изолиний и градиентной заливки области по интересующему параметру.

В ходе натурных испытаний получены большие массивы дозиметрических данных о радиоактивном загрязнении территории: значения мощностей доз гамма-излучения на уровне 1 м (рисунок 2) от поверхности земли и значения мощностей доз гамма-излучения на высоте 50, 100, 150 и 200 м над поверхностью земли с борта вертолета МИ-2. Результатом обработки данных в программе GARM является оценка мощности дозы гамма-излучения на высоте 1 м над поверхностью земли по значениям мощности дозы гамма-излучения, измеренным на высотах от 50 до 200 м. При сличении результатов дистанционной съемки и наземных измерений на 1 м установлено их совпадение в пределах  $\pm 10\%$  (таблица 3). При этом в качестве высотных коэффициентов пересчета использовались их численные значения, полученные путем математического моделирования (метод статистических испытаний Монте-Карло) с учетом высоты полета, температуры и давления атмосферы, глубины слоя преимущественного залегания радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  в почве, плотного лугового травяного покрова, а также экранирования блоков детектирования корпусом вертолета МИ-2.

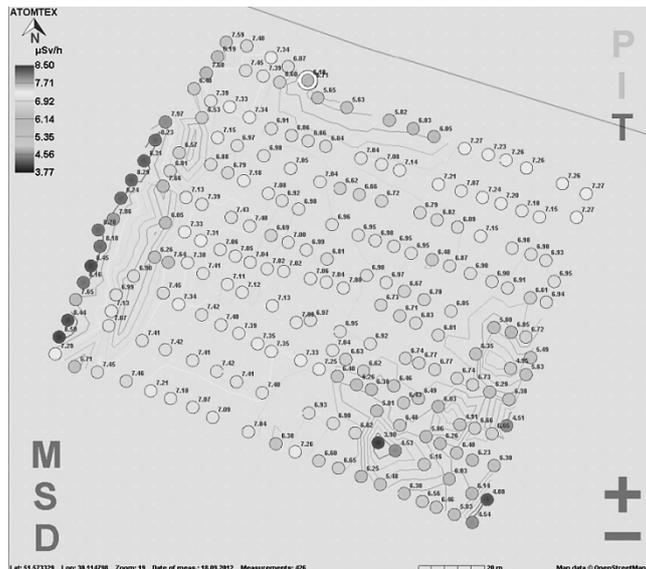


Рисунок 2 – Результаты пешеходного сканирования

Таблица 3. Сличение дистанционной съемки и наземных измерений на высоте 1 м над поверхностью земли результатов

Высота $h$ , м	$K_{h(11M)}^{экср}$	$K_{h(04)}^{экср}$	$\bar{K}_h^{экср}$	$K_h^{теор}$	$K_{nn} \cdot K_h^{теор}$ ( $K_h^{теор}$ с учетом поправки $K_{nn}$ )	Относительное отклонение теоретических данных от экспериментальных, %
50	1,87	2,28	2,07	2,16	1,94	+6,5
100	3,03	3,63	3,33	3,58	3,23	+3,0
150	4,28	4,96	4,62	5,64	5,08	-9,1
200	7,07	7,85	7,46	8,77	7,90	-5,8

На рисунках 3 и 4 приведены картограммы мощности дозы гамма-излучения при воздушной гамма-съемке на выбранном вполне однородном по уровням радиации участком-мишенью на территории ПГРЭЗ.

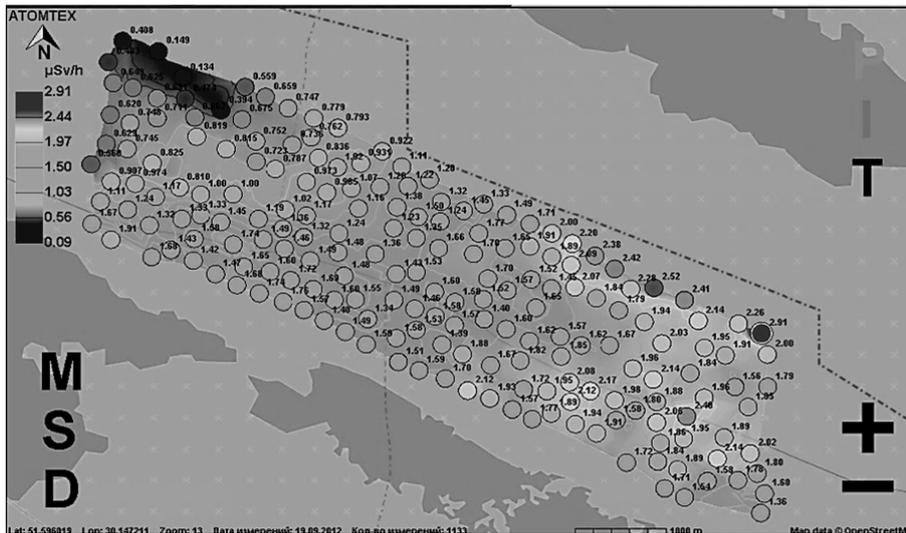


Рисунок 3 – Данные аэрогамма-съемки в ПГРЭЗ. Мощность дозы гамма-излучения на высоте 100 м над поверхностью земли. Размер площадки 8 км на 2 км

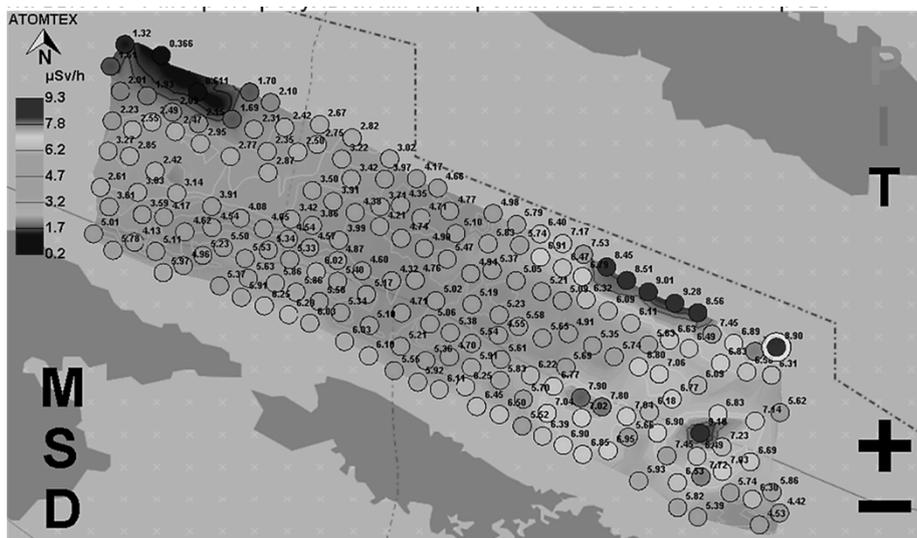


Рисунок 4 – Данные по оценке мощности дозы гамма-излучения на высоте 1 м по результатам измерений на высоте 100 м

С использованием базы данных ПГРЭС по удельной активности и поверхностной плотности загрязнения почв радионуклидом  $^{137}\text{Cs}$  было проведено их сравнение с данными по оценке плотности загрязнения, полученными при наземной и воздушной съемке. Предварительный анализ данных показал, что расхождение в определении поверхностной плотности загрязнения находится в пределах  $\pm 30\%$  (рисунок 5).

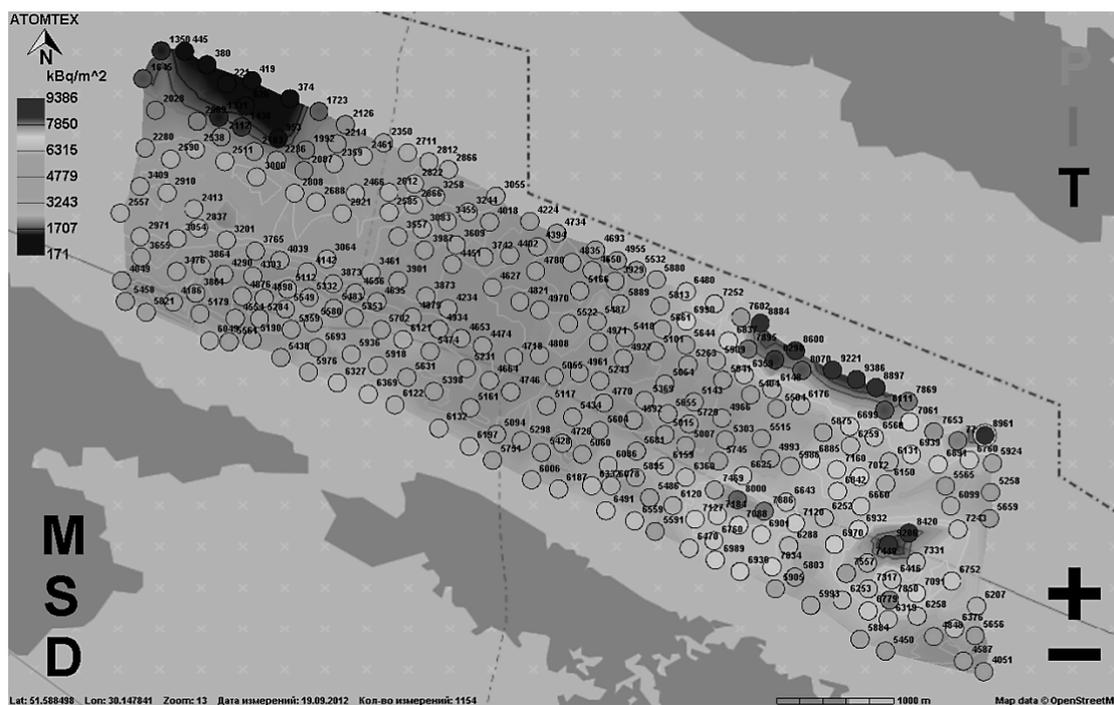


Рисунок 5 – Оценка плотности загрязнения местности радионуклидом  $^{137}\text{Cs}$  (средняя глубина залегания  $^{137}\text{Cs}$  в почве на всей территории составляет 5 см, средняя плотность почвы  $1,26 \text{ г/см}^3$ )

В случае точечных гамма-источников или локальных загрязнений (несколько десятков метров) наиболее целесообразным представляется решение задачи их поиска и обнаружения. При этом по направлению полета будет наблюдаться нарастание и спад уровней радиации, точка максимума фиксируется координатами его местоположения, а затем осуществляется пролет через данную точку, перпендикулярно начальному направлению полета. Локализация и измерение радиационных уровней, а также спектров гамма-излучения наиболее успешно реализуются на БМЛА вертолетного типа.

Работы по расширению линейки интеллектуальных датчиков радиации продолжаются. В частности, возникают потребности в создании измерительных каналов дозиметрического и

спектрометрического назначения, в т.ч. широкодиапазонных блоков детектирования массой 100-400 г. На данный момент времени уже имеются экспериментальные образцы, удовлетворяющие этим требованиям.

Полученные результаты представляются актуальными для данного весьма быстро развивающегося направления использования беспилотных систем [5, 6].

1. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Аварийно-спасательные работы при ликвидации последствий аварий на радиационно-опасных объектах. Общие требования. Межгосударственный стандарт. ГОСТ 22.8.06-2002.
2. Израэль Ю.А. Гамма-излучение радиоактивных выпадений / Ю.А. Израэль, Е.Д. Стукин // М., Атомиздат, 1967.
3. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. ГОСТ Р 8.736-2011.
4. Отчет о проведении натурных испытаний спектрометрических радиационных сканеров АТ6101С, изготовленных по заказу подготовительной комиссии организации договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний. Фонды УП «АТОМТЕХ», Минск, 2012.
5. Бахур А.Е. Перспективы использования БПЛА в радиоэкологии и при поисковых геологоразведочных работах / А.Е. Бахур, А.В. Стародубов // АНРИ. –2016. – №3. – С. 2–8.
6. Кожемякин, В.А. Интеллектуальные датчики радиации для малоразмерных беспилотных систем / В.А. Кожемякин, В.П. Полищук // 7-я Международная научная конференция по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения (Минск, 20-22 мая 2017 г.): сб. научных статей. В 3 ч.Ч.1. – Минск, 2017. – С. 164-173.

*N.A. Rudianov, V.S. Khruschev*

**ORGANIZATION OF THE ACQUISITION AND FORMALIZATION OF KNOWLEDGE OF INTELLIGENT SYSTEMS OF PROSPECTIVE AUTONOMOUS MILITARY ROBOTIC COMPLEXES IN THE COURSE OF PILOT OPERATION OF REMOTE-CONTROLLED COMPLEXES**

*3 CNII MD RF, Moscow*

**Annotation**

The issues of acquiring knowledge for the construction of intelligent weapon control systems for autonomous terrestrial robots are considered. This stage of the life cycle is proposed as an experimental operation of the operation of robotic military complexes used to determine the appearance and formation of intelligent decision-making systems, the acquisition and formalization of knowledge about typical tasks of operation, a list, characteristics and characteristics of typical goals, sequence of actions, a list of emerging Alternatives when making decisions in the course of combat operations and the rules for their selection.

*Н.А. Рудианов, В.С. Хрущев*

**ОРГАНИЗАЦИЯ ПРИОБРЕТЕНИЯ И ФОРМАЛИЗАЦИИ ЗНАНИЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ПЕРСПЕКТИВНЫХ АВТОНОМНЫХ РТК ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ В ХОДЕ ОПЫТНО-ВОЙСКОВОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ДИСТАНЦИОННО-УПРАВЛЯЕМЫХ КОМПЛЕКСОВ**

*3 ЦНИИ МО РФ, г. Москва*

**Аннотация**

Рассматриваются вопросы приобретения знаний для построения интеллектуальных систем управления вооружением автономных наземных роботов. Предлагается такой этап жизненного цикла, как опытно войсковая эксплуатации робототехнических комплексов военного назначения использовать для определения облика и формирования интеллектуальных систем принятия решений, приобретения в ходе нее и формализации знаний о типовых задачах функционирования, перечню, характеристикам и признакам типовых целей, последовательности действий, перечню возникающих альтернатив при принятии решений в ходе боевой работы и правилах их выбора.

В [1] показано, что в случае, когда робототехнический комплекс оснащается вооружением ближнего боя, его применение в режиме дистанционного управления становится нерациональным, так как эффективное функционирование робота требует участия нескольких операторов, обеспечивающих движение робота, разведку обстановки, поиск и выбор цели, обстрел и оценку результатов стрельбы, принятие тактических решений. Дистанционно-управляемые РТК имеют ряд принципиальных недостатков и ограничений, повышенные требования к каналу связи, ограниченный радиус действия, демаскировка объекта и пункта управления, а также возможность применения средств радиоэлектронного и огневого противодействия вследствие интенсивного радиообмена.

Применение различных методов повышения эффективности дистанционного управления имеет смысл для решения специальных или обеспечивающих задач при одиночном применении РТК. При массовом использовании в боевых действиях групп разнородных комплексов дистанционное управление как основной способ применения РТК будет неприемлемо.

Практически все усилия по повышению уровня автономности РТК в настоящее время связаны с автономным движением, а движение является лишь одним из этапов процесса боевой работы. Обеспечение автономности функционирования роботов и их групп, находящихся на значительном удалении от центра управления, при выполнении ими задач по назначению связано прежде всего с разработкой интеллектуальных систем управления вооружением боевых роботов, включая все основные фазы боевой работы: поиск и обнаружение целей, оценка их важности (опасности), выбор цели для обстрела, выбор оружия и методов стрельбы, наведение оружия, стрельба, оценка результатов стрельбы и перенос огня.

Существует целый ряд методов решения задач, составляющих основу интеллектуальных систем управления, основанных на приобретении и формализации знаний. Выбор метода решения конкретных задач зависит от многих факторов [2]:

Во-первых, должно быть достигнуто соответствие метода принятия решений характеристикам задачи:

- определенность (относительно каждой альтернативы известно, что она неизменно приводит к некоторому конкретному исходу – все функциональные зависимости детерминированы);

- неопределенность в смысле случайности (каждая альтернатива приводит к одному из множеств возможных исходов, но каждый исход имеет известную или приписываемую вероятность появления);

- неопределенность в виде нечеткости (вероятности исходов неизвестны, тем не менее известны все альтернативы и множество возможных исходов, а также возможно задать предпочтение на этом множестве);

- тип множества альтернатив (дискретное или непрерывное);

- количество критериев;

- тип постановки задачи и др.

Во-вторых, существенное влияние на выбор метода оказывают характеристики экспертов: их возможности, квалификация, способности, связанные с использованием субъективных критериев, временных ограничений, возможностью давать качественные и количественные оценки.

В-третьих, на выбор метода оказывает влияние представление экспертов о последствиях принятия решения и возможность последующего обоснования использования метода, степень «доверия» ему, предшествующий опыт использования метода.

В зависимости от перечисленных факторов, могут применяться различные методы объединения информации: байесовская логика, нечеткая логика, коэффициенты уверенности и др.

В 80-х -90-х годах прошлого века интенсивно проводились исследования по разработке систем принятия решений реального времени. Но в тот момент результаты этих исследований оказались невостребованным в связи с резким сокращением НИОКР в области вооружения и военной техники и неготовности на тот момент технологий робототехники к обеспечению автономного функционирования. Частично эти результаты были внедрены в системы поддержки авиационных комплексов, но в наземной технике они не используются. При этом существующие методы автоматизации процессов принятия решений в ходе боевой работы, которые являются основным содержанием систем управления вооружением РТК, в принципе, позволяют создавать автономные интеллектуальные системы. Основные сложности возникают при приобретении знаний – процессе получения знаний от эксперта или каких-либо других источников и передаче их интеллектуальной системе, эффективность которой целиком и полностью зависит от качества извлеченных знаний и правильности их представления.

Несмотря на многочисленные попытки автоматизировать процессы приобретения знаний, в настоящее время и в обозримом будущем реальна следующая модель приобретения знаний: эксперт с помощью инженера по знаниям решает задачи определения необходимости модификации или расширения знаний, и извлечения новых знаний о предметной области. Преобразованием знаний в форму понятную интеллектуальной системе занимается инженер по знаниям [3]. Модификацию знаний производит сама интеллектуальная система, пользуясь встроенными возможностями. Таким образом, роль экспертов как носителей знаний не снижается.

При создании интеллектуальных систем управления вооружением в процессе роботизации существующего вооружения в качестве источников знаний выступают: члены боевых расчетов комплексов, преподаватели учебных центров и военных училищ, инструкции по эксплуатации, учебники, правила стрельбы, уставы и т.п. автоматических устройств на ее основе является задачей сложной, но реальной.

Иное дело в случае интеллектуальных систем управления вооружением автономных роботов, создаваемых изначально как безэкипажные. Как правило они будут обладать комплексированной системой технического зрения, развитой информационной системой на основе датчиков различной физической природы, отсутствием подсистемы индикации и представления информации. Состав оборудования и вооружения может существенно отличаться от обитаемых комплексов-прототипов, если таковые вообще будут существовать, а опыта управления, как правило, нет.

Процесс приобретения знаний для построения интеллектуальной системы управления вооружением сталкивается с существенными сложностями – отсутствием экспертов, обладающих опытом принятия решений для конкретного образца вооружения, инструкций в части их боевого применения и других источников знаний о предметной области. Фактически обучать необходимо не только системы принятия решений, но и собственно учителей – экспертов. Это требует создания развитой модели внешней среды, включая противодействующего противника, описания множества боевых ситуаций и правил использования имеющегося оборудования и вооружения, алгоритмов поведения робота.

В тоже время, по существующим правилам принятию РТК военного назначения на снабжение предшествует этап опытно-войсковой эксплуатации (ОВЭ). Целями опытно-войсковой эксплуатации РТК являются:

- определение возможности и особенностей использования образцов РТК в бою общевойсковых формирований тактического звена для мотострелковых, парашютно-десантных и разведывательных подразделений;

- первоначальное освоение РТК с оценкой его тактико-технических, эксплуатационных и боевых характеристик в дневных и ночных эксплуатационных условиях;

- отработка методик боевого применения РТК;

- оценка эффективности РТК;

- проверка работоспособности РТК и соответствия функциональности РТК требованиям технического задания;

- фиксация сбоев, ошибок, недостатков, возникающих и выявленных в ходе опытно-войсковой эксплуатации;

- выдача рекомендаций о возможности принятия РТК на снабжение и целесообразности их промышленного производства.

Задачи, решаемые в ходе опытно-войсковой эксплуатации:

- оценка возможности обучения расчетов РТК из состава военнослужащих, проходящих военную службу по контракту;

- определение возможности и особенностей применения подразделений, оснащенных РТК, в общевойсковом бою мотострелковых, парашютно-десантных и разведывательных подразделений типа «отделение-взвод-рота-батальон»;

- оценка боевых и эксплуатационных возможностей образцов и подразделений, оснащенных РТК, в различных видах боя и различных условиях эксплуатации;

- оперативное устранение причин сбоев, ошибок, недостатков, возникающих в процессе опытно-войсковой эксплуатации;

- внесение изменений в техническую и эксплуатационную документацию по итогам опытно-войсковой эксплуатации;

- разработка методических рекомендаций по боевому применению РТК.

Таким образом, объем, привлекаемые средства и сроки (до года) ОВЭ позволяют говорить о возможности приобретения в ходе нее формализации знаний о типовых задачах функционирования, перечню, характеристикам и признакам типовых целей, последовательности действий, перечню возникающих альтернатив при принятии решений в ходе боевой работы и правилах их выбора и т.п. для РТК военного назначения.

Представляется целесообразным использовать этот период жизненного цикла для определения облика и формирования интеллектуальных систем принятия решений РТК военного назначения.

Для этого необходимо привлечение инженеров по знаниям во время всего цикла ОВЭ для формирования опросных листов по различным разделам этапа боевой работы с целью определения:

типовых ситуаций применения РТК и их признаков;

признаков целей для решения задач выбора;

признаков ситуаций, требующих применения целевого оборудования, правила выбора той или иной целевой нагрузки;

перечня и характеристик признаков успешности применения целевого оборудования;

правил перехода к следующим этапам боевой работы и т.д.

Этот перечень зависит от конкретного типа РТК и его назначения. Члены боевых расчетов в ходе ОВЭ осваивая технику и опытным путем формируя правила ее боевого применения одновременно будут участвовать в их формализации для последующей автоматизации процессов принятия решений и формирования интеллектуальных систем РТК военного назначения.

Выводы. В настоящее время отсутствуют специалисты по боевой работе и применению РТК военного назначения, как и вербализированные знания в этой области в виде учебников, инструкций, правил боевого применения. Организация работы в ходе ОВЭ по приобретению и формализации знаний членов боевых расчетов и командиров подразделений одновременно с их обучением работе на не имеющей аналогов технике должна значительно сократить время разработки интеллектуальных систем принятия решений автономных РТК военного назначения.

1. И.Б. Шеремет, Н.А. Рудианов, А.В. Рябов, В.С. Хрущев. О необходимости разработки концепции построения и применения автономных робототехнических комплексов военного назначения. Экстремальная робототехника. Труды Международной научно-технической конференции.- Санкт-Петербург, 2016, с. 35-39.
2. Искусственный интеллект. – В 3-х кН. Кн.2. Модели и методы: Справочник / Под ред. Поспелова Д.А. – М.: Радио и связь, 1990 – 304с.
3. Диалоговые системы и представление знаний /Кокорева Л.В., Перевозчикова О.Л., Ющенко К.Л.; АН Украины. Ин-т кибернетики.- Киев: Наук. Думка, 1992.- 448с.

*M. Dudziak, O. Granichin*

## **EXTREME COMPLEX SYSTEMS, UNCERTAIN AND UNCOOPERATIVE ROBOTIC NETWORKS, AND CONTROL STRATEGIES BASED UPON STOCHASTIC ALGORITHMS**

*Institute for Innovative Study, Ann Arbor, Michigan martin@instinnovstudy.org  
Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia oleg\_granichin@mail.ru*

### **Abstract**

Deterministic control of complex systems, particular those with multiple components exhibiting high degrees of uncertainty and asymmetric behavior, is subject to both unpredictable error and computational performance limits. This is seen particularly in systems whose components (such as robots, satellites and other “agent” devices) are constrained by limited size, power and computational capacity, such as in remote operations such as space-based engineering. Stochastic approximation and randomized algorithm methods offer sound alternatives when coupled with adaptive pattern recognition and machine learning, plus experience-trained heuristic models. Heterogeneous approaches that can incorporate learning and self-correction models during remote autonomous operations offer solutions for reducing state space complexity and avoiding critical instability and catastrophe points. Experiments in aerodynamic turbulence are providing a platform and set of models that can be transferred into such diverse applications as cooperative robotics in construction, network management, biomedical monitoring, and space-based challenges such as defense from asteroid impacts.

Keywords: complex systems, uncertainty, stochastic algorithm, randomized algorithm, cooperative network, device independence, space robotics, command and control, artificial intelligence, machine learning

Multi-agent networks and autonomous systems including mobile-capable robots become more common in life-critical applications such as mass transportation, military and security operations, manufacturing, healthcare, and public infrastructure management. Such systems are increasing in their capabilities and diversities of tasks that can be performed, including unattended tasks that can be life-saving when performing optimally and according to design. Stabilization, cooperation within confined physical and operational environments, and solutions to turbulence are among the types of problems that are addressable and desirable, thus compelling the argument for introducing more robots and more AI (artificial intelligence) into critical infrastructure and life-support systems.

However, there are also vulnerabilities that derive from the inherent high dimensionality of any system state space and the critical points into which functions within such a system may lead. Simply put, singularity events can be more sharply and irreversibly catastrophic. The goal of reducing a complex state space is a challenge in any environment where there can be uncertainty or fuzziness with regard to that dimensionality and the relations between parameters which may be inherently noisy or difficult to measure under any circumstances. Risks of system instability and criticality are further exacerbated by conditions that can be introduced from external agents and unpredictable configurations into which even a well-designed and well-tested system (e.g., aircraft, rail, satellite, wireless network) may be placed. External-origin disorders and failures increase in relation to not only complexity within a control system model and its physical and computational implementation, but also in response to other paths to vulnerability.

The outcome for end-users (passengers, patients, bankers, communication networks, civil engineers) may be quite more severe in cases of critical mechanical failure, incidents of cyberhacking, or system critical points and singularities that were not projected during the design process. The increased capabilities (as well as the sharper vulnerabilities) may often be linked directly to the capabilities (and limitations) of machine learning and artificial intelligence (AI) mechanisms, coupled with the performance speeds and responsiveness of computing and communication devices for managing the individual components and composite systems. Supercomputing, high-bandwidth and AI can offer a “double-edged sword” in many respects – improved or optimal performance and beneficial results, when everything is running smoothly, or else true “crash and burn” catastrophic results when some critical point has been reached, especially if the existence of the critical points or regions in a system's performance are unknown or insufficiently predictable.

All of these issues become even more delicate and potentially severe in impact when the operations are conducted in remote environments such as orbital, lunar or interplanetary space. The majority of space-based tasks, to date, have been generally limited to singular (even composite) devices (e.g., satellite or landing rover) with limited variations in the type of interactions that may take place. As complex as have been missions to Moon, Mars, Jupiter, Saturn, 67P/Churyumov–Gerasimenko and other destinations, there have been limited and strongly constrained operations involving two or more robot devices interacting with each other and/or with manipulation-type operations involving other objects such as an asteroid or a fragment of space debris. Moreover, command and control involving human operators has been highly constrained in order to accommodate normal signal transmission delays as well as periodic and asymmetrical breaks in uplink or downlink signaling. Space robotics has, until recently, been kept quite simple in comparison to what demands are now emerging, particularly in some areas of space engineering.

The growth of interest and the emergence of capable instrumentation – coupled with the need for productivity and commercial return values - demands much more complexity in future space operations. These include space-based construction and assembly for both habitation and manufacturing, asteroid mining, and also asteroid deflection and other forms of NEO impact deterrence. This “demand portfolio” alters radically the requirements for intelligent, adaptive, and fault-tolerant control systems. Deterministic models cannot work satisfactorily when parameters cannot be identified, measured and estimated with sufficient certainty. This critical claim is directed also at such quasi-deterministic models which include Bayesian probabilistic networks, neural networks, and other variants of both statistically-based and rule-based “machine learning.”

It is thus argued here that a new type of thinking about command and control is necessary, and with it, a new type of computing architecture as well, for the types of machines and systems that offer such dual-impact concerns which may be termed “Extreme Complex Systems” or XCS. However, this new cybernetics and new computation is not simply a move into multi-agent parallelism, which is still inherently deterministic (in most architectures; Figure 1). We suggest, on the basis of formal and experimental results, that stochastic, randomized, and non-parametric-dependent modeling may be often more effective for stable control of such XCS environments.

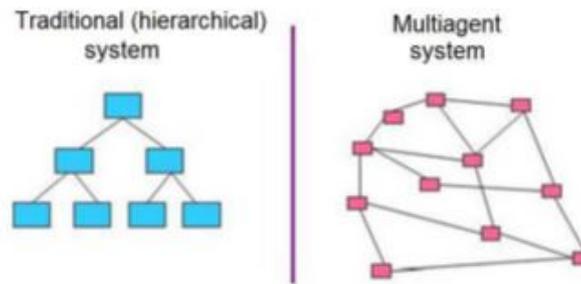


Figure 1 – Hierarchical vs. Multi-Agent Control – but still deterministically based [1]

Such XCS-type systems are not only of a type such as multiple robots working together to construct a space station on the Moon or Mars, or to perform drilling, ballistic blasts or other forms of trajectory change for an asteroid, but such examples are among the most clear-cut cases of a class of problems that are presenting themselves for solutions and for which traditional “linear” thinking and also conventional Turing-Machine computation is running into barriers of performance and accuracy. There are many other “earth-bound” problems that approach or match the complexity, uncertainty and non-deterministic character of space-based multi-agent robotics – for example, aircraft turbulence, high-density highway traffic, global wireless network load balancing, and cardiovascular arrhythmia response.

We make a distinction here from other forms and levels of complexity in both natural and artificially-engineered systems. By XCS we mean those types of systems which are inherently hard to formulate into models and algorithms to process such models, by virtue of the uncertainties and stochastic, random-like natures of their parameters, and through the complex relationships and inter-dependencies among those parameters. Computationally, these may be NP-hard problems, but not necessarily so. Instability and insufficiency within a given control system may be not only due to the calculations that must be performed in order to ascertain values and even value ranges for such parameters. Limitations on physical hardware and long-distance communications, for instance in aerospace as well as high-speed rail, subsurface sea, and high-density highway traffic, curtail the ability to perform calculations that even in “polynomial time” may vastly exceed the time limits for answers, for decisions on course correction.

An XCS environment can be considered as having an unknown and uncertain structure, where that structure  $s_k$  changes in time instances  $t_0, t_1, t_2, \dots$ . The task of understanding how  $s_k$  changes at specific instances  $t_i$  and in response to certain parameter changes may not be computationally achievable, certainly within finite time intervals when change (adaptation) is required in order to avoid catastrophic critical values. The path forward to understanding how changes and how to adapt in terms of a control system may be realized by a technique of dividing the state space into regions, clusters, or cellular networks. Clustering of the state space may be understood as:

$$X_{sk} = \{X_1, X_2, \dots, X_{n(sk)}\} : X = \cup_{i=1,2,0,\dots,n(sk)} X_i, \text{ where } X_i \subset X$$

The goal from a cybernetic perspective becomes then one of identifying changes within dynamically defined regions or clusters, making use of simplified sampling and adaptation, avoiding the computationally intensive and deterministic methods which can be less resilient to unexpected and non-linear behaviors, and impractical from the standpoint of practical engineering, especially in the case of microscopic-sized or ultra-light devices.

Networks of both mobile and stationary robots and other autonomous or semi-autonomous devices are often characterized by uncertainty in data reporting, sharing and analysis within the network. Again, these problems become exacerbated by factors such as physical distance (light-years or simply “light-minutes”), bandwidth competition, and asymmetric threats (e.g., cyber-hacking). Furthermore there can be problems of conflict or “un-cooperativity” which pertain to conflicting agent goals and sharing of resources such as energy (fuel, accessory equipment and supplies, etc.). This can also be described in terms of load-balancing problems, but the problem becomes more complicated as the autonomy and independence of the agent subsystems increases. Competition over resources can include inadvertent competition for access to a physical connecting port, for example, or a location for either placing or retrieving some object (e.g., drilling or removing a machine part or a sample from an asteroid surface). The overall mission task of the robot network (“team”) may be further complicated by a combination of other factors, all of which carry elements of uncertainty and undecidability – for example:

- fuel/power consumption during repositioning or “wait-mode” states
- maintaining a steady position relative to another moving object
- irregular and “wobbly” motion of some target object (e.g., asteroid or fragment thereof)

collision avoidance and consumption of fuel with reverse thrusters, etc.

performing work tasks within a prescribed period (e.g., sufficient access to sunlight for solar panels)

The principle challenge with XCS is the issue of undecidability about critical points and regions, also known as singularities. A general or comprehensive model of interaction within distributed and non-stationary spaces that does not allow for the appearance and even dominance of critical points can lead to catastrophic results (mathematically and physically). Failure to observe minute variations and gradient changes can lead to irreversible situations. However, such minute variations may be measured and analyzed much faster through attention to local neighborhoods and cellular-type regions or fields of data. This path has led to new approaches using sets of localized models that have simpler and potentially faster computational loads and which can be conveniently mapped to parallel architectures. Such models are characterized by asymmetric, stochastic methods for sampling, estimating, and assessing predictive values for regions in a data space where changes may otherwise be unobserved within constraints of computational time.

Stochastic programming is one framework for modeling of optimization problems that involve uncertainty in both the identity and interrelationship of parameters and in their values at given instances and configurations. Whereas deterministic optimization problems are formulated with known parameters, real world problems almost always include some unknown parameters. One of the approaches for solving such problems, when the parameters are known only within the certain bounds, is called the robust optimization. Here, the goal is to find a solution, which is feasible for all such data and is optimal in some sense. Stochastic programming models are similar in style, but take the advantage of the fact that probability distributions governing the data are known or can be estimated. The goal here is to find some policy that is feasible for all (or almost all) the possible data instances and minimizes the expectation of some decision functions and the random variables. More generally, such models are formulated, solved analytically or numerically, and analyzed in order to provide useful information to a decision-maker. The approximation techniques are then extensible to randomized selection and trial (an interpolation process) of algorithms for adjusting system parameters (Figure 2). In the experimental case described here, this randomization is performed with wing-flap adjustments in response to randomly sampled pressure readings.

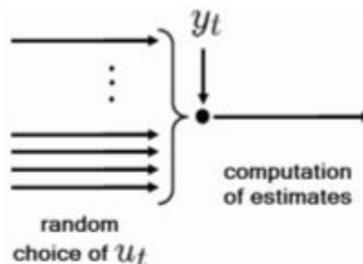


Figure 2 – Random selection of estimation and control coupled with learning and optimization of choice [1]

The Local Voting (LV) control protocol developed by Granichin et al [1] is one such model. It operates with a nonvanishing step-size for conditions of significant uncertainty and external disturbances [2]. The objective is to detect changes that may be insignificant in most cases but which can be indicative of developing conditions that could have irreversible effects. This stochastic gradient-like (stochastic approximation) method has also been used before in other works (see, e.g. [3], [4]) but with a decrease to a zero step-size. Usually, the stochastic approximation is studied for unconstrained optimization problems, but the above-mentioned results stimulated the development of new approaches [5] to track the changes in the parameter drift using the simultaneous perturbation stochastic approximation [6].

An experimental platform has been developed [1] (Figures 3-6) which addresses one major problem in aerodynamic stabilization during turbulence, focusing upon wing surface pressure points as the key observable parameter. This may be considered as a prototype for use of the LV protocol to other applications including the interactivity among a group of cooperating robots, or the dynamics of one or several robots manipulating an unwieldy, relatively amorphous and free-standing object, such as an asteroid or other object in low-gravity or zero-gravity (e.g., “space-debris” in near-earth orbit). In such a case the “turbulence” is not present in a classic aerodynamic or hydrodynamic phenomenon but there are comparable dynamics in the forces exerted between the target object and the robot apparatus operating with it. Simple joining of satellites, robots, and manipulation of fixed-geometry parts in zero-G space offers challenges that are “extreme” in comparison to those in an earth-gravity or planet-gravity region, and the demand for computational simplicity and speed (other than what can

be provided by impractical “supercomputers” or machines requiring cryogenic environments (e.g., contemporary “quantum computers”) becomes mandatory.

Consider a wing structure whose surface is covered with actuators that serve as mini-wingflaps, each coupled with a pressure sensor, such as illustrated in Figure 3. Each sensor-actuator unit may be considered as an active agent in a computational network. However, sampling – and motor response – can be performed asynchronously and asymmetrically – this derives from the use of the stochastic approximation methods.

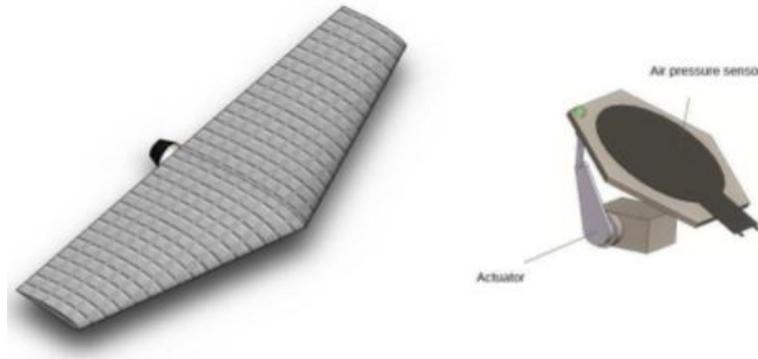


Figure 3 – “Wings with feathers” [1]

Let  $x_k^i$  be the integrated pressure deviation for “feather”  $a^i$  – data derived from sensor measurement

Agent dynamics may be described as:  $x_{k+1}^i = f(x_k^i, u_k^i)$ ,  $i \in N = \{1, \dots, n\}$

Observations:  $y_k^i = x_k^i + \xi_k^i$

The Local Voting Protocol is given by:

$$u_t^i = \alpha \sum_{j \in N_k^i} b^{ij} (y_k^j - y_k^i)$$

Consistent behavior (consensus):  $x_k^i \approx x_k^j$ ,  $i, j \in N$

In a turbulent flow environment, with no responsive adjustments to the sensor-actuator units, LV readings across the wing surface will resemble a “kaleidoscope” effect among the regions, as shown in Figure 4 below. All actuator units “feathers”) in the wing remain unadjusted and with no change in orientation in response to changes in applied external pressures. The consensus “goal” state (illustrated in Figure 5) provides for uniform or within-threshold values from all LV “cellular regions” (clusters) during turbulent conditions, achievable in this case through servo-controller adjustments of the sensor-actuator “feather” units.



Figure 4 – Wing sensor field under turbulence [1]    Figure 5 – Wing consensus state under turbulence [1]

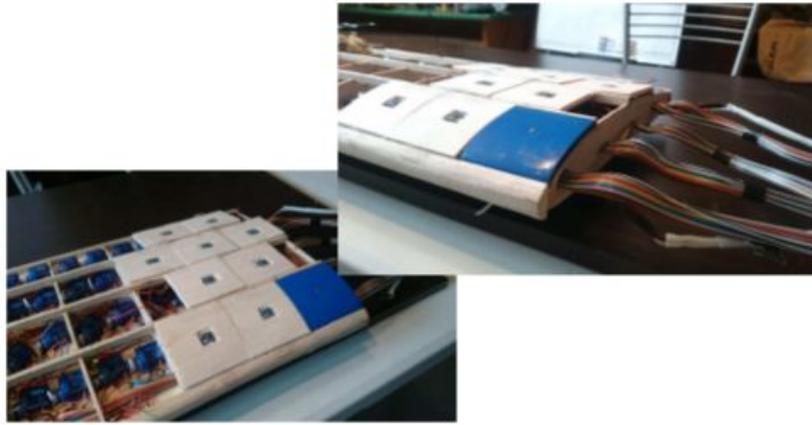


Figure 6 – Experimental Wing Sensor Platform [1]

In this given experimental case the LV clusters are statically defined by the geometry of the sensor-actuator units (Figures 3 and 6). However, stochastic approximation and randomized sampling and perturbation is not limited to a static architectural model of the given system, but quite to the contrary. A conventional aircraft wing, and the entire vessel, constitutes a static geometry – the wing has a defined and permanent geometry. In other applications and tasks the LV regions need not be uniform, nor static, in their geometry. For instance, consider cooperative agents working with interchangeable components (such as tool fittings) in physically dynamic environments with unpredictable kinetics (such as an asteroid in the process of being mined or split into fragments with the intention of reducing impact threats to Earth or some other habitation). It is possible to create different “dynamic” maps of LV cellular regions and also larger assemblies of clusters, with different geometries that correspond to how the system is being affected by its environment at any given time period.

Within XCS operations there are critical time intervals for such adaptations that can avert an critical “singularity” event affecting the entire system. Adaptation of wing surfaces (and potentially also other components) in an aircraft to atmospheric turbulence requires that decisions be made regarding adjustments of multiple actuators. Randomized alterations to small regions (clusters) of the system space have two unique advantages over models that attempt to comprehensively address the entire system. First, results can generally be achieved faster and with fewer computational resources. This is significant for mobile, remote and compact device platforms (such as satellites and other space vehicles, robotic or otherwise). Secondly, and very significantly, errors in the decision process – which can be frequent in beginning stages of a cybernetic system adaptive learning process – will be more localized, more containable, and more easily correctable, than errors which affect large sectors of some system performance. Drawing from the illustration of wing adaptation to turbulence - adjustment of several “feather” actuators, in a way that has an adverse or otherwise non-beneficial effect on the overall system, will (generally) be more easily correctable and offset by other adjustments, in contrast to a system-wide adjustment that may be irreversible.

### **A Thought-Experiment with “Cosmic” Implications**

Consider a network of 10, 20, 50 or more robot devices, each powered by an ion propulsion engine, each equipped with a toolset that may consist of drills, impactors, chisels, cables and grappling hooks, and apparatus for placing ballistic charges. These form a cooperative team of robots working on an asteroid (perhaps 10m – 20m in approximate diameter) traveling in space, perhaps even on a potential collision course with Earth. There is limited opportunity for use of massive or physically cumbersome supercomputing, and real-time human or even AI control from Earth may be completely out of the question. The objective is to alter the asteroid's trajectory or to otherwise reduce its capacity for surface impact or for a severe air burst with consequences for human life Earth. Tunguska and Chelyabinsk offer two actual case histories within the past century-plus.

Consider the stochastic approximation and randomized algorithm methods being applied within a sensor-motor control system that is intended to optimize the cooperation among several robots to orient the asteroid rock and to configure the positioning of robots and tools for a variety of engineering tasks. The range of operations spans from drilling to use of ballistics, kinetics, gravitation mass adjustments and the use of nets and tethers. All of these decision processes ultimately depend for their possible successful completion upon the control of multiple units in what amounts to being a turbulent, dynamic, uncertain environment in which there are many critical points within the overall system state space, and wherein there is a high degree of uncertainty, noise, and unpredictability. The “turbulence” is not involving air, water or any physical “fluid” but it involves the movements and positioning of multiple bodies, the largest and most massive being the least controllable and

adjustable (namely, the asteroid object). During all of this process there are two major limits that have critical “countdowns” - the amount of time that can be expended operating the robots, because they all have finite fuel and power reserves, and the amount of time before a projected Critical Point of the asteroid's movement, namely a point beyond which there will be irreversible consequences of impact or atmospheric burst.

Control functions may be distributed across virtual as well as literal physical surfaces and spaces. An aircraft wing and fuselage surface has distributed forces and air pressures which can be measured as points, then as cellular neighborhoods, then as increasingly larger regions. Parallel and competing analysis can provide sets of points where adjustments should be made that will offset pressures positively or negatively and lead to a stable laminar flow, the goal state for the plane in flight. The same model can be applied to the virtual space of robots manipulating amorphous shapes that have multiple axes of motion and angular momentum. There are goal states which involve positioning of devices and avoidance of collision impacts including those that could occur between the cooperative robots. The suggestion made here is that for some levels of extreme complexity, a rethinking of what we mean by “control” and by “learning” and indeed by “intelligence” is required, and in this process, also, a rethinking of how we can perform the computations that are required to operate multiple motors in parallel. We are only at the beginning of what appears to be a revolution in how we think about computability and control, but the key may be found in looking at the simpler ways that some tasks are done in Nature, in Biology, more than at any other example. Flies and mosquitoes fly very well and avoid obstacles and threats. Synchronized swimmers and dancers do not rely only upon knowing the score and the choreography. Infants learn to handle balls and toys first with touch, then with eyes, and last of all comes learning via discourse, logic, and formal arithmetic. Food for Thought, in a world increasingly dominated by Extreme Complex Systems.

1. O. Granichin, T. Khantuleva, O. Granichina, “Local Voting Protocol for the Adaptation of Airplane’s ‘Feathers’ in a Turbulence Flow,” 2017 American Control Conference, May 24–26, 2017, Seattle, USA.
2. N. Amelina, A. Fradkov, Y. Jiang, and D. Vergados, “Approximate consensus in stochastic networks with application to load balancing,” *IEEE Trans. on Information Theory*, vol. 61, no. 4, pp. 1739–1752, 2015.
3. J. Tsitsiklis, D. Bertsekas, and M. Athans, “Distributed asynchronous deterministic and stochastic gradient optimization algorithms,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 31, no. 9, pp. 803–812, 1986.
4. M. Huang, “Stochastic approximation for consensus: a new approach via ergodic backward products,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 57, no. 12, pp. 2994–3008, 2012.
5. O. Granichin and N. Amelina, “Simultaneous perturbation stochastic approximation for tracking under unknown but bounded disturbances,” *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 60, no. 6, pp. 1653–1658, 2015.
6. J. Spall, “Multivariate stochastic approximation using a simultaneous perturbation gradient approximation,” *IEEE Trans. Automat. Control*, vol. 37, no. 3, pp. 332–341, 1992.
7. O. Granichin, N. Amelina, “Simultaneous perturbation stochastic approximation for tracking under unknown but bounded disturbances,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2015.
8. O. Granichin, K. Amelin, “Randomized control strategies under arbitrary external noise,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2016.
9. M. Dudziak. Parallel Replicative Neural Networks for Cooperative Robot Systems, NATUG-90, Santa Clara CA, April 1990.
10. M. Dudziak. Spaceships To Planet Earth: Designing Systems for Space that Sustain Life on Earth. Dupont Summit, Washington DC, Dec. 2015.
11. I. Ermolov, V. Gradetsky, M. Knyazkov, S. Sobolnikov. Cooperative Motion Planning of Autonomous UGVs for Mobile Reconfigurable Communication Networks, Proc. of IEEE-RAS-IARP Joint Workshop on Tech. Challenges for Dependable Robots in Human Environment, IROS2013 WS, Nov. 3, 2013, Tokyo, Japan
12. A.S. Yushchenko, K.V. Ermishin. Collaborative Mobile Robots – A New Stage of Robotics. Proc. Intl. Scientific and Technological Conference EXTREME ROBOTICS. Nov. 24-25, 2016, St. Petersburg, Russia.
13. M. Chacin, A. Mora, K. Yoshida, “Motion control of multi-limbed robots for asteroid exploration missions,” *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2009. ICRA '09, Kobe, Japan.
14. F. Matsuno, Y. Oosako, “Control of an asteroid sample return robot during contact based on complementarity modeling,” *Procs. of the 40th IEEE Conf. on Decision and Control*, 2001, Orlando, Florida.
15. J. Bellerose, A. Girard, D. Scheeres, “Dynamics and Control of Surface Exploration Robots on Asteroids,” *Optimization & Cooperative Ctrl. Strategies*, LNCIS 381, pp. 135–150, Springer-Verlag, 2009.

## **ATHOS, A FUNCTIONAL-LOGIC OPERATING SYSTEM FOR ROBOT COMMUNITIES WITH SELF-ORGANIZATION AND PERSISTENT LEARNING CAPABILITIES**

*MIRNOVA Academy, Zelenograd, Russia martinjoseph@mirnova.org*

### Abstract

This paper provides a summary of the ATHOS real-time meta-level operating system which is designed to serve as a cloud-based interpretative language enabling robots and other systems, including “internet of things” (IoT) apparatus, to establish multidirectional levels of communication, command and control. ATHOS is being developed using functional programming paradigms and is intended to be an open-source platform available to cooperative user communities and capable of integrating diverse hardware protocols and software systems within a device-independent computational environment.

Keywords: cooperative network, device independence, command and control, operating system, machine learning

The rapid development and proliferation of robotic systems, particularly UAV and UGV (ULV) units, for commercial applications, creates both opportunities and challenges that are not dissimilar to the situation in earlier decades with the introduction of personal devices for computing, telephony, and data storage uses. Presently there are diverse platforms and software modules and the proliferation of variety continues and even accelerates. The aim of the ATHOS architecture project is to produce a suite of tools, initially focusing upon software logics but also extending to physical modules, which can accommodate diverse designs and open-ended functions for robots that ultimately must be organized into cooperative networks and “teams” for tasks that span from agriculture to public health to security to space exploration.

In the past the dilemma of diversity and nonconformity has led to standardization and conformity, such as those relating to data storage and distribution via HTTP and other protocols on the internet. Rather than to attempt such measures as in the past, involving industry committees and formal standards, something that in the present economic and techno-accelerative climate is almost certain to meet enormous resistance, we are taking a different approach with ATHOS. There are three foundational points.

[1] The combination of computational speed, coupled with the availability of both massive memory and distributed computing platforms, makes it practical to extend the use of interpretive scripts and languages including XML-type “markup languages” into functional areas that heretofore were the domain of classical “programming” languages. Such compiler-based and interpretive, machine-independent languages are ultimately the mechanism for command and control within any device such as a robot, but the highest-level system-level language can be independent of the machine software on which different functions will execute.

[2] The ease and efficiency of networking computing over distributed and time-shared platforms with sophisticated redundancy capability, such as with the mature and globally deployed Berkeley Open Infrastructure for Network Computing (BOINC), creates an opportunity for implementing high-demand computational tasks in high-mobility systems such as a group of robots operating in remote and even harsh conditions, including with limited or absent connectivity to the internet

[3] Inclusion of artificial (synthetic) intelligence capabilities, including self-generated machine learning, is both a practical and arguably a necessary component for multi-robotic networks that will operate on real-time tasks which introduce highly variable operating conditions. Robotic elements will need to share in the cybernetic functions of their operations and not depend upon connectivity and time-constrained interfacing with human operators. Simple autonomous operations that do not enable active real-time new learning and active cooperative command-sharing among robots is inadequate for the long-term.

Thus, ATHOS is being designed to incorporate the progressive and stepwise development of an artificial intelligence (AI) based operating system and programming language suite, along with appropriate electro-mechanical devices and systems that can interface to such software, within principally unmanned robotic sensing, data collection, analysis and knowledge generation, provided through UAV (unmanned air vehicles; “drones”), UGV (unmanned ground vehicles) and AUV (unmanned water (surface and subsurface) vehicles).

The range of such applications is diverse and open-ended and includes these eight main categories as a “mandate” list of functions that can be performed by robot networks and for which a new “C3” paradigm of command, control and communication such as ATHOS is necessary:

energy conservation, discovery, generation, optimization

environment and ecosystem management  
public and personal healthcare  
security including incident and emergency management  
space-based construction, exploration, and industry  
entertainment and leisure including gaming  
civil engineering including infrastructure maintenance, construction  
agriculture - food and water production and management

**ATHOS** is described (and thus named) as an Adaptive set-Theoretic Hierarchical Operating System. It derives architecturally from prior research that originated in the early 2000's with the CUBIT architecture for implementation of sensor and sensor + actuator networks used for environmental, health and emergency situations. This became implemented first as an "Internet of Things" (IoT) system that was geographically distributed but operating as data collectors (sensors for CBRNE (chemical, biological, radioactive/nuclear and explosive) substances. Known as Nomad Eyes, its mobility was strictly limited to positioning of static sensors in different locations by human operators, and through mobility of wireless devices such as mobile phones with sensor devices as auxiliary attachments. The chart below illustrates a portion of the formal taxonomy of CUBIT. Figure 1 shows the general features of the Nomad Eyes system architecture.

The fundamental basis for ATHOS derives from classical parallel processing of the type known as MIMD (multiple-instruction, multiple-data) networking, involving asynchronous and asymmetric-load processes that communicate through a hierarchy of message types. These processes are mapped across the computing resource pool of devices such as active UAV and UGV robots and also conventional computers and servers. Through ATHOS, users and robots communicate with one another independent of the specific platform logics and protocols for the individual devices. In the background of ATHOS is processing that employs open-ended machine learning such as HORUS (Hierarchically Organized Reasoning and Understanding System) and APIS (Anomaly and Pattern Interface Schema).

```

(cubit-element /* cubit-ε --- fundamental cubit logic element */
  (binar /* elementary agent unit – computational and physical components (Biological-like Intelligent Neural Adaptive Recognizer) */
    (cybot /* generic, limited-autonomy, limited-modifiability binar – computational element (analogous in some respects to “bots”) */
      (cybernaut /* a type of cybot dedicated to coordination and control functions within a cubit-structure */ )
      (cybereng /* cybot dedicated to energy, power, and mechanical functions within a cubit-structure */ )
      (cyberent /* cybot dedicated to environmental data acquisition and effect functions within a cubit-structure */ )
      (cybermed /* cybot dedicated to biological and medical-type functions within a cubit-structure */ )
      (cybersec /* cybot dedicated to security and countermeasure functions within a cubit-structure */ )
    )
    /* cybot */
    (mentat /* self-organizing and semi-autonomous binar – computational element with greater complexity than a regular cybot (analogous in some respects to “bot masters” - subtypes include the same classification order as with cybots */
      (m-cybernaut /* a type of cybot dedicated to coordination and control functions within a cubit-structure */ )
      (m-cybereng /* cybot dedicated to energy, power, and mechanical functions within a cubit-structure */ )
      (m-cyberent /* cybot dedicated to environmental data acquisition and effect functions within a cubit-structure */ )
      (m-cybermed /* cybot dedicated to biological and medical-type functions within a cubit-structure */ )
      (m-cybersec /* cybot dedicated to security and countermeasure functions within a cubit-structure */ )
    )
    /* mentat */
    (kyber /* type of binar specifically dedicated to KYBEROS hyper-encryption and hyper-

```

security tasks \*/)

(**soph** /\* higher-complexity, higher-autonomy binar – essentially an assessor, evaluator, and coordinator of mentats and cybots and elemental binars – subtypes include the same classification order as with cybots and mentats (e.g., cybernaut... cybersec) \*/)

) /\* binar \*/ ) /\* cubit-ε aka cubit-element \*/

(**cubit-structure** /\* **cubit-σ** --- fundamental cubit machine structure \*/

(**cubit-λ** aka **logic-cubit** /\* algorithmic, logical, computational structure – manifest in software, not in physical components, although the logic may be implemented in firmware such as a micro/nano-processing object \*/

(**binet** /\* configuration of logical, computational operations and processes constituted and conducted by binars \*/)

(**cyborg** /\* organism/community-configuration of binets – example: as implemented in an IoT device \*/)

(**cyberecos** /\* ecosystem-configuration of cyborgs – example: as may be implemented in a LUXworld \*/)

(**LUX** /\* computational configuration (environment) for the control and operation of cubits in AR (“augmented reality”) and VR applications involving interactions and interfaces with conventional computing devices and humans \*/)

) /\* cubit-λ aka logic-cubit \*/

(**cubit-μ** aka **cubit-Mod** /\* physical, mechanical, modular device – e.g., micro/nano-processing object, MEMS device, electromechanical machine, module composed of several integrated circuit components, simplex or complex cubit physical device, macroscopic machine, etc. \*/

(**cubit-δ** aka **simplex-cubit** /\* simpler, unitary, modular “building-block” type of physical cubit that can be combined physically and functionally with other simplex and complex cubits \*/

(**cube** /\* physical cube-geometry cubit \*/

(**C-cube** /\* computation cube \*/)

(**D-cube** /\* data-acquisition cube

\*/)

(**F-cube** /\* function cube \*/)

(**I-cube** /\* interface cube \*/)

(**M-cube** /\* memory cube \*/)

(**P-cube** /\* power cube \*/)

(**R-cube** /\* router cube \*/)

(**T-cube** /\* transform cube \*/)

) /\* cube \*/

) /\* cubit-δ aka simplex-cubit \*/

(**cubit-κ** aka **complex-cubit** /\* non-simplex, non-cube, variational design and function, compound-element cubit \*/

(**cebit** /\* chemical, environmental, biological interaction technology unit – a specialized F-cube or multi-cube device that serves as a sensor or actuator designed to react with one or more specific stimuli of inorganic or organic chemical compounds including biologically-active and radioactive substances

Communicating Dynamic Processing (CDP) derives from Communicating Sequential Processing (CSP) and the seminal work of Hoare and others, leading to process algebras that establish the communications among

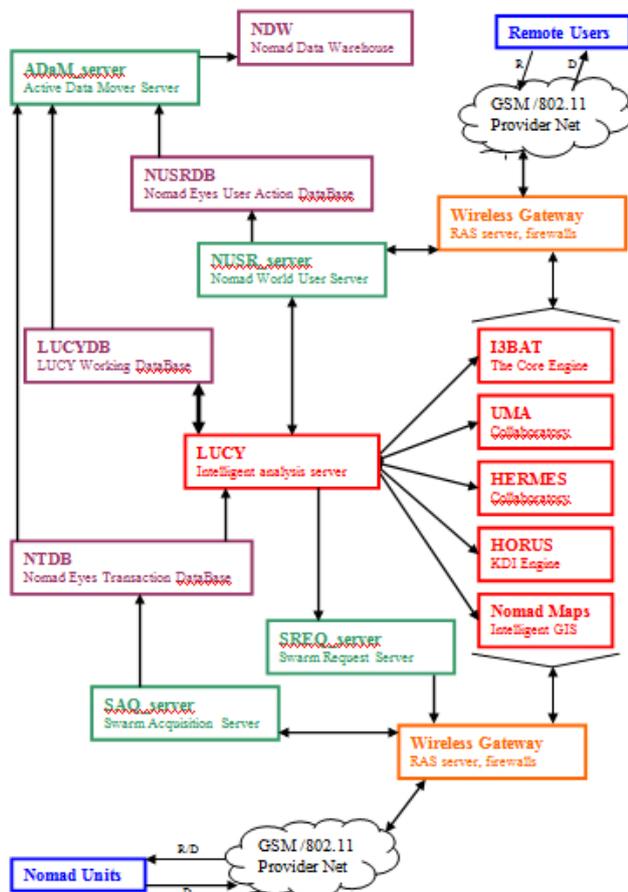


Figure 1 – Nomad Eyes architecture (system-level)

Within ATHOS, this architecture undergoes significant modifications. Sensor and actuator management, and other device-operation tasks, along with data acquisition, error-correction, mapping, and knowledge extraction processes, are handled as distributed processes following the CSP (CDP) overall process architecture, based upon classical MIMD parallel processing. Agents (known as cybots, binars) are assigned responsibilities for tasks including resolution of information conflict and uncertainty. The human element in the system is “adjustable” on a metaphorical “sliding bar” ranging from full engagement (non-autonomous real-time and constant control) to fail-safe interruption (autonomous, but humans can override at any point).

of APIS and its applications extend far beyond the customarily connotations of “anomaly” and similar terms. In effect, APIS provides a cybernetics language and computational environment, an architecture and toolset for control of exceedingly diverse systems, from purely informatics resources, to autonomous devices and machines, to highly complex networks of humans, autonomous agents and machines operating in SCADA-type networks.

individual nodes (units, robots) and the distributed knowledge processing (e.g., HORUS). The importance of process algebras within ATHOS is central for development of an extensible platform that will be capable of process distribution and resource allocation. In other words, an array of robots and the dynamic processing in a given task will be distributed among all available devices in a manner designed to optimize performance, taking into account location, security, and projected task demands upon individual processor elements such as UAVs and UGVs. An algebraic approach will enable both “look-ahead” and “fault-tolerance” functionality.

HORUS is a computational system for maintaining a library of knowledge about objects and their relations that can be used by a wide variety of humans and other computational systems for understanding the meanings, uses, and relationships between different concepts, terms, physical objects, and media including objects that are text, audio, image, video, and other hypermedia (web-based) entities. As illustrated in Figure 2, HORUS provides a mechanism for the use of incomplete concepts, terms and functions, including “shell” code that is incrementally built up and completed. Such an approach will initially require human intervention of what may be future autonomous functions, and in the process there is opportunity for refinement of algorithms and the interim use of pre-existing software even if such use demands less autonomy and more direct intervention by operators.

APIS is a mechanism for building the knowledge world of HORUS which in turn serves the applications of multi-user network communities such as robots. APIS provides a means for design-agents (human or robot) to create real-time (“on the fly”) packages of definitions, functions, and software for use in searching for, identifying, comparing, and acting in response to different categories (types) of patterns within data streams where the patterns of interest are typically those that stand out as being of interest by virtue of being anomalies, discrepancies, disturbances, departures from the norm, and other situations requiring some type of attention and intervention. The capabilities

APIS has been designed to accommodate any type of data stream that can be treated in terms of objects with definable, separable attributes and behaviors. Figure 2 illustrates in Backus-Naur format the APIS schema. Thus it is an architecture and set of computational tools for use with subject matter as diverse as:

- people or vehicles moving through corridors, channels, passageways, gateways, etc.
- financial and general text transactions and messages
- real-time medical instrumentation readings and measurements
- power consumption by machines, sectors of a building, regions of a neighborhood or city
- traffic system flow on highways, rail lines or air routes
- people interacting with co-workers and customers in business or social contexts

This can be adapted to serve comparable needs within a network of robots and other autonomous systems, not only to detect and manage anomalies as such but for a wider class of patterns such as behaviors that need to be performed in the course of a mission, some of which will be triggered by observed events during that mission.

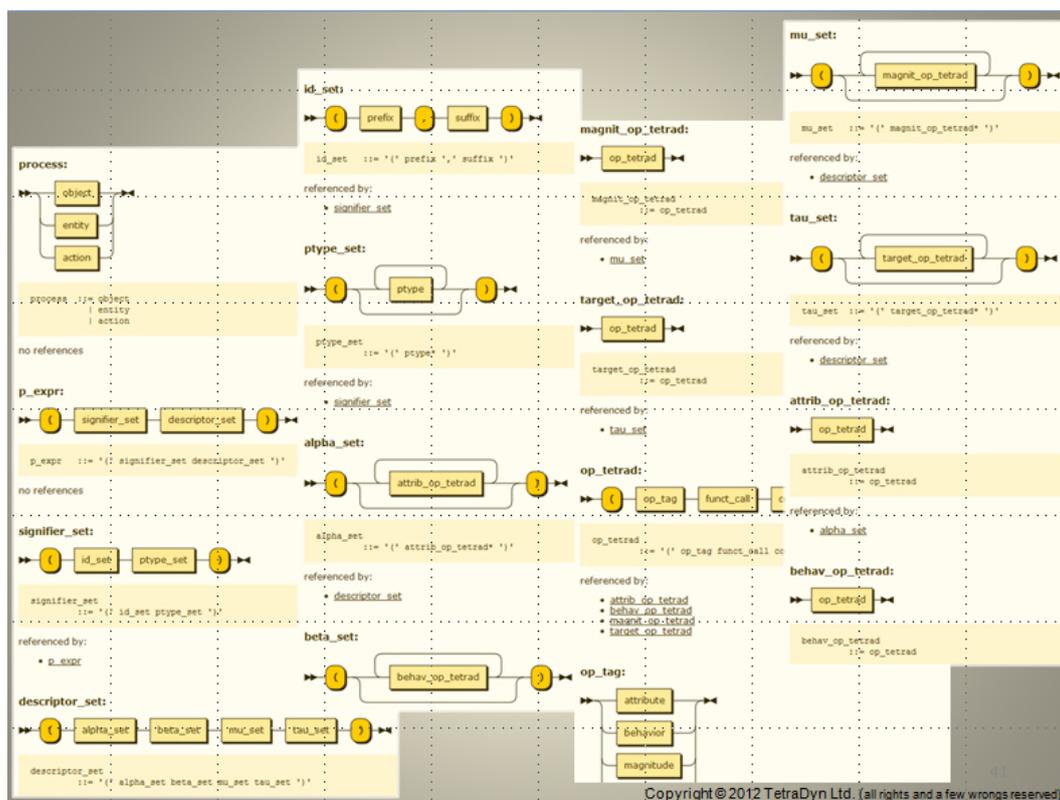


Figure 2 – APIS Schema in BNF

The use of an XML-type scripting language for encoding actions to be performed by devices will enable operators to express the logic of a mission (e.g., surveying of an agricultural area, or an environmental zone after some event such as a flood or storm) in progressively human-language and “ad hoc” terms. This will aid in the process of planning such missions. From the tagged (markup) commands, selection is made from libraries of existing “API” code for specific instruments (e.g., UAVs). This also aids in the meta-task project management tasks for identifying software modules that require new composition or editing. Scheduling issues can be minimized by having a clearer understanding of what software engineering tasks require priority attention. This also enhances adaptability of the entire deployed system (robot network) for being able to accommodate new assignments (e.g., switching from agricultural to other assignments).

In summary, ATHOS will be a self-adaptive, self-learning, self-modifying operating system for hierarchically-organized communities of machines that perform tasks involving motor, sensory, and cognitive processes. It provides for limited-restrictive dynamic construction of a vocabulary and grammar that is used to describe and control processes in dynamically-configured networks of heterogeneous machines. Such networks typically involve autonomous and semi-autonomous robotic devices equipped with a variety of sensors, actuators, and analytical processor components.

1. M. Dudziak. SOLON: An Autonomous Vehicle Planner, Proc. of the JPL Workshop on Space Telerobotics, JPL, Pasadena CA (1990)
2. M. Dudziak. Parallel Replicative Neural Networks for Cooperative Robot Systems, NATUG-90, Santa Clara CA, April 1990
3. M. Dudziak. Spaceships To Planet Earth: Designing Systems for Space that Sustain Life on Earth. Dupont Summit, Washington DC, Dec. 2015
4. Ermolov, V. Gradetsky, M. Knyazkov, S. Sobolnikov. Cooperative Motion Planning of Autonomous UGVs for Mobile Reconfigurable Communication Networks, Proc. of IEEE-RAS-IARP Joint Workshop on Tech. Challenges for Dependable Robots in Human Environment, IROS2013 WS, Nov. 3, 2013, Tokyo, Japan
5. C. A. R. Hoare. Communicating Sequential Processes, Prentice Hall, ISBN 0-13-153289-8.
6. Robin Milner. A Calculus of Communicating Systems, Springer Verlag, ISBN 0-387-10235-3.
7. Robin Milner. Communicating and Mobile Systems: the Pi-Calculus, Springer Verlag, ISBN 0-521-65869.
8. H. Yamaguchi. A Cooperative Hunting Behavior by Mobile Robot Troops. IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation. May 16-20, 1998, Leuven, Belgium, Vol.4, p. 3204-3209
9. A.S. Yushchenko, K.V. Ermishin. Collaborative Mobile Robots – A New Stage of Robotics. Proc. Intl. Scientific and Technological Conference EXTREME ROBOTICS. Nov. 24-25, 2016, St. Petersburg, Russia

*M.A. Gudkov, V.N. Luk'yanchik, S.N.Ovsjannikov*

### **THE CREATION OF A GROUND-BASED ROBOTIC COMPLEX OF ADVANCED AIRCRAFT AIMER FOR THE MANAGEMENT OF ASSAULT AND ARMY AVIATION**

*Military Academy of telecommunication  
gudkovmihail82@mail.ru, stasfvo@mail.ru*

#### Annotation

The creation of a ground-based robotic complex of advanced aircraft aimer is focused on two main advantages: first, - reduction of losses of personnel and military equipment in combat high-risk tasks; second, - increase the efficiency of task performance and creation of possibility for new tasks not available for human capability.

The ground-based robotic complex is a multipurpose type of weapons. He provides aviation management in combat task performance both with troops and without them.

The complex can operate autonomously and in remote control mode.

Keywords: robotic complex, advanced aircraft aimer, computer workstation, control center, aircraft.

*М.А.Гудков, В.Н. Лукьянчик, С.Н.Овсянников*

### **К СОЗДАНИЮ НАЗЕМНОГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПЕРЕДОВОГО АВИАЦИОННОГО НАВОДЧИКА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ АРМЕЙСКОЙ И ШТУРМОВОЙ АВИАЦИЕЙ**

*Военная академия связи им. С.М. Будённого, Санкт-Петербург*

#### Аннотация

Создание наземного робототехнического комплекса передового авиационного наводчика РТК ПАН ориентировано на два основных преимущества: первое - уменьшение потерь личного состава и техники при выполнении боевых и высокорисковых задач; второе - повышение эффективности решения известных задач и появление возможности выполнения новых задач, недоступных для решения человеком в силу физиологических и интеллектуальных ограничений.

Предлагаемый наземный робототехнический комплекс по своему оснащению является многофункциональным видом вооружения, обеспечивающим управление авиацией (летательными аппаратами) при выполнении боевых задач как совместно с общевойсковыми соединениями, частями (подразделениями), так и отдельно для нанесения ударов по противнику на изолированных направлениях.

Комплекс структурно и функционально состоит из систем, обеспечивающих его работу в автономном (автоматизированном) режиме и при дистанционном управлении.

Ключевые слова: Робототехнический комплекс, передовой авиационный наводчик, автоматизированное рабочее место, пункт управления, летательный аппарат.

За последние десятилетия в мире произошел качественный скачок в развитии средств вооруженной борьбы, что привело к пересмотру взглядов на ее подготовку и ведение.

Исходя из этого, Президентом и Правительством Российской Федерации поставлена задача качественной модернизации Вооруженных Сил, перевооружение их на современные и перспективные образцы вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ).

Роботизация является составной частью общего процесса повышения качественного уровня существующего и создания нового ВВСТ, отвечающих современным требованиям информационной эпохи в отечественном военном строительстве. [1]

При определении потребности в робототехнических комплексах военного назначения (РТК ВН) целесообразно ориентироваться на два основных преимущества, которые дает их внедрение в войска: первое - уменьшение потерь личного состава и техники при выполнении боевых и высокорисковых задач; второе - повышение эффективности решения известных задач и появление возможности выполнения новых задач, недоступных для решения человеком в силу физиологических и интеллектуальных ограничений. [2]

Опыт локальных войн и вооруженных конфликтов последних десятилетий свидетельствуют о возрастающей роли робототехнических комплексов военного назначения и, в первую очередь, комплексов наземного и воздушного применения, при подготовке и ведении военных действий, выполнении задач другими силовыми министерствами и ведомствами.

Появление роботов делает возможным решение ряда задач, недоступных ранее. Целесообразным является применение РТК ВН для решения всего спектра боевых и обеспечивающих задач. При этом основными из них на ближайшую перспективу могут быть: разведывательные, боевые (ударные), специальные и другие. [3]

Ведение современных боевых действий соединениями (частями, подразделениями) наземной группировки войск невозможно представить без поддержки авиации и массированного нанесения ракетно - артиллерийских ударов по противнику. Чтобы обеспечить слаженность боевых действий между общевойсковыми частями (подразделениями) и другими родами войск в системе управления предусматривается (планируется) организация взаимодействия между всеми участниками, выполняющих боевые задачи в соответствии с их предназначением [4].

Из опыта военных действий в Афганистане, Чеченской республике, Стратегических учений войск («Центр-2015», «Кавказ-2016», «Запад-2017», боевых действий ВКС ВС РФ в САР следует, что применение авиации позволяет эффективно решать боевые задачи наземной группировки войск.

Однако, поражение целей, уничтожение объектов и живой силы армейской и штурмовой авиацией (далее авиации) с вероятностью 0,85 – 0,95 невозможно без точного наличия координат цели и соответствующего целеуказания и наведения. В настоящее время для координации действия авиации в полосе действия наземных сил, «вывода» авиации (летательных аппаратов) на цель обеспечивается передовым авиационным наводчиком (ПАН) – человеком, который находясь на переднем крае боевых действий, а иногда рядом с противником, даёт целеуказание на борт летательного аппарата (ЛА). С одной стороны, это угрожает жизни ПАН как со стороны противника, так и возможное огневое поражение со стороны своих войск, а с другой стороны человеку свойственны такие факторы как стресс, усталость, страх, плохое самочувствие и другие.

Кроме того, ПАН для выполнения боевой задачи высылается в район боевых действий заблаговременно и находится там вне зависимости от погодных условий и времени суток (дождь, туман, метель, задымление, ночь и т.п.). Использование вместо человека робота позволит исключить выше перечисленные факторы, исключить риск жизни и здоровья человека.

Основной задачей авиационного наводчика в боевых условиях является обеспечение устойчивой связи с авиацией (летательными аппаратами) при их действии в полосе своих войск (наземных сил), вывода их на рубеж поражения цели (объекта, техники и др.) и управление (сопровождение) ею при нанесении ударов, совершении манёвра и выхода из зоны боевых действий войск.

В создаваемом РТК ПАН весь перечень задач будет перераспределяться между различными комплексами технических средств, объединённых в системы, функционирующих на основе единого программного комплекса, основанного на работе искусственного интеллекта. Причём, одна часть задач будет реализовываться в самом РТК, а другая задаваться (определяться) оператором с АРМ с ПУ АН дистанционно по радиоканалам.

На основании задач и требований к РТК ПАН, предложенный роботизированный комплекс (рисунок 1) включает в себя: систему обработки информации и формирования команд 1, систему управления РТК ПАН 2, систему боевого управления авиацией 3, исполнительно-техническую систему 5, систему электропитания 4, характеризующие параллельную работу в различных режимах их боевого применения.

Каждая из систем включает в своём составе подсистемы, обеспечивающие работу всего комплекса в целом.

Система управления РТК ПАН 2 выполняет по существу функции подготовки всего комплекса к работе и состоит из подсистем: защиты 6, дистанционного управления (ДУ) 7, временного таймера 8, навигации 9.

С помощью подсистемы РТК ПАН 8 обеспечивается запуск к работе всего комплекса в автономном/автоматизированном режиме работы с помощью временного таймера или через подсистему дистанционного управления (ДУ) 7 по радиолинии дистанционного управления по сигналу с АРМ оператора через модуль связи 10, бортовую ЭВМ с искусственным интеллектом 11, системы обработки информации и формирования команд 1. Передача команд осуществляется на процессор 13.

Системы обработки информации и формирования команд 1, используя программный комплекс, позволяет сформировать соответствующую команду (сигнал), произвести его сравнение с базой данных и через интерфейс обмена информацией 12 переслать в соответствующую подсистему для выполнения дальнейших действий.

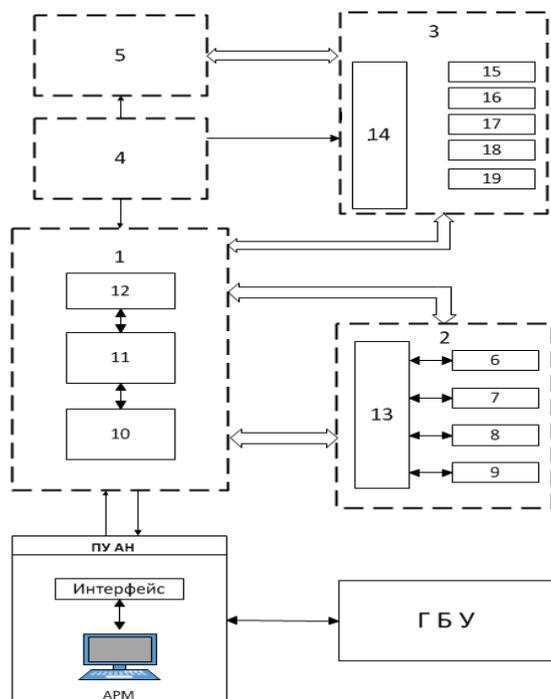


Рисунок 1 – Структурная схема РТК ПАН

Система боевого управления авиацией 3 работает на основе формируемых системой обработки информации и формирования команд 1.

Основу системы 1 составляет бортовая ЭВМ 11 с искусственным интеллектом.

Обнаружение и наблюдение ЛА осуществляется с помощью видео и тепловизионной камер, установленных на специальной штанге РТК (рисунок 2), во взаимодействии с системой вертикального и горизонтального наведения со сканированием в горизонтальной плоскости в секторе  $120^{\circ}$  и в вертикальной –  $180^{\circ}$  (рисунок 3). Кроме видеокамер для обнаружения ЛА через модуль связи 14 обеспечивается воздушная радиосвязь в УКВ диапазоне. С помощью подсистемы опознавания 16 определяется принадлежность ЛА – «свой-чужой».

На борт ЛА с помощью подсистемы целеуказания 19 и модуля связи 10, передаются данные по цели (азимут, дальность, объект, колонна машин, бронетехника и др.), обозначается передний край войск дымовым облаком и сигнальной ракетой, которые размещаются на отдельной выдвигаемой платформе в специальных направляющих пакетах с кассетным заряданием, расположенных в

исполнительно-технической системе. 5 Наведение пакета направляющих осуществляется с помощью механизмов горизонтального и вертикального наведения.

Срабатывание соответствующих зарядных устройств производится с помощью электро-датчика, сигналом переданного с БЭВМ 11. Пуск осуществляется по выбору БЭВМ 11, в зависимости от условий обстановки (характера местности, метеоданных и др.). С помощью датчиков, установленных на поворотных устройствах, программное обеспечение позволяет проконтролировать правильность наведения в сторону цели, а с помощью видеокамеры на мониторе АРМ оператора ПУ АН имеется возможность вести наблюдение.

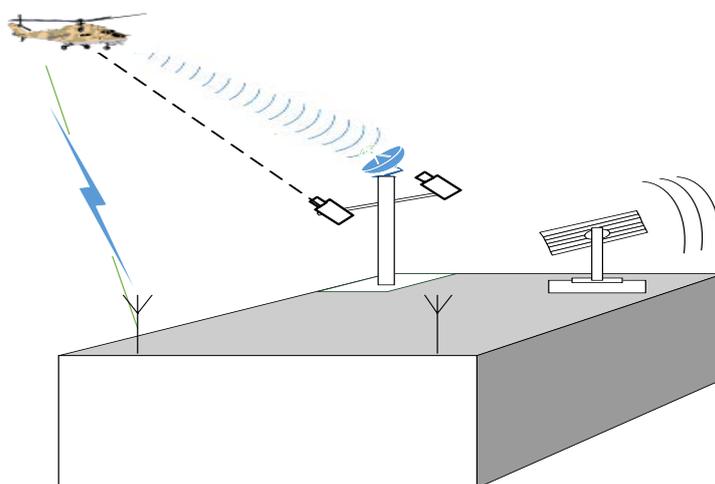


Рисунок 2 – Контейнер с РТК ПАН

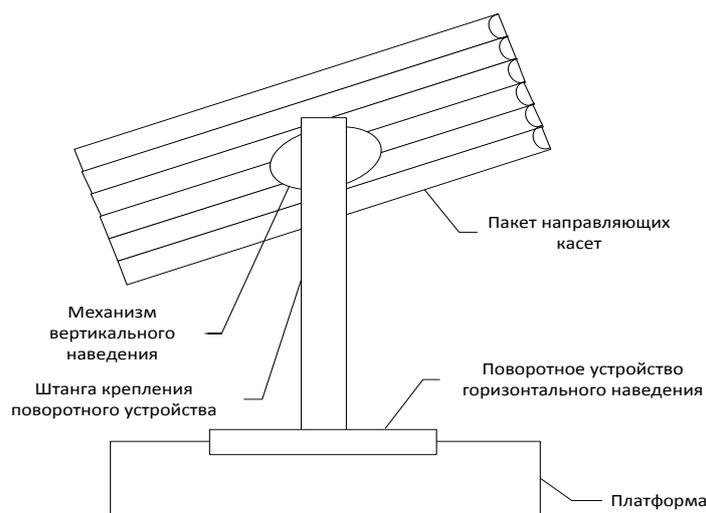


Рисунок 3 – Устройство подсистемы целеуказания и наведения

Система электропитания 4 предназначена для обеспечения работоспособности всех технических устройств, входящих в РТК. В её состав входит несколько аккумуляторных батарей размещённых в отдельном отсеке контейнера РТК. Электропитание систем осуществляется по независимым кабелям с разъёмами к каждой. В «дежурном» («ждущем») режиме напряжение подаётся только на подсистему управления РТК 8, с помощью которой поддерживается в рабочем состоянии модуль связи 10. Состояние источников электропитания и систем РТК отображается на мониторе АРМ оператора ПУ АН.

В составе исполнительно-технической системы 5 имеется две платформы, на которых установлены полутелескопические штанги (рисунок 2), выдвигающиеся в процессе управления авиацией в автоматизированном режиме, а также с помощью «Ручного управления» оператором с АРМ ПУ АН.

Конструктивно оборудование систем выполнено в виде герметических блоков с разъёмами, которые между собой соединяются кабельными жгутами с разъёмами, и крепятся к корпусу контейнера РТК на амортизаторах. На верхней части (крышке) корпуса контейнера РТК размещены антенны и имеются специально открывающиеся (раздвигающиеся) створки, с которых выдвигаются штанги для работы подсистем 15 – 19. Исходя из заданных требований и имеющейся элементной базы размеры

контейнера РТК АН могут составить 50x70x60 см, по весу - до 30 – 40 кг. Важным требованием к РТК является приспособленность его для транспортировки, перевозки любыми видами транспорта в соответствии со средними условиями транспортирования, а также возможность обслуживания расчетом из одного - двух человек. Контейнер выполняется из композиционного материала акренина, обладающего (обеспечивающего) высокой прочностью, влагостойкостью, антикоррозийностью, стойкостью к внешним воздействиям (пулевым, осколочным и др.).

Особенностью РТК ПАН контейнерного типа является то, что в процессе выполнения боевых задач его можно размещать в условиях гористой, лесистой, болотистой, задымлённой местности, а ПУ АН может находиться в непосредственной близости с пунктами управления наземной группировки войск (частями, подразделениями) в условиях приемлемых для управления РТК ПАН, на удалении до 10 - 20 км.

Для выполнения боевой задачи согласовываются вопросы взаимодействия в соответствии с решением на боевое применение авиации, определяются районы (места) размещения (развёртывания) пунктов управления, в том числе РТК ПАН контейнерного типа, и время их готовности к работе. Проверяется работоспособность всех систем РТК ПАН, настраиваются радиосредства модуля связи 10, вводятся исходные данные в вычислительные комплексы и задаётся режим автоматизированного управления РТК по заранее разработанной программе процессоров.

В район боевых действий контейнер с РТК ПАН может доставляться на автомобиле или с помощью беспилотного или пилотируемого летательного аппарата среднего класса (вертолёте). На рисунке 4 приведён вариант размещения контейнера РТК ПАН на местности.

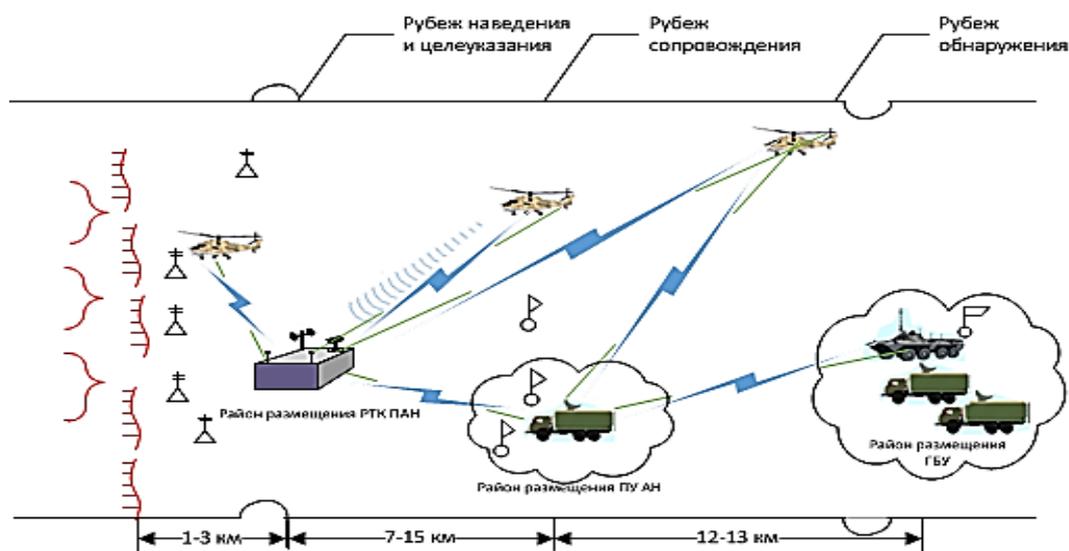


Рисунок 4 – Вариант размещения контейнера РТК ПАН на местности

При вылете авиации с аэродрома для выполнения боевой задачи (в зону действия войск) РТК ПАН переводится в рабочий (боевой) режим – включаются все системы, выдвигаются штанги с исполнительными устройствами (видео-, телекамера и др.) дистанционно с пульта управления оператора АРМ ПУ АН или вводится автоматизированный режим работы РТК по заранее (предварительно) введённой программе.

Для управления РТК ПАН организуется высокоскоростная радиолиния, работающая в диапазоне частот 2000 – 2500 МГц со скоростью 54 Мбит/с, и запасная – в диапазоне 220 – 520 МГц.

Передача различного рода выполненных команд, сигналов, полученных изображений передаётся по радиолинии (РТК ПАН – ПУ АН) в УКВ диапазоне (1000 – 2000 МГц) по высокоскоростному симплексному каналу с отображением на мониторе АРМ оператора с возможностью ретрансляции на АРМ (видеомониторы) должностных лиц ПБУ.

С помощью соответствующих подсистем обеспечивается обнаружение, наблюдение, сопровождение, наведение, целеуказание ЛА и разведка цели, по которой наносятся удары.

Предлагаемый наземный робототехнический комплекс по своему оснащению является многофункциональным видом вооружения, обеспечивающим управление авиацией (ЛА) при выполнении боевых задач как совместно с наземными войсками, так и отдельно для нанесения ударов по противнику на изолированных направлениях. Создание РТК ПАН направлено на качественное

улучшение параметров эффективности управления, замене устаревших образцов ВВТ за счет оснащения современным модульным оборудованием с использованием технологий военной робототехники, расширения функциональных возможностей, а также максимальное сокращение потерь личного состава в ходе ведения боевых действий.

Робототехнический комплекс по своему техническому исполнению является автоматизированным, способным функционировать автономно на удалении от ПУ (управляющего устройства). Учитывая наличие в нём систем и особенности их работы, можно предположить, что комплекс с некоторыми доработками программного обеспечения, будет пригоден для работы на аэродромах в Арктической зоне в качестве систем посадки ЛА в суровых климатических условиях Севера, где присутствие человека затруднено или даже опасно для его жизни со стороны бродячих белых медведей особенно в период полярных ночей.

1. Буренок В.М. Вопрос дня - роботизация войск. Военно-промышленный курьер. Выпуск № 34 (502) за 4 сентября 2013 года.
2. Носков В.П., Рубцов И.В. Опыт решения задачи автономного управления движением мобильных роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. № 12, 2005 г.
3. Русинов В. Состояние и планы развития наземных робототехнических комплексов США. Зарубежное военное обозрение, №3, 2013 г.
4. Робототехнические средства, комплексы и системы военного назначения. Основные положения. Классификация. Методические рекомендации. - М.: МО РФ, 2014 г.

*M.A. Gudkov, V.N. Luk'yanchik, S.N.Ovsjannikov*

## **THE CREATION OF A GROUND-BASED ROBOTIC COMPLEX OF ADVANCED AIRCRAFT AIMER FOR THE MANAGEMENT OF ASSAULT AND ARMY AVIATION**

*Military Academy of telecommunication  
gudkovmihail82@mail.ru, stasfvo@mail.ru*

### **Annotation**

The creation of a ground-based robotic complex of advanced aircraft aimer is focused on two main advantages: first, - reduction of losses of personnel and military equipment in combat high-risk tasks; second, - increase the efficiency of task performance and creation of possibility for new tasks not available for human capability.

The ground-based robotic complex is a multipurpose type of weapons. He provides aviation management in combat task performance both with troops and without them.

The complex can operate autonomously and in remote control mode.

Keywords: robotic complex, advanced aircraft aimer, computer workstation, control center, aircraft.

## **К СОЗДАНИЮ НАЗЕМНОГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПЕРЕДОВОГО АВИАЦИОННОГО НАВОДЧИКА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ АРМЕЙСКОЙ И ШТУРМОВОЙ АВИАЦИЕЙ**

*Военная академия связи им. С.М. Будённого, Санкт-Петербург*

### **Аннотация**

Создание наземного робототехнического комплекса передового авиационного наводчика РТК ПАН ориентировано на два основных преимущества: первое - уменьшение потерь личного состава и техники при выполнении боевых и высокорисковых задач; второе - повышение эффективности решения известных задач и появление возможности выполнения новых задач, недоступных для решения человеком в силу физиологических и интеллектуальных ограничений.

Предлагаемый наземный робототехнический комплекс по своему оснащению является многофункциональным видом вооружения, обеспечивающим управление авиацией (летательными аппаратами) при выполнении боевых задач как совместно с общевойсковыми соединениями, частями (подразделениями), так и отдельно для нанесения ударов по противнику на изолированных направлениях.

Комплекс структурно и функционально состоит из систем, обеспечивающих его работу в автономном (автоматизированном) режиме и при дистанционном управлении.

Ключевые слова: Робототехнический комплекс, передовой авиационный наводчик, автоматизированное рабочее место, пункт управления, летательный аппарат.

За последние десятилетия в мире произошел качественный скачок в развитии средств вооруженной борьбы, что привело к пересмотру взглядов на ее подготовку и ведение.

Исходя из этого, Президентом и Правительством Российской Федерации поставлена задача качественной модернизации Вооруженных Сил, перевооружение их на современные и перспективные образцы вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ).

Роботизация является составной частью общего процесса повышения качественного уровня существующего и создания нового ВВСТ, отвечающих современным требованиям информационной эпохи в отечественном военном строительстве. [1]

При определении потребности в робототехнических комплексах военного назначения (РТК ВН) целесообразно ориентироваться на два основных преимущества, которые дает их внедрение в войска: первое - уменьшение потерь личного состава и техники при выполнении боевых и высокорисковых задач; второе - повышение эффективности решения известных задач и появление возможности выполнения новых задач, недоступных для решения человеком в силу физиологических и интеллектуальных ограничений. [2]

Опыт локальных войн и вооруженных конфликтов последних десятилетий свидетельствуют о возрастающей роли робототехнических комплексов военного назначения и, в первую очередь, комплексов наземного и воздушного применения, при подготовке и ведении военных действий, выполнении задач другими силовыми министерствами и ведомствами.

Появление роботов делает возможным решение ряда задач, недоступных ранее. Целесообразным является применение РТК ВН для решения всего спектра боевых и обеспечивающих задач. При этом основными из них на ближайшую перспективу могут быть: разведывательные, боевые (ударные), специальные и другие. [3]

Ведение современных боевых действий соединениями (частями, подразделениями) наземной группировки войск невозможно представить без поддержки авиации и массированного нанесения ракетно - артиллерийских ударов по противнику. Чтобы обеспечить слаженность боевых действий между общевойсковыми частями (подразделениями) и другими родами войск в системе управления предусматривается (планируется) организация взаимодействия между всеми участниками, выполняющих боевые задачи в соответствии с их предназначением [4].

Из опыта военных действий в Афганистане, Чеченской республике, Стратегических учений войск («Центр-2015», «Кавказ-2016», «Запад-2017», боевых действий ВКС ВС РФ в САР следует, что применение авиации позволяет эффективно решать боевые задачи наземной группировки войск.

Однако, поражение целей, уничтожение объектов и живой силы армейской и штурмовой авиацией (далее авиации) с вероятностью 0,85 – 0,95 невозможно без точного наличия координат цели и соответствующего целеуказания и наведения. В настоящее время для координации действия авиации в

полосе действия наземных сил, «вывода» авиации (летательных аппаратов) на цель обеспечивается передовым авиационным наводчиком (ПАН) – человеком, который находясь на переднем крае боевых действий, а иногда рядом с противником, даёт целеуказание на борт летательного аппарата (ЛА). С одной стороны, это угрожает жизни ПАН как со стороны противника, так и возможное огневое поражение со стороны своих войск, а с другой стороны человеку свойственны такие факторы как стресс, усталость, страх, плохое самочувствие и другие.

Кроме того, ПАН для выполнения боевой задачи высылается в район боевых действий заблаговременно и находится там вне зависимости от погодных условий и времени суток (дождь, туман, метель, задымление, ночь и т.п.). Использование вместо человека робота позволит исключить выше перечисленные факторы, исключить риск жизни и здоровья человека.

Основной задачей авиационного наводчика в боевых условиях является обеспечение устойчивой связи с авиацией (летательными аппаратами) при их действии в полосе своих войск (наземных сил), вывода их на рубеж поражения цели (объекта, техники и др.) и управление (сопровождение) ею при нанесении ударов, совершении манёвра и выхода из зоны боевых действий войск.

В создаваемом РТК ПАН весь перечень задач будет перераспределяться между различными комплексами технических средств, объединённых в системы, функционирующих на основе единого программного комплекса, основанного на работе искусственного интеллекта. Причём, одна часть задач будет реализовываться в самом РТК, а другая задаваться (определяться) оператором с АРМ с ПУ АН дистанционно по радиоканалам.

На основании задач и требований к РТК ПАН, предложенный роботизированный комплекс (рисунок 1) включает в себя: систему обработки информации и формирования команд 1, систему управления РТК ПАН 2, систему боевого управления авиацией 3, исполнительно-техническую систему 5, систему электропитания 4, характеризующие параллельную работу в различных режимах их боевого применения.

Каждая из систем включает в своём составе подсистемы, обеспечивающие работу всего комплекса в целом.

Система управления РТК ПАН 2 выполняет по существу функции подготовки всего комплекса к работе и состоит из подсистем: защиты 6, дистанционного управления (ДУ) 7, временного таймера 8, навигации 9.

С помощью подсистемы РТК ПАН 8 обеспечивается запуск к работе всего комплекса в автономном/автоматизированном режиме работы с помощью временного таймера или через подсистему дистанционного управления (ДУ) 7 по радиолинии дистанционного управления по сигналу с АРМ оператора через модуль связи 10, бортовую ЭВМ с искусственным интеллектом 11, системы обработки информации и формирования команд 1. Передача команд осуществляется на процессор 13.

Системы обработки информации и формирования команд 1, используя программный комплекс, позволяет сформировать соответствующую команду (сигнал), произвести его сравнение с базой данных и через интерфейс обмена информацией 12 переслать в соответствующую подсистему для выполнения дальнейших действий.

Система боевого управления авиацией 3 работает на основе формируемых системой обработки информации и формирования команд 1.

Основу системы 1 составляет бортовая ЭВМ 11 с искусственным интеллектом.

Обнаружение и наблюдение ЛА осуществляется с помощью видео и тепловизионной камер, установленных на специальной штанге РТК (рисунок 2), во взаимодействии с системой вертикального и горизонтального наведения со сканированием в горизонтальной плоскости в секторе  $120^{\circ}$  и в вертикальной –  $180^{\circ}$  (рисунок 3). Кроме видеокамер для обнаружения ЛА через модуль связи 14 обеспечивается воздушная радиосвязь в УКВ диапазоне. С помощью подсистемы опознавания 16 определяется принадлежность ЛА – «свой-чужой».

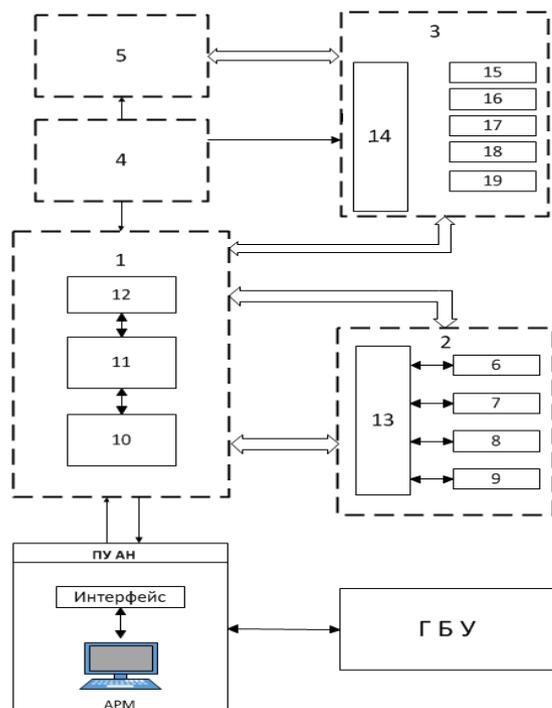


Рисунок 1 – Структурная схема РТК ПАН

На борт ЛА с помощью подсистемы целеуказания 19 и модуля связи 10, передаются данные по цели (азимут, дальность, объект, колонна машин, бронетехника и др.), обозначается передний край войск дымовым облаком и сигнальной ракетой, которые размещаются на отдельной выдвигаемой платформе в специальных направляющих пакетах с кассетным заряданием, расположенных в исполнительно-технической системе. 5 Наведение пакета направляющих осуществляется с помощью механизмов горизонтального и вертикального наведения.

Срабатывание соответствующих зарядных устройств производится с помощью электро-датчика, сигналом переданного с БЭВМ 11. Пуск осуществляется по выбору БЭВМ 11, в зависимости от условий обстановки (характера местности, метеоданных и др.). С помощью датчиков, установленных на поворотных устройствах, программное обеспечение позволяет проконтролировать правильность наведения в сторону цели, а с помощью видеокамеры на мониторе АРМ оператора ПУ АН имеется возможность вести наблюдение.

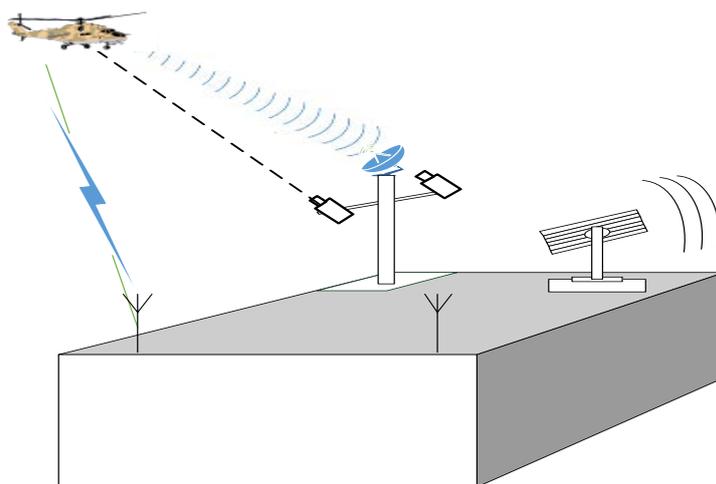


Рисунок 2– Контейнер с РТК ПАН

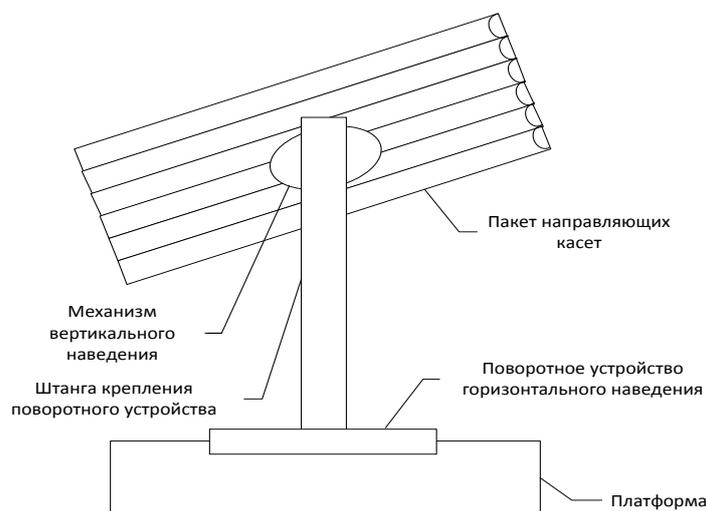


Рисунок 3 – Устройство подсистемы целеуказания и наведения

Система электропитания 4 предназначена для обеспечения работоспособности всех технических устройств, входящих в РТК. В её состав входит несколько аккумуляторных батарей размещённых в отдельном отсеке контейнера РТК. Электропитание систем осуществляется по независимым кабелям с разъёмами к каждой. В «дежурном» («ждущем») режиме напряжение подаётся только на подсистему управления РТК 8, с помощью которой поддерживается в рабочем состоянии модуль связи 10. Состояние источников электропитания и систем РТК отображается на мониторе АРМ оператора ПУ АН.

В составе исполнительно-технической системы 5 имеется две платформы, на которых установлены полутелескопические штанги (рисунок 2), выдвигающиеся в процессе управления авиацией в автоматизированном режиме, а также с помощью «Ручного управления» оператором с АРМ ПУ АН.

Конструктивно оборудование систем выполнено в виде герметических блоков с разъёмами, которые между собой соединяются кабельными жгутами с разъёмами, и крепятся к корпусу контейнера РТК на амортизаторах. На верхней части (крышке) корпуса контейнера РТК размещены антенны и имеются специально открывающиеся (раздвигающиеся) створки, с которых выдвигаются штанги для работы подсистем 15 – 19. Исходя из заданных требований и имеющейся элементной базы размеры контейнера РТК АН могут составить 50x70x60 см, по весу - до 30 – 40 кг. Важным требованием к РТК является приспособленность его для транспортировки, перевозки любыми видами транспорта в соответствии со средними условиями транспортирования, а также возможность обслуживания расчетом из одного - двух человек. Контейнер выполняется из композиционного материала акренита, обладающего (обеспечивающего) высокой прочностью, влагостойкостью, антикоррозийностью, стойкостью к внешним воздействиям (пулевым, осколочным и др.).

Особенностью РТК ПАН контейнерного типа является то, что в процессе выполнения боевых задач его можно размещать в условиях гористой, лесистой, болотистой, задымлённой местности, а ПУ АН может находиться в непосредственной близости с пунктами управления наземной группировки войск (частями, подразделениями) в условиях приемлемых для управления РТК ПАН, на удалении до 10 - 20 км.

Для выполнения боевой задачи согласовываются вопросы взаимодействия в соответствии с решением на боевое применение авиации, определяются районы (места) размещения (развёртывания) пунктов управления, в том числе РТК ПАН контейнерного типа, и время их готовности к работе. Проверяется работоспособность всех систем РТК ПАН, настраиваются радиосредства модуля связи 10, вводятся исходные данные в вычислительные комплексы и задаётся режим автоматизированного управления РТК по заранее разработанной программе процессоров.

В район боевых действий контейнер с РТК ПАН может доставляться на автомобиле или с помощью беспилотного или пилотируемого летательного аппарата среднего класса (вертолёт). На рисунке 4 приведён вариант размещения контейнера РТК ПАН на местности.

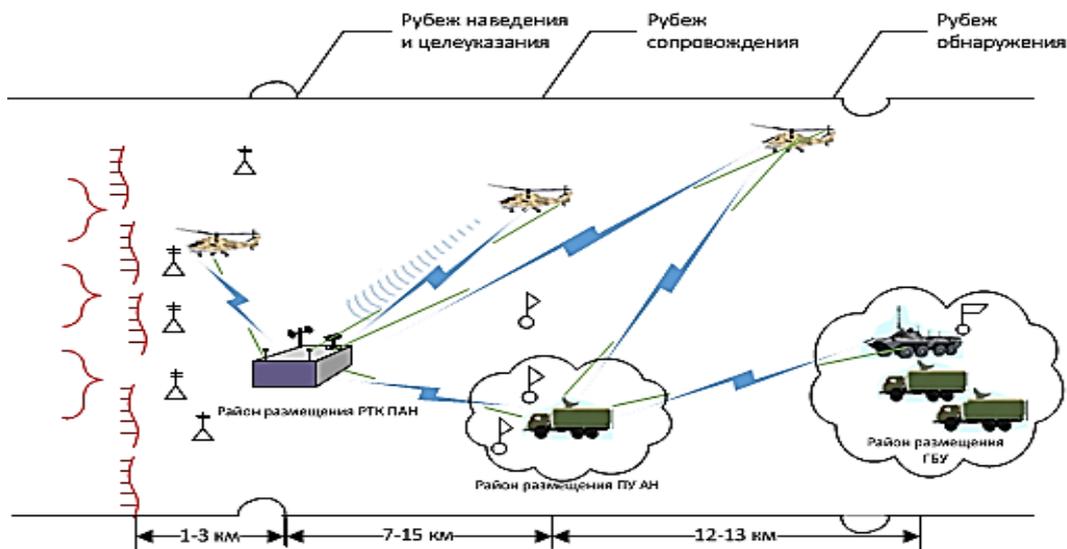


Рисунок 4 – Вариант размещения контейнера РТК ПАН на местности

При вылете авиации с аэродрома для выполнения боевой задачи (в зону действия войск) РТК ПАН переводится в рабочий (боевой) режим – включаются все системы, выдвигаются штанги с исполнительными устройствами (видео-, телекамера и др.) дистанционно с пульта управления оператора АРМ ПУ АН или вводится автоматизированный режим работы РТК по заранее (предварительно) введённой программе.

Для управления РТК ПАН организуется высокоскоростная радиолиния, работающая в диапазоне частот 2000 – 2500 МГц со скоростью 54 Мбит/с, и запасная – в диапазоне 220 – 520 МГц.

Передача различного рода выполненных команд, сигналов, полученных изображений передаётся по радиолинии (РТК ПАН – ПУ АН) в УКВ диапазоне (1000 – 2000 МГц) по высокоскоростному симплексному каналу с отображением на мониторе АРМ оператора с возможностью ретрансляции на АРМ (видеомониторы) должностных лиц ПБУ.

С помощью соответствующих подсистем обеспечивается обнаружение, наблюдение, сопровождение, наведение, целеуказание ЛА и разведка цели, по которой наносятся удары.

Предлагаемый наземный робототехнический комплекс по своему оснащению является многофункциональным видом вооружения, обеспечивающим управление авиацией (ЛА) при выполнении боевых задач как совместно с наземными войсками, так и отдельно для нанесения ударов по противнику на изолированных направлениях. Создание РТК ПАН направлено на качественное улучшение параметров эффективности управления, замене устаревших образцов ВВТ за счет оснащения современным модульным оборудованием с использованием технологий военной робототехники, расширения функциональных возможностей, а также максимальное сокращение потерь личного состава в ходе ведения боевых действий.

Робототехнический комплекс по своему техническому исполнению является автоматизированным, способным функционировать автономно на удалении от ПУ (управляющего устройства). Учитывая наличие в нём систем и особенности их работы, можно предположить, что комплекс с некоторыми доработками программного обеспечения, будет пригоден для работы на аэродромах в Арктической зоне в качестве систем посадки ЛА в суровых климатических условиях Севера, где присутствие человека затруднено или даже опасно для его жизни со стороны бродячих белых медведей особенно в период полярных ночей.

5. Буренок В.М. Вопрос дня - роботизация войск. Военно-промышленный курьер. Выпуск № 34 (502) за 4 сентября 2013 года.
6. Носков В.П., Рубцов И.В. Опыт решения задачи автономного управления движением мобильных роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. № 12, 2005 г.
7. Русинов В. Состояние и планы развития наземных робототехнических комплексов США. Зарубежное военное обозрение, №3, 2013 г.
8. Робототехнические средства, комплексы и системы военного назначения. Основные положения. Классификация. Методические рекомендации. - М.: МО РФ, 2014 г.

## **ПОДХОД К ОБЕСПЕЧЕНИЮ ЗАЩИТЫ КАНАЛА УПРАВЛЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ**

*1Россия, Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, fvo.urgpu.npi@yandex.ru*

*2Россия, Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, nemo4ka74@gmail.com, kot-c@yandex.ru, laos-82@yandex.ru*

### **Аннотация**

На сегодняшний день исследования в области робототехники являются весьма актуальными. Роботизированные комплексы могут в разы повысить производительность, не совершая ошибок вследствие «человеческого» фактора. Такие комплексы относят к киберфизическим системам. Неотъемлемой частью киберфизических систем является система управления. Эту систему, как и любой информационный канал, необходимо защищать от компьютерных атак, чтобы избежать перехвата киберфизических систем злоумышленниками. В статье разработан робототехнический комплекс и система, позволяющая управлять этим комплексом по надежному криптографически стойкому соединению. Основным элементом данной системы является криптографический чип stm32f415. Он позволяет уменьшить нагрузку на центральный процессор для выполнения алгоритмов управления, освободив его от криптографических операций, тем самым, гарантируя выигрыш во времени.

Ключевые слова: канал управления, киберфизические системы, роботизированные системы, криптографические алгоритмы.

Автоматизированные и роботизированные системы обладают неразрывной связью между входящими в них вычислительными и физическими элементами. Сегодня представители таких систем могут быть найдены в самых разнообразных областях - космос, автомобильные, химическая технология, гражданская инфраструктура, энергетика, здравоохранение, производство, транспорт, и потребительские устройства. Такой класс систем часто рассматривается как киберфизические системы.

С одной стороны, киберфизические системы за счет распределенной сети датчиков и блоков управления позволяют решить многие практические задачи, позволяющие как сэкономить время, так и уменьшить человеческие потери, за счет выполнения наиболее опасных заданий роботизированными системами.

С другой стороны, за счет использования открытых радиоканалов и известных протоколов киберфизические системы подвержены воздействию компьютерных атак, которые в наилучшем случае могут привести к нарушению работоспособности сети, а в худшем к перехвату управления.

К наиболее распространенным компьютерным атакам на киберфизические системы относятся:

Активные виды компьютерных атак - компьютерные вирусы, модифицированные драйвера, целенаправленные (таргетированные) атаки.

Пассивные виды компьютерных атак – подслушивание, парольные атаки, имитация удостоверения, атаки на уровне приложений [1, 3].

Учитывая вышеизложенное, в настоящее время остро стоит вопрос о защите киберфизических систем и каналов управления ими. С этой целью предлагается использовать криптографические протоколы и алгоритмы. Выделяют следующие виды криптографических преобразований:

1. Симметричное шифрование – TDES, DES, AES, ГОСТ 28147-89;
2. Ассиметричное шифрование – RSA, DSA, Эль-Гамаль;
3. Электронная цифровая подпись – FDH, ESDSA, ГОСТ Р 34.10-2012;
4. Хеш-функция – MD 2/4/5/6, SHA, ГОСТ Р 34.11-94.

Из перечисленных выше криптографических алгоритмов, для реализации защиты канала управления киберфизической системы, рациональным является симметричный алгоритм AES, который отличается криптостойкостью и быстродействием.

В настоящее время криптография решает следующие основные задачи:

1. Обеспечение конфиденциальности сообщений – решение проблемы защиты информации от ознакомления с ее содержанием со стороны лиц, не имеющих права к ней.

2. Обеспечение целостности данных – гарантированная невозможность несанкционированного изменения информации.

3. Аутентификация – подтверждение подлинности сторон и самой информации в процессе обмена данными.

4. Невозможность отказаться от авторства – предотвращение отказа абонента от совершенных им действий.

Эти задачи защиты данных реализованы в специальном аппаратном блоке, который называют криптографическим ускорителем (криптографическим блоком). Криптографические ускорители работают отдельно от основного ядра процессора, что позволяет ему сохранять свои ресурсы для выполнения следующих задач [2, 4, 5]:

- обслуживание для организации обмена с периферийными устройствами;
- обработку данных;
- осуществление беспроводного соединения с другими устройствами;
- управляющие и другие алгоритмы;
- ускорители позволяют шифровать данные по алгоритмам DES/TDES/AES, вычислять хеш-функции SHA-1/MD5/HMAC и генерировать случайные числа.

С целью проверки работы криптографического ускорителя была разработана роботизированная система (рисунок 1), состоящая из следующих частей:

- BeagleBoneBlack (главный процессор роботизированной системы);
- Mini Maestro 18-Channel USB Servo Controller (драйвер-двигатель);
- MG996R (сервоприводы);
- STM32F415 (криптографический чип);
- Блок питания;
- Wifiадаптер.



Рисунок 1 – Роботизированная система в сборке

Корпус представляет собой металлический скелет, который связывает и объединяет необходимую периферию в единое целое, при этом, обеспечивая защиту и целостность компонентов. Все детали, из которых он состоит, были спроектированы в программе КОМПАС-3D V16 и вырезаны на фрезерном станке. Управление роботизированной системой осуществляется использованием wi-fi адаптера в качестве передатчика радиосигнала.

Для обеспечения криптографически стойкого протокола управления в роботизированной системе используется микроконтроллер с 32-разрядным ядром ARM Cortex-M4F с криптографическим ускорителем stm32f415rgt производства компании «STMicroelectronics».

Используя техническую документацию, был проведен анализ выводов криптографического чипа с выводами микроконтроллера stm32f415, после которого было принято решение внедрить чип в плату stm32f415discovery, заземлив несколько контактов (рисунок 2).

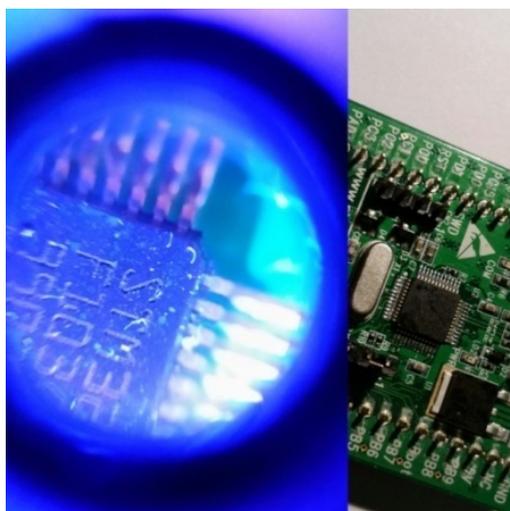


Рисунок 2 – Криптографический чип STM32F415

Для того, чтобы чип дешифровал принятые пакеты, в качестве алгоритма дешифрования использовался AES с длиной ключа 128 бит. Данный алгоритм был выбран за своё быстродействие и криптостойкость.

В качестве алгоритма распределения ключей был рассмотрен и реализован алгоритм Диффи–Хеллмана, который позволяет двум сторонам получить общий секретный ключ, используя незащищенный от прослушивания, но защищенный от подмены, канал связи.

Функциональная схема криптографически стойкого протокола управления роботизированной системой представлена на рисунке 3.

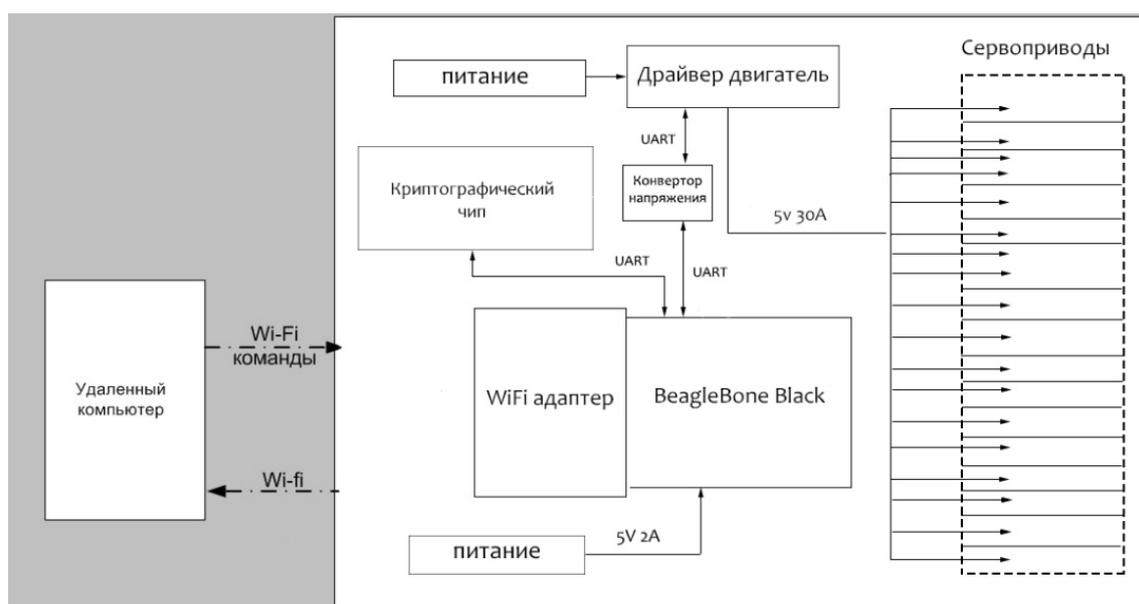


Рисунок 3 – Функциональная схема

В качестве центрального процессора и электронного мозга для робота был выбран одноплатный компьютер BeagleBoneBlack (BBB) [6, 7].

С целью подключения драйвера-двигатель (MiniMaestro 18-ChannelUSBServoController) к главному процессору (BeagleBoneBlack) по UART-интерфейсу был взят конвертор ADuM1201, который предназначен для преобразования электроэнергии одних параметров или показателей качества в электроэнергию с другими значениями параметров или показателей качества. На рисунке 4 изображена плата перед вытравкой, нарисованная в программе P-CAD 2006.

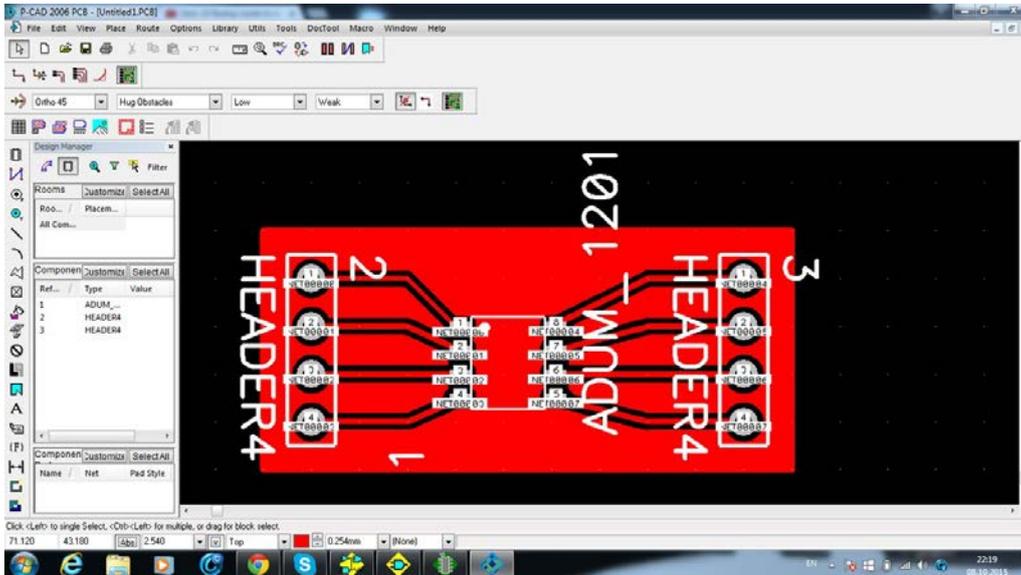


Рисунок 4 – Схема конвертора

Для того чтобы провести исследования реализованной криптографической системы на предмет обнаружения проблем и ошибок, был осуществлен перехват и анализ передаваемых пакетов с помощью программы Wireshark.

На рисунке 5 можно увидеть, что с помощью Клиентской программы, передается сообщение «lololololo» роботу в открытом (незашифрованном) виде.

```

cc = c.encrypt(inputed_text)
print(cc)
sock.send(inputed_text)
#sock.send("".join(chr(i) for i in cc))

time.sleep(10)

sock.close()
exit()

```

---

```

Run main
('Key + alfavit: ', 'efflbammgebafafa')
Input command: lololololololo
Command to send: lololololololo
[118, 30, 57, 177, 224, 107, 29, 44, 82, 112, 132, 18, 174, 138, 54, 22]
('p=', 2804317158712787)
('g=', 873275891397789L)
('a=', 1800357012196534, '- Secret Kay')
('Alisa: Y=', 23690198315674L)
('Bob Y=', '1864463782193713')
1305787660169688
('Key + alfavit: ', 'beaglkjjabjmjll')
Input command:

```

Рисунок 5 – Передача незашифрованного сообщения роботизированной системе

Предварительно авторизовавшись в wi-fi сети, нужно запустить Wireshark, с помощью которого будут перехвачены передаваемые пакеты. На рисунке 6 видно отправляемое слово.



Кроме этого, организована постоянная смена крипто-ключей, тем самым исключена возможность их подбора [8].

Таким образом, в настоящей статье представлен пример создания роботизированного комплекса, как элемента КБС, с защищенной системой управления им на основе алгоритма шифрования AES, являющимся на сегодняшний момент наиболее криптостойким.

Кром того, для защиты от атаки «грубого перебора» криптографического ключав системе управления необходимо реализовывать алгоритм распределения ключей, позволяющий генерировать новый ключ, каждый раз перед выполнением команды.

1. Reference manual STM32F405/415, STM32F407/417, STM32F427/437 and STM32F429/439 advanced ARM®-based 32-bit MCUs [Электронныйресурс] // STMicroelectronics, 2016 — 1744 с.
2. Схема обмена ключами Диффи — Хеллмана [Электронный ресурс] // URL: <http://kaf403.rloc.ru/POVS/Crypto/DiffieHellman.html>
3. [BeagleBone Black] Enable All UART Ports at Boot [Электронныйресурс] // URL: <https://billwaa.wordpress.com/2014/10/13/beaglebone-black-enable-all-uart-ports-at-boot>.
4. Нехарод-робот под управлением ROS [Электронный ресурс] // URL: <http://www.pvsm.ru/diy-ili-sdelaj-sam/62026>.
5. Пентестинг и тестирование на проникновение [Электронный ресурс] // URL: <http://www.psyhocode.com/pentesting/>.
6. Программирование STM32F4. USART. [Электронный ресурс] // URL: <http://microtechnics.ru/programmirovanie-stm32f4-usart-primer-programmy/>
7. Коцыняк М.А., Лаута О.С., Осадчий С.А. Вероятностно-временные характеристики компьютерной атаки типа «Анализ сетевого трафика» \ \ Информация и космос. 2013. № 3-4. С. 25-27.
8. Васюков Д.Ю., Коцыняк М.А., Коцыняк М.М., Лаута О.С., Лаута А.С. Устройство обнаружения удаленных компьютерных атак. Патент на изобретение RUS 2540838 03.03.2014.

---

<sup>I</sup> Work is performed with financial support from the Ministry of education and science. Unique identification number project RFMEFI57814X0046.

<sup>1</sup> Работа выполняется при финансовой поддержке Минобрнауки России. Уникальный идентификационный номер проекта RFMEFI57814X0046.

<sup>II</sup> The work is done in the framework of the Complex program of fundamental research of RAS OEMMPU III.4P

<sup>2</sup> Работа выполнена в рамках Комплексной программы фундаментальных исследований ОЭММПУ РАН III.4П.

<sup>III</sup> The study was supported by the RNF (grant No. 16-19-00044).

<sup>3</sup> Исследование выполнено при поддержке РФФ (грант №16-19-00044).

<sup>IV</sup> The work is executed at financial support of RFBR within the framework of scientific project No. 16-01-00429.

<sup>4</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках выполнения научного проекта №16-01-00429.

<sup>V</sup> Grant No. 16-29-04273, OFI-m

<sup>5</sup> Грант № 16-29-04273, офи-м

<sup>VI</sup> This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, projects no. 16-07-00811a, 16-07-00935a и 16-07-01264a.

<sup>6</sup> Работа выполняется при частичной поддержке РФФИ: гранты 16-07-00811a, 16-07-00935a и 16-07-01264a.

<sup>VII</sup> The scientific work described in this article was supported by grant of President of Russian Federation № МК-5826.2016.8.

<sup>7</sup> Научная работа, описанная в этой статье, была поддержана грантом Президента РФ № МК-5826.2016.8.

<sup>VIII</sup> The work is executed at financial support of RFBR (projects No. 16-31-60042, 17-01-00675), grant of President RF МК-1493.2017.1.

<sup>8</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 16-31-60042, 17-01-00675), гранта Президента РФ МК-1493.2017.1.

<sup>IX</sup> The study was supported by the RNF (grant No. 16-19-00044).

<sup>9</sup> Исследование выполнено при поддержке РФФ (грант №16-19-00044).

<sup>X</sup> The work is carried out with the partial support of the RFFI: grants 16-07-00811a, 16-07-00935a and 16-07-01264a.

<sup>10</sup> Работа выполняется при частичной поддержке РФФИ: гранты 16-07-00811a, 16-07-00935a и 16-07-01264a.

<sup>XI</sup> The work was supported by the Ministry of Education and science of the Russian Federation (Agreement No. 14.579.21.0119, unique project number RFMEFI57915X0119).

<sup>11</sup> Работа выполнена при поддержке Министерства Образования и Науки Российской Федерации (Соглашение № 14.579.21.0119, уникальный номер проекта RFMEFI57915X0119).

<sup>XII</sup> The work was supported by the Ministry of education and science of the Russian Federation (Agreement No. 14.579.21.0122, unique project number RFMEFI57915X0122).

<sup>12</sup> Работа выполнена при поддержке Министерства образования и Науки Российской Федерации (Соглашение № 14.579.21.0122, уникальный номер проекта RFMEFI57915X0122).

---

<sup>xiii</sup> Work is carried out in accordance with the decree of the RF government of 09.04.2010 No. 218 (PROJECT 218) in the framework of RTD projects performed with financial support of the Ministry of education and science of the Russian Federation (agreement of 01.12.2015 No. 02.G25.31.0160).

<sup>13</sup> Работа проводится в соответствии с постановлением Правительства РФ от 09.04.2010 № 218 (ПРОЕКТ 218) в рамках НИОКТР, выполняемой при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (договор от 01.12.2015 г. № 02.G25.31.0160).

<sup>xiv</sup> The work was supported by RFBR (№ 17-01-00675 a).

<sup>14</sup> Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-01-00675 а.

<sup>xv</sup> This work is supported by the Russian Foundation for Basic Research: grant 16-07-00811a, 16-07-00935a и 16-07-01264a.

<sup>15</sup> Работа выполняется при частичной поддержке РФФИ: гранты 16-07-00811a, 16-07-00935a и 16-07-01264a.

<sup>xvi</sup> The work is carried out with the partial support of the RFBR: grants 16-07-00811a, 16-07-00935a and 16-07-01264a.

<sup>16</sup> Работа выполняется при частичной поддержке РФФИ: гранты 16-07-00811a, 16-07-00935a и 16-07-01264a.

<sup>xvii</sup> The work is partially supported by RFBR grant no. 16-29-04379.

<sup>17</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 16-29-04379.

<sup>xviii</sup> The work is executed at support of the Russian Foundation for basic research (project No. 17-08-00666).

<sup>18</sup> Работа выполнена при поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований (проект № 17-08-00666).

<sup>xix</sup> The study was performed with financial support RFBR, research project No. 17-01-00675.

<sup>19</sup> Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-01-00675 а.

<sup>xx</sup> The work is done in the framework of the state assignment of the Ministry of education and science, project No. 8.2321.2017/HR "the Development and adaptation of management systems compensation dynamic deflection of the impact on mobile objects in a state of dynamic equilibrium"

<sup>20</sup> Работа выполнена в рамках госзадания Министерства образования и науки, проект № № 8.2321.2017/ПЧ «Разработка и адаптация систем управления компенсацией динамических отклоняющих воздействий на мобильные объекты, находящиеся в состоянии динамического равновесия»

<sup>xxi</sup> This work was supported by The Russian Foundation for Basic Research – grant №15-08-04166, №15-41-02578, №16-38-00755, №16-38-60086

<sup>21</sup> Работа выполнена при поддержке РФФИ проект №15-08-04166 а, №16-38-00755 мол\_а, № 15-41-02578 р\_поволжье\_а, №16-38-60086 мол\_а\_дк

<sup>xxii</sup> Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения государственного задания (задание № 9.3408.2017/4.6).

**Труды**  
Международной научно-технической конференции  
**ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА**

2-3 ноября 2017 года, Санкт-Петербург

**Proceedings**  
of the International Scientific and Technological Conference

**EXTREME ROBOTICS**

November 2-3, 2017, Saint-Petersburg, Russia

ISBN 978-5-907050-03-7



9 785907 050037

Подписано в печать 21.03.2018.  
Формат 60x84 1/16  
Гарнитура Times New Roman.  
Печать цифровая.  
Бумага офсетная 80 г/м<sup>2</sup>. Печ. л. 30,06.  
Заказ № 197  
Отпечатано в ИПЦ ООО «Политехника-принт»  
190005, Санкт-Петербург, Измайловский пр., 18 Д

ОРГАНИЗАТОР

Государственный научный центр Российской Федерации  
«Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский  
институт робототехники и технической кибернетики»



ORGANISER

Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ SUPPORTED BY



ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА INFORMATION SUPPORT

ЖУРНАЛ  
«Труды СПИИРАН»

ЖУРНАЛ «Мехатроника,  
автоматизация, управление»

ЖУРНАЛ «Робототехника  
и техническая кибернетика»

