

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Российская академия наук  
Российский фонд фундаментальных исследований  
АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»  
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН  
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН  
Южный федеральный университет  
Научно-исследовательский институт многопроцессорных  
вычислительных систем имени академика А.В. Каляева ЮФУ  
Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем  
Центральный аэрогидродинамический институт  
имени профессора Н. Е. Жуковского

---

# **ХІІ МУЛЬТИКОНФЕРЕНЦИЯ ПО ПРОБЛЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ**

**МКПУ-2019**

Материалы  
ХІІ мультikonференции

23–28 сентября 2019 г.  
Дивноморское, Геленджик

В четырех томах

**ТОМ 2**

Ростов-на-Дону – Таганрог  
Издательство Южного федерального университета

2019

УДК 004.8:004.89

ББК 32.973

М90

**Редакционная коллегия:**

академик РАН И.А. Каляев – ответственный редактор;  
академик РАН В.Г. Пешехонов; академик РАН С.Н. Васильев;  
член-корреспондент РАН Д.А. Новиков; академик РАН Ф.Л. Черноусько;  
академик РАН С.Ю. Желтов; академик РАН С.Л. Чернышев;  
д-р техн. наук О.П. Кузнецов; д-р техн. наук Н.Ф. Филимонов;  
канд. техн. наук Д.А. Губанов; д-р техн. наук И.Л. Ермолов;  
канд. техн. наук А.П. Кухаренко; д-р техн. наук Н.И. Сельвесюк

М90 XII мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2019) : материалы XII мультиконференции (Дивноморское, Геленджик, 23–28 сентября 2019 г.) : в 4 т. / Южный федеральный университет [редкол.: И.А. Каляев, В.Г. Пешехонов и др.]. – Ростов-на-Дону ; Таганрог : Издательство Южного федерального университета, 2019.

ISBN 978-5-9275-3188-2

Т. 2: – 228 с.

ISBN 978-5-9275-3190-5 (Т. 2)

В томе 2 материалов XII мультиконференции по проблемам управления (МКПУ-2019) представлены материалы докладов локальной научно-технической конференции «Робототехника и мехатроника» (РиМ-2019).

*Издание осуществлено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 19-08-20009-г.*

ISBN 978-5-9275-3190-5 (Т. 2)

ISBN 978-5-9275-3188-2

УДК 004.8:004.89

ББК 32.973

© Авторы докладов, 2019

© Институт проблем механики  
им. А.Ю. Ишлинского РАН, составление, 2019

© Научно-исследовательский институт  
многопроцессорных вычислительных систем имени  
академика А.В. Каляева Южного федерального  
университета, составление, оформление, 2019

## **ПРЕДИСЛОВИЕ**

---

*Стратегия научно-технологического развития России, утверждённая указом Президента РФ № 642 от 01 декабря 2016 г., направлена на обеспечение независимости и конкурентоспособности страны за счет создания эффективной системы наращивания и наиболее полного использования интеллектуального потенциала науки, а также трансформации науки и технологий в ключевой фактор развития России. Одним из семи приоритетных направлений Стратегии научно-технологического развития является **«Переход к цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших данных, машинного обучения и искусственного интеллекта»**. Очевидно, что задачи управления такими системами требуют разработки и применения новых методов и подходов, существенно отличаются от традиционных и имеющих междисциплинарный характер.*

*Поэтому основной целью XII мультikonференции по проблемам управления является обсуждение новых результатов фундаментальных и прикладных исследований в области процессов управления и их практического применения в различных сферах человеческой деятельности, направленных на реализацию Стратегии научно-технологического развития страны.*

*Научная программа конференции призвана объединить широкий круг вопросов и проблем, в том числе междисциплинарного характера, в рамках четырех локальных научно-технических конференций:*

- «Модели, методы и технологии интеллектуального управления» (ИУ-2019), председатель – академик С.Н. Васильев, сопредседатели – член-корреспондент РАН Д.А. Новиков, д.т.н. О.П. Кузнецов;*
- «Робототехника и мехатроника» (РиМ-2019), председатель – академик Ф.Л. Черноусько, сопредседатель – академик И.А. Каляев;*
- «Управление в распределенных и сетевых системах» (УРСС-2019), председатель – академик И.А. Каляев, сопредседатель – академик И.В. Бычков;*
- «Управление аэрокосмическими системами» (УАКС-2019), сопредседатели – академик С.Ю. Желтов, академик С.Л. Чернышев,*

*а также двух отчетных сессий по результатам выполнения программ ориентированных фундаментальных исследований (офи-м) Российского фонда фундаментальных исследований:*

- «Методы и модели искусственного интеллекта и их приложения в компьютерной лингвистике, нейрофизиологических исследованиях и медицине», председатель экспертного совета – академик И.А. Каляев;*
- «Фундаментальные проблемы группового взаимодействия роботов», председатель экспертного совета – академик Ф.Л. Черноусько.*

*Проведение XII мультikonференции по проблемам управления позволит:*

- объединить усилия российских ученых, работающих в области разработки теории управления сложными объектами и системами, в области создания высокоэффективных информационно-управляющих систем сложных объектов;*
- выявить наиболее перспективные направления создания высокоэффективных и надежных средств управления сложными системами;*
- ведущим российским ученым и специалистам представить широкой научной общественности свои научные результаты, полученные в ходе выполнения исследований по фундаментальным проблемам управления;*
- обеспечить обмен научными результатами между различными научными школами России;*
- передать молодым ученым накопленные современной наукой знания в области управления;*
- выработать рекомендации по повышению конкурентоспособности создаваемых в России образцов техники;*
- выработать методические рекомендации по организации и содержанию образовательного процесса подготовки по данному направлению специалистов, научных работников и кадров высшей квалификации;*
- издать материалы и лучшие доклады участников конференции для ознакомления широкой научной общественности и повышения уровня подготовки специалистов в высшей школе.*

## СОДЕРЖАНИЕ

## Локальная научно-техническая конференция «Робототехника и мехатроника» (РиМ-2019)

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	<b>13</b>
<b>ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ</b> .....	<b>14</b>
<i>Андреева М.В., Павловский В.Е.</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ И МАКЕТИРОВАНИЕ РОБОПОЕЗДА (РОБОТА-ЗМЕИ).....	14
<i>Лепетухин К.Ю., Калинин Я.В., Малолетов А.В., Брискин Е.С.</i>	
УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ГРУППЫ СОЧЛЕНЁННЫХ РОБОТОВ В АНИЗОТРОПНОЙ И НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ.....	17
<i>Семашкин Е.Н.</i>	
ВСЕПОГОДНОСТЬ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ И РАДИОЛОКАЦИОННЫХ КАНАЛОВ УПРАВЛЕНИЯ.....	19
<i>Сойфер В.А.</i>	
ФОТОНИКА И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ В СЕНСОРИКЕ, ОБРАБОТКЕ ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИИ.....	24
<b>РАЗДЕЛ 1. УПРАВЛЕНИЕ В РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ</b> .....	<b>27</b>
<i>Акмаев О.К., Кудояров Р.Г., Мунасыпов Р.А., Фецак С.И.</i>	
СТАНОК-РОБОТ С АДАПТИВНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ.....	27
<i>Андреева М.В., Павловский В.Е.</i>	
ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ТРАЕКТОРИЙ В ЗАДАЧЕ ПРЕСЛЕДОВАНИЯ.....	30
<i>Анисимов А.А., Тарарыкин С.В.</i>	
РАЗРАБОТКА РОБАСТНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОКАНАЛЬНЫМ МЕХАТРОННЫМ ОБЪЕКТОМ НА ОСНОВЕ ГРАМИАННОГО ПОДХОДА .....	33
<i>Асанов А.З., Гурьянова Е.О.</i>	
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИГАТЕЛЯ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ РАСХОДОМ ТОПЛИВА.....	36

<b>Бобырь М.В., Лунева М.Ю.</b> МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЧЕТКОГО ЦИФРОВОГО ФИЛЬТРА ДЛЯ РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА В СРЕДЕ SIMULINK.....	<b>39</b>
<b>Брискин Е.С., Шаронов Н.Г., Платонов В.Н.</b> О СИНТЕЗЕ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ЯКОРНО-ТРОСОВОГО ДВИЖИТЕЛЯ ПРИ ПЕРЕМЕЩЕНИИ ПО ЗАДАННОЙ ТРАЕКТОРИИ.....	<b>42</b>
<b>Воробьева Н.С., Жога В.В., Несмиянов И.А.</b> КИНЕМАТИЧЕСКИЙ И ДИНАМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРОМ ПАРАЛЛЕЛЬНО-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ.....	<b>45</b>
<b>Гайворонский С.А., Езангина Т.А.</b> ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА МАКСИМАЛЬНОЙ СТЕПЕНИ УСТОЙЧИВОСТИ ДЛЯ СИСТЕМЫ С ИНТЕРВАЛЬНЫМ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИМ ПОЛИНОМОМ.....	<b>48</b>
<b>Гайдук А.Р., Капустян С.Г., Колоколова К.В.</b> СИНТЕЗ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО УРОВНЯ РОБОТОВ С КОНЕЧНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ.....	<b>52</b>
<b>Глушченко А.И., Петров В.А., Ласточкин К.А.</b> СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БАЛАНСИРУЮЩИМ РОБОТОМ НА ОСНОВЕ ВТОРОГО МЕТОДА ЛЯПУНОВА.....	<b>55</b>
<b>Градецкий В.Г., Князьков М.М., Семенов Е.А., Суханов А.Н.</b> РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТА ВЕРТИКАЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ.....	<b>58</b>
<b>Градецкий В.Г., Князьков М.М., Семенов Е.А., Суханов А.Н.</b> СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТАМИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ В СЛОЖНЫХ СРЕДАХ.....	<b>61</b>
<b>Дивеев А.И., Шмалько Е.Ю.</b> К ЧИСЛЕННЫМ МЕТОДАМ СИМВОЛЬНОЙ РЕГРЕССИИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ.....	<b>63</b>
<b>Долгий Ю.Ф., Сесекин А.Н., Ташлыков О.Л., Чупин И.А.</b> ДЕКОМПОЗИЦИОННОЕ ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МЕХАНИЗМОМ ПЕРЕГРУЗКИ ТОПЛИВНЫХ СБОРОК.....	<b>66</b>

<b>Жирибок А.Н., Зуев А.В., Шумский А.Е.</b> МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ СКОЛЬЗЯЩИХ НАБЛЮДАТЕЛЕЙ ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ МЕХАТРОННЫХ ОБЪЕКТОВ .....	<b>69</b>
<b>Капустян С.Г., Гайдук А.Р., Плаксиенко В.С.</b> АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГРУППОЙ РОБОТОВ С «ВЕДУЩИМ» В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ .....	<b>72</b>
<b>Кензин М.Ю., Бычков И.В., Максимкин Н.Н.</b> КОМПЛЕКСНЫЙ МНОГОЦЕЛЕВОЙ МОНИТОРИНГ ГРУППОЙ АВТОНОМНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ .....	<b>75</b>
<b>Колесникова С.И.</b> АНАЛИТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ДИСКРЕТНОГО СТОХАСТИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ НЕЛИНЕЙНОГО ОБЪЕКТА .....	<b>78</b>
<b>Литвинов О.В., Голубев А.С., Бахшиев А.В.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ В СЛОЖНОФОРМАЛИЗУЕМЫХ ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ .....	<b>81</b>
<b>Макаров Ю.Н., Рубцов И.С., Носиков В.Б., Семёнов В.В., Юрцев Е.С., Ходжаев В.Д., Шушкевич Н.А., Бойкачёв В.Н.</b> МОДЕЛИ СЕТЕВОГО УПРАВЛЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ПРОИЗВОДСТВ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МОДУЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ РОБОТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ И ДРУГОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗИРОВАННОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ НАУЧНОГО И НАРОДНО-ХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ .....	<b>83</b>
<b>Мартынова Л.А.</b> ВЫБОР МУЛЬТИАГЕНТНОЙ АРХИТЕКТУРЫ ПРИ РАЗРАБОТКЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМ НЕОБИТАЕМЫМ ПОДВОДНЫМ АППАРАТОМ .....	<b>86</b>
<b>Морозов Ю.В.</b> УПРАВЛЕНИЕ ПЛОСКОЙ МОДЕЛЬЮ СУДНА НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ .....	<b>89</b>
<b>Муслимов Т.З., Мунасыпов Р.А.</b> ПОЛЕТ СТРОЕМ АВТОНОМНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ САМОЛЕТНОГО ТИПА НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ КОНСЕНСУСА И НЕЛИНЕЙНОГО УПРАВЛЕНИЯ .....	<b>92</b>

***Петров В.А., Глуценко А.И.***

НЕЙРОСЕТЕВАЯ НАСТРОЙКА РЕГУЛЯТОРА СКОРОСТИ ПРИ  
УПРАВЛЕНИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ НА БАЗЕ SINAMICS DCM ..... 95

***Сычѳв В.А.***

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ НА ОСНОВЕ  
РЕЗЕРВУАРНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ С ХАОТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ  
В КАЧЕСТВЕ РЕЗЕРВУАРА ..... 98

***Точилин П.А.***

ЗАДАЧА УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ С КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОЙ  
ДИНАМИКОЙ И ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯМИ ..... 101

***Федин А.П., Калинин Я.В., Марчук Е.А.***

АДАПТИВНЫЙ ПИД-ПОДОБНЫЙ НЕЧѳТКИЙ КОНТРОЛЛЕР СУГЕНО  
КАК УПРАВЛЯЮЩИЙ КОМПОНЕНТ СИСТЕМЫ ТОРМОЖЕНИЯ  
БЕСПИЛОТНОГО ЭКИПАЖА ..... 102

***Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б.***

ДВА МЕТОДА ЛОКАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ  
В СТАТИЧЕСКИХ СРЕДАХ С ПРЕПЯТСТВИЯМИ ..... 105

***Хисамутдинов М.В., Коровин Я.С., Каляев А.И., Иванов Д.Я.***

МЕТОД ОРГАНИЗАЦИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ИНТЕРФЕЙСА  
ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ СТЕРЕОЗРЕНИЯ  
РОБОТА НА ОСНОВЕ АЙТРЕКИНГА ..... 108

***Шабанов В.Б., Капустян С.Г.***

УПРАВЛЕНИЕ ГРУППАМИ ХАОТИЧЕСКИХ МИКРОРОБОТОВ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСПРЕДЕЛѳННОГО РЕЕСТРА ..... 112

## **РАЗДЕЛ 2. Применение робототехнических комплексов ..... 116**

***Абросимов Э.А., Куличенко А.Д., Можяев А.Н., Смирнова Е.Ю.***

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОРГАНИЗАЦИИ ГРУППОВОГО  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ  
ГИБРИДНЫХ ГРУПП МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ ..... 116

***Брискин Е.С., Шаронов Н.Г.***

УПРАВЛЯЕМОЕ ДВИЖЕНИЕ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ С ШАГАЮЩИМИ И  
«ШАГАЮЩЕПОДОБНЫМИ» ДВИЖИТЕЛЯМИ ..... 119

<b>Веселов Г.Е., Скляр А.А.</b> ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТРАТЕГИЙ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМИ РОБОТАМИ .....	122
<b>Годжаев З.А., Сенькевич С.Е., Кузьмин В.А.</b> ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПРОЕКТЫ ПО СОЗДАНИЮ РОБОТИЗИРОВАННЫХ МОБИЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ .....	127
<b>Губанков А.С., Юхимец Д.А.</b> РАЗРАБОТКА МЕТОДА ИДЕНТИФИКАЦИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МНОГОСТЕПЕННЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ .....	130
<b>Даринцев О.В., Мигранов А.Б.</b> СИНТЕЗ СИСТЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАДАЧ В КОЛЛЕКТИВЕ РОБОТОВ С УЧЕТОМ ОБЩНОСТИ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ .....	133
<b>Ермолов И.Л., Хрипунов С.П., Хрипунов С.С.</b> ПРОБЛЕМЫ ГРУППОВОГО ПРИМЕНЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ .....	136
<b>Жильникова Ю.Ф., Тютиков В.В.</b> АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ СИНТЕЗА СЕЛЕКТИВНО-ИНВАРИАНТНЫХ СИСТЕМ .....	138
<b>Зеленский А.А., Абдуллин Т.Х., Илюхин Ю.В., Харьков М.А.</b> СОЗДАНИЕ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ РОБОТОВ И МНОГОКООРДИНАТНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН .....	140
<b>Кацков П.А., Носков И.А., Яковлев К.С., Петров А.В.</b> АВТОМАТИЧЕСКОЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЕ МОБИЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ НА ОСНОВЕ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ .....	142
<b>Малолетов А.В., Фадеев М.Ю., Климчик А.С.</b> ДИНАМИКА ДВИЖЕНИЯ И МЕТОДЫ КОМПЕНСАЦИИ ОШИБОК ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ НЕПОЛНОПРИВОДНОГО ТРОСОВОГО РОБОТА .....	145
<b>Машошин А.И., Сергеев С.Ф.</b> ПРОБЛЕМА ИНТЕЛЛЕКТНОГО СИМБИОЗА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ РЕШЕНИЯ КОМАНДИРОМ ПОДВОДНОЙ ЛОДКИ .....	148

**Мирошкина М.В., Брискин Е.С.**

ОБ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНЫХ РЕЖИМАХ ДВИЖЕНИЯ  
ШАГАЮЩЕГО РОБОТА ПРИ ПЕРЕМЕЩЕНИИ С ПРЕОДОЛЕНИЕМ  
ПРЕПЯТСТВИЙ..... 151

**Мокаева А.А., Серебрянный В.В., Лапин Д.В.**

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТРУДА ЗА СЧЕТ  
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОЛЛАБОРАТИВНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ..... 154

**Никитин А.Д., Горбачев В.А.**

СРЕДСТВА И АЛГОРИТМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ВИЗУАЛЬНОГО ОСМОТРА  
ВОЗДУШНОГО СУДНА С ПОМОЩЬЮ ДРОНОВ..... 157

**Носков В.П., Киселев И.О.**

ТЕКСТУРИРОВАННЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ ОБЪЕКТЫ В ПОСТРОЕНИИ  
СЕМАНТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ И НАВИГАЦИИ  
АВТОНОМНЫХ РОБОТОВ..... 158

**Плавинский М.Н., Проценюк А.С., Смирнова Е.Ю.,****Половко С.А., Кавтрев С.С.**

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУТЕЙ СОЗДАНИЯ ГИПЕРИЗБЫТОЧНЫХ  
НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ..... 161

**Рудианов Н.А., Хрущев В.С.**

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ  
КОМПЛЕКСОВ НА ОСНОВЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПОДХОДА..... 164

**Трефилов П.М., Исхаков А.Ю.**

МОНИТОРИНГ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ С  
ПРИМЕНЕНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ  
И ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА..... 167

**Шурыгин В.А., Серов В.А., Ковшов И.В., Устинов С.А.**

РОБОТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ  
АВАРИЙ НА ПОДВОДНЫХ НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ..... 170

**Юхимец Д.А., Филаретов В.Ф.**

МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОГО ФОРМИРОВАНИЯ ПРОГРАММНОЙ  
СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ГРУППЫ РОБОТОВ, ДВИЖУЩИХСЯ В СТРОЮ..... 174

**Юхимец Д.А., Филаретов В.Ф.**

МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ СТРОЯ  
МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ, ДВИЖУЩИХСЯ В НЕИЗВЕСТНОЙ ОБСТАНОВКЕ..... 177

**Ющенко А.С., Инь Шуай, Швандт А.**

ДИАЛОГОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ КОЛЛАБОРАТИВНЫМИ РОБОТАМИ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДСТВ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ, НЕЙРОННЫХ  
СЕТЕЙ И ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ ..... 180

**РАЗДЕЛ 3. КОМПОНЕНТЫ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ  
КОМПЛЕКСОВ ..... 183**

**Андреева Ю.Ю., Жуков Б.А., Калинин Я.В.**

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ  
РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ  
ТЕОРИИ УПРУГОСТИ ..... 183

**Богданов Д.Р., Даринцев О.В.**

КОМПЛЕКСИРОВАННЫЙ ДАТЧИК ДЛЯ КОНТРОЛЯ ФОРМЫ ЗВЕНЬЕВ  
МАНИПУЛЯТОРА С УПРАВЛЯЕМОМ ИЗГИБОМ ..... 186

**Борейко А.А., Инзарцев А.В., Машошин А.И.,  
Павин А.М., Пашкевич И.В.**

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМИ НЕОБИТАЕМЫМИ  
ПОДВОДНЫМИ АППАРАТАМИ БОЛЬШОЙ АВТОНОМНОСТИ ..... 189

**Жога В.В., Дяшкин-Титов В.В.,  
Несмиянов И.А., Дяшкин А.В.**

ПОЛНАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ МАНИПУЛЯТОРА ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ  
СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ТРИПОДА ..... 193

**Зуев А.В., Филаретов В.Ф.**

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АККОМОДАЦИИ К ДЕФЕКТАМ В  
ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ МАНИПУЛЯТОРОВ, УСТАНОВЛЕННЫХ  
НА МОБИЛЬНЫХ РОБОТАХ ..... 196

**Калинин Я.В., Мирошкина М.В., Смирная Л.Д.**

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ, СОПРОВОЖДАЮЩИХ  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДВИЖИТЕЛЕЙ ШАГАЮЩИХ РОБОТОВ С ОПОРНОЙ  
ПОВЕРХНОСТЬЮ И ИХ УЧЕТ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ  
ЭФФЕКТИВНОСТИ ..... 199

**Корнаев А.В., Савин Л.А., Корнаев Н.В., Корнаева Е.П.**

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В  
МОДЕЛИРОВАНИИ СЛОЖНЫХ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ..... 202

**Лапин Д.В., Мокаева А.А.**

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАЗРАБОТАННОГО МЕХАНИЗМА  
ВЕРТИКАЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА НА  
МАГНИТНЫХ ГУСЕНИЧНЫХ ДВИЖИТЕЛЯХ ..... 204

**Мельканович В.С.**

УПРАВЛЕНИЕ АДАПТИВНЫМ ПОДАВЛЕНИЕМ ИМПУЛЬСНЫХ  
ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ПОМЕХ В УСЛОВИЯХ АПРИОРНОЙ  
НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИХ ПАРАМЕТРОВ ..... 208

**Савин Л.А., Корнаев А.В., Поляков Р.Н.**

МЕХАТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА РОТОРНЫХ МАШИН ..... 211

**Селин И.А.**

ОЦЕНИВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СТРАТЕГИИ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ  
ДЛЯ СОЛНЦЕМОБИЛЯ ..... 213

**Соколов С.М., Богуславский А.А., Смолин В.С., Агеев А.В.**

НЕЙРОСЕТЕВОЙ РЕГУЛЯТОР В СОСТАВЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
СФЕРИЧЕСКОГО ПРИВОДА ..... 217

**Филаретов В.Ф., Зуев А.В., Жиравок А.Н.**

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИИ  
ДЕФЕКТОВ В НАВИГАЦИОННЫХ ДАТЧИКАХ АВТОНОМНЫХ  
НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ ..... 220

**Юдинцев Б.С., Алексеев А.Ю., Даринцев О.В.**

СТРУКТУРА И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО  
СТЕНДА ДЛЯ ОТРАБОТКИ КОЛЛЕКТИВНЫХ ЗАДАЧ РОБОТАМИ ..... 223

**Авторский указатель** ..... 226

## **ВВЕДЕНИЕ**

---

Том 2 материалов XII мультиконференции по проблемам управления (МКПУ-2019) представляет доклады локальной научно-технической конференции «Робототехника и мехатроника» (РиМ-2019).

Одним из приоритетных направлений фундаментальных исследований по робототехнике и мехатронике, запланированных на локальной конференции РиМ-2019, является использование интеллектуальных технологий в робототехнических и мехатронных системах. В рамках этого приоритета на конференции будут рассмотрены следующие проблемы и задачи управления робототехническими и мехатронными комплексами:

- разработка методов адаптивного управления движением роботов и их коллективов в условиях неопределенности и существенных внешних возмущений;
- разработка методов интеллектуального анализа, управления и прогнозирования функционирования робототехнических систем;
- концепции управления автономными робототехническими и мехатронными комплексами;
- создание сенсорных систем и алгоритмов обработки информации, дающих полную и значимую картину о состоянии окружения и самой робототехнической системы;
- создание энергоэффективных схем работы для автономных робототехнических и мехатронных комплексов;
- разработка методов управления коллективами роботов (мультиагентные робототехнические системы), их надежной связи между собой, самообучение и самопрограммирование роботов.

Доклады, представленные на локальную конференцию РиМ-2019, сгруппированы по трем секциям:

- управление в робототехнических комплексах;
- применение робототехнических комплексов;
- компоненты робототехнических комплексов.

Важной особенностью данной конференции является участие в ней представителей академической науки, вузов, отраслевых разработчиков и производителей роботов.

**Программный комитет РиМ-2019**

## ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

*М.В. Андреева<sup>1</sup>, В.Е. Павловский<sup>2</sup>*

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ И МАКЕТИРОВАНИЕ РОБОПОЕЗДА (РОБОТА-ЗМЕИ)**

*<sup>1</sup>Московский автомобильно-дорожный институт  
(технический университет),*

*<sup>2</sup>Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН,  
г. Москва,  
Point15@ro.ru, vlpavl@mail.ru*

В докладе рассмотрен новый класс мобильных робототехнических устройств – многоколесные роботы, или роботы-змеи. Приведены примеры, обсуждаются механический и программный способы осуществления данного типа роботов, способы управления ими. Рассматриваются применение их в современном мире, предположения о дальнейшем развитии данного направления.

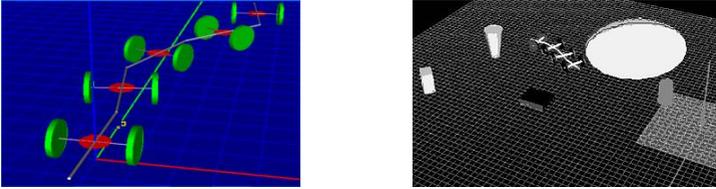
Одним из путей, позволяющих создать высокоэффективные робототехнические устройства, является копирование природных биообъектов. Такой подход позволяет решить проблемы разработки и создания мобильных роботов различного назначения, требующих новых подходов к механизмам, способным перемещаться в ограниченном пространстве со сложным рельефом, в различных экстремальных условиях (температурные ограничения, ограничения на давление, влажность и др.). В связи с этим большой интерес в настоящее время представляет создание роботов, имитирующих движение змей (рис. 1) [1 – 10]. В докладе предлагается подход к моделированию и макетированию подобного устройства (робопоезда) и с помощью многозвенного колесного аппарата.



***Рис. 1. "Корю-II" – змееподобный робот для трехмерной поверхности, лаборатория проф. Ш.Хироэ, Япония***

Важно также указать, что, например, в исследовательском центре Sintef (<https://www.sintef.no/en/> Норвегия) работают над созданием новых роботов-змей для Европейского космического агентства. Эти устройства обеспечат большой уровень мобильности и маневренности во время путешествия по Марсу по сравнению с традиционными роверами. К настоящему времени NASA отправила на Марс четыре марсохода. Эти колесные аппараты ограничены в маневренности, считают в SINTEF.

Введем компьютерную и аналитическую модели робопоезда (рис. 2).

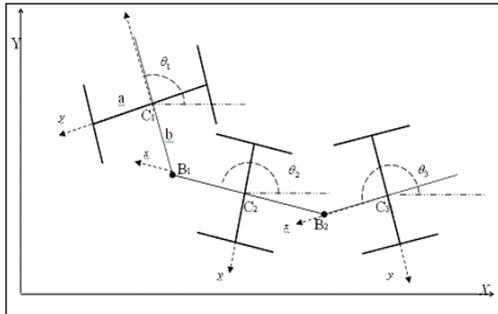


**Рис. 2. Компьютерная модель. Эпизоды моделирования**

### Уравнения движения

Можно показать, что система «робопоезд» из  $n$  тележек всегда имеет две механические степени свободы и является неголономной, добавление каждой  $n+1$  тележки добавляет в систему 5 обобщенных координат и 5 уравнений связи, два из которых являются неголономными, что сохраняет общее число степеней свободы системы, равное двум.

Параметры модели приведены на рис. 3.



**Рис. 3. Механическая модель. Проекция системы «робопоезд» на горизонтальную плоскость**

Можно далее показать, что динамические уравнения движения системы «робопоезд» могут быть записаны в виде уравнений Воронца [8]. На их основе можно строить движения и управление роботом-змей:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial T^*}{\partial \dot{\varphi}_{21}} - \frac{\partial T^*}{\partial \varphi_{21}} &= Q_9 + \sum_{k=1}^s \alpha_{k,1} \left( Q_k + \frac{\partial T^*}{\partial q_k} \right) + \sum_{k=1}^s \Theta_k \left( \sum_{j=1}^n A_{12}^{(k)} \dot{\varphi}_{11} \right) \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial T^*}{\partial \dot{\varphi}_{11}} - \frac{\partial T^*}{\partial \varphi_{11}} &= Q_{10} + \sum_{k=1}^s \alpha_{k,2} \left( Q_k + \frac{\partial T^*}{\partial q_k} \right) + \sum_{k=1}^s \Theta_k \left( \sum_{j=1}^n A_{21}^{(k)} \dot{\varphi}_{12} \right) \end{aligned} \right.$$

## Заключение

Вывод может быть сделан следующий. Технология создания робот-змей вышла на уровень практической технологии, и в настоящее время уже ясно, как такие роботы можно строить. Применение робот-змей смогут найти в задачах перемещения по сложному рельефу, задачах мониторинга, задачах информационного обеспечения миссий других мобильных роботов. На основе введенных выше моделей могут быть построены макеты робопоезда для подтверждения сказанного.

1. *Hirose, S.* Biologically Inspired Robots: Snake-like Locomotors and Manipulators / S. Hirose. – Oxford: Univ.Pres., 1993. – 220 p.
2. *Лаврентьев, М.А.* Об одном принципе создания тяговой силы для движения [Текст] / М.А. Лаврентьев, М.М. Лаврентьев // Прикладная механика и техническая физика. – 1962. – №4. – С. 3–9.
3. *Журавлев, В.Ф.* Об одной модели механизма движения змей [Текст] / В.Ф. Журавлев // Прикладная математика и механика. – 2002. – Т. 66. Вып. 4. – С. 534–538.
4. *Литвинцев, А.И.* Динамика и управление многозвенным транспортным механизмом [Текст] / А.И. Литвинцев, Е.С. Пятницкий // Автоматика и телемеханика. – 1993. – №1. – С. 141–153.
5. Электронный ресурс: <http://robotforum.ru/novosti-texnologij/robot-zmeya-ot-kompanii-biorobotics-video.html>
6. Электронный ресурс: <http://biorobotics.ri.cmu.edu/robots/index.php>
7. Электронный ресурс: [https://makezine.com/projects/nagaina-the-snake-robot/\(Nagaina\)](https://makezine.com/projects/nagaina-the-snake-robot/(Nagaina))
8. *Павловский, В.Е.* Исследование динамики движения цепочки «робопоезд»: уравнения движения, частные решения [Текст] / В.Е. Павловский, Н.В. Петровская // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. – 2005. – № 117. – 31 с.
9. *Павловский, В.Е.* Исследование динамики движения цепочки «робопоезд». Управляемое движение [Текст] / В.Е. Павловский, Н.В. Петровская, В.В. Евграфов // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. – 2005. – № 120. – 31 с.
10. *Павловский, В.Е.* Исследование динамики движения цепочки «робопоезд». Методы планирования движения [Текст] / В.Е. Павловский, Н.В. Петровская // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. – 2005. – № 121. – 31 с.

*К.Ю. Лепетухин<sup>1</sup>, Я.В. Калинин<sup>1</sup>, А.В. Малолетов<sup>1,2</sup>, Е.С. Брискин<sup>1</sup>*

## **УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ГРУППЫ СОЧЛЕНЁННЫХ РОБОТОВ В АНИЗОТРОПНОЙ И НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ\***

<sup>1</sup>*Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград,*

<sup>2</sup>*Университет Иннополис, г. Иннополис,*

*lepkon@gmail.com, jkv83@mail.ru, maloletov@gmail.com, dtm@vstu.ru*

### **Введение**

Для выполнения многих транспортных и технологических операций возникает задача объединения нескольких исполнительных машин в единую сеть. К таким задачам, например, относятся задачи перевозки крупногабаритных грузов [1] наземными транспортными средствами, буксировки плавающих средств [2] и др. Для совместной согласованной работы такой сети целесообразно применение робототехнических систем, движение которых подчиняется установленным критериям и реализуется системой управления. Особенно это актуально для робототехнических систем, предназначенных для работы в неорганизованной среде, характеризующейся своей неоднородностью, так и анизотропностью.

Примером может являться дождевальная машина кругового действия [3, 4], установленная на местности, с различными физико-механическими свойствами почвы и произвольной криволинейной границей орошаемого поля.

### **Цели и задачи**

Цель – разработка метода управления конфигурацией и движением группы сочленённых роботов.

Поставлены задачи:

- построение критериев качества на основе системы показателей, характеризующих движение группы сочленённых роботов;
- определение оптимальной конфигурации группы сочленённых роботов, как системы твердых тел, обеспечивающей: минимум энергозатрат, экстремумы других задаваемых показателей эффективности;
- экспериментальная проверка явлений и эффектов, возникающих при управляемом движении группы сочленённых роботов на лабораторной модели.

### **Методы решения общей и модельной задачи**

Рассматривается сочленённая дождевальная машина и определяется её оптимальная конфигурация по критерию минимума энергозатрат

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 18-38-00946 мол\_а).

для математической модели, в которой система дискретных шарнирно соединенных секций заменена непрерывной деформируемой кривой [4]. Используются методы вариационного исчисления.

Сформулирована система критериев оптимальности для синтеза законов управления и конструкции модернизированной дождевальной машины кругового действия [5].

Обнаружены эффекты: динамической стабилизации траектории движения подвижных опор и направления их движения, самоориентации – установка подвижной опоры в положение, перпендикулярное радиус-вектору, соединяющему неподвижный центр и точку подвеса опоры [6]; предложена конструкция подвижной опоры и ее подвеса, обеспечивающие выполнение условий для использования эффектов стабилизации и самоориентации [7].

Исследовано движение подвижных опор секций дождевальной машины с использованием системы уравнений Лагранжа с избыточными координатами и линейными неголономными связями. Для решения этой системы принято, что радиус движения подвижной опоры и угловая скорость движения дождевальной машины в целом остаются неизменными.

Использование эффектов самоустановки и самоориентации предполагает управление конфигурацией дождевальной машины за счет изменения скорости движения подвижных опор дождевальной машины.

Обнаруженный эффект подтверждается и при исследовании систем сочленённых ортогонально-поворотных движителей, образующий шагающий робот «Ортоног» [8].

Для исследования динамики движения с учетом эффектов динамической стабилизации создана математическая модель динамики, а также проведено численное моделирование движения в различных режимах.

Установлено условие устойчивости программного движения системы роботов.

### **Заключение**

1. Построена система критериев качества на основе системы показателей, характеризующих движение группы сочленённых роботов.

2. Разработаны методы определения оптимальной конфигурации группы сочленённых роботов, как системы твердых тел, обеспечивающей: минимум энергозатрат; экстремум задаваемых показателей эффективности в условиях анизотропной и неоднородной среды.

3. В модельной задаче исследованы алгоритмы управления дождевальными машинами кругового действия при обработке некруглых полей, построена динамическая модель движения дождевальной машины, показано, что они могут эффективно применяться для некруглых полей.

1. *Градецкий, В.Г.* О научных задачах выполнения транспортных операций группой мобильных роботов [Текст] / В.Г. Градецкий, И.Л. Ермолов, М.М.

- Князьков, Е.А. Семенов, С.А. Собольников, А.Н. Суханов // Робототехника и техническая кибернетика. – 2016. – №3. – С. 57–62.
2. *Брискин, Е.С.* Управление движением подводного мобильного робота с якорно-тросовыми движителями [Текст] / Е.С. Брискин, Н.Г. Шаронов, В.А. Серов, И.С. Пеньшин // Робототехника и техническая кибернетика. – 2018. – № 2 (19). – С. 39–45.
  3. Pat. US6726132 Corner Irrigation System Including an Ultra Wide Band (UWB) Guidance System / Craig S. Malsam. Valmont Industries, Inc. – 2004
  4. *Лепетухин, К.Ю.* Об оптимальном управлении взаимным расположением секций дождевальной машины кругового действия при обработке некруглых полей [Текст] / К.Ю. Лепетухин, А.В. Малолетов, Е.С. Брискин // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2017. – Т. 18, № 2. – С. 103–107.
  5. *Лепетухин, К.Ю.* О критериях оптимизации движения секций дождевальной машины кругового действия при обработке полей сложной формы [Текст] / К.Ю. Лепетухин, А.В. Малолетов, Е.С. Брискин // Известия ВолгГТУ. – 2018. – № 8 (218). – С. 117–121.
  6. *Брискин, Е.С.* Об управлении движением роботизированной многозвенной дождевальной машины для орошения полей некруглой формы [Текст] / Е.С. Брискин, К.Ю. Лепетухин, А.В. Малолетов, В.А. Серов, А.П. Кириллов // Экстремальная робототехника и конверсионные тенденции : тр. междунар. науч.-техн. конф. (г. Санкт-Петербург, 7–8 июня 2018 г.) – Санкт-Петербург, 2018. – С. 344–352.
  7. *Лепетухин, К.Ю.* Моделирование динамики и управление движением дождевальной машины кругового действия [Текст] / К.Ю. Лепетухин, А.В. Малолетов, Е.С. Брискин // Прогресс транспортных средств и систем – 2018 : материалы междунар. науч.-практ. конф. (г. Волгоград, 9–11 октября 2018 г.). – 2018. – С. 135–136.
  8. On Energetically Effective Modes of Walking Robots Movement [Электронный ресурс] / Е.С. Брискин, Я.В. Калинин, А.В. Малолетов // ROMANSY 22 – Robot Design, Dynamics and Control : Proceedings of the 22nd CISM IFToMM Symposium (June 25-28, 2018, Rennes, France) / editors: V. Arakelian, P. Wenger. – Cham : Springer Nature Switzerland AG, 2019. – P. 425–432. – URL : [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-78963-7\\_53](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-78963-7_53). – (Book Ser. CISM International Centre for Mechanical Sciences (Courses and Lectures) ; Vol. 584).

*Е.Н. Семашкин*

## ВСЕПОГОДНОСТЬ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ И РАДИОЛОКАЦИОННЫХ КАНАЛОВ УПРАВЛЕНИЯ

*АО «Конструкторское бюро приборостроения  
им. академика А.Г. Шипунова», г. Тула,  
kbbkdr@tula.net*

На основе эмпирических законов распределения температуры и относительной влажности воздуха для различных метеопунктов разра-

ботан метод моделирования закона распределения дальности метеовидимости, позволивший, с добавлением к нему алгоритмов моделирования туманов, осадков и облачного покрова, оценивать частности видимости объектов на различные дальности телевизионными, тепловизионными приборами и радиолокаторами

Под показателем всепогодности тепловизионных и радиолокационных каналов управления понимаем функцию

$$P_n = \frac{\sum_{i=1}^m n(L \geq L^*)}{K}, \quad (1)$$

где  $n(L \geq L^*)$  – число случаев (часов в году), когда дальность обнаружения была не меньше  $L^*$ ;

$K = 8760$  – число розыгрышей метеобстановки, равное числу часов в году.

Оценки по зависимости (1) предполагают наличие монтекарловской программы, имитирующей погодные состояния и определяющей прозрачность трассы пеленгации объекта наблюдения (рис. 1). Особенности работы подобного алгоритма изложены в монографиях [1], [2]. Главным ядром программы является блок имитации взаимосвязанных компонент погоды «температура  $t$  – относительная влажность воздуха  $w$ » с последующим определением закона распределения дальности метеовидимости  $S_M$  и количества водяного пара в атмосфере.

В качестве тепловизионных каналов рассмотрены новейшие матричные приборы третьего поколения смотрящего типа с высоким разрешением 640 x 512 элементов. Характеристики этих приборов приведены далее.

Таблица 1

**Параметры тепловизоров**

Параметр Тип тепловизора	Диапазон длин волн, мкм	Диаметр входного зрачка объектива, мм	Размеры элементов по строке и кадру, мкм	Удельная обнаружительная способность ФПУ, см·Гц <sup>1/2</sup> ·Вт <sup>-1</sup>	Угловое поле зрения узкопольного канала по горизонтالي и вертикали, град
		Фокусное расстояние, мм			
MATIS-AP	3 – 5	$\frac{130}{530}$	20x20	$4,3 \cdot 10^{11}$	1,3x 0,9
Длинноволновый тепловизор	8 – 12	$\frac{200}{530}$	20x20	$1,1 \cdot 10^{11}$	1,3x 0,9



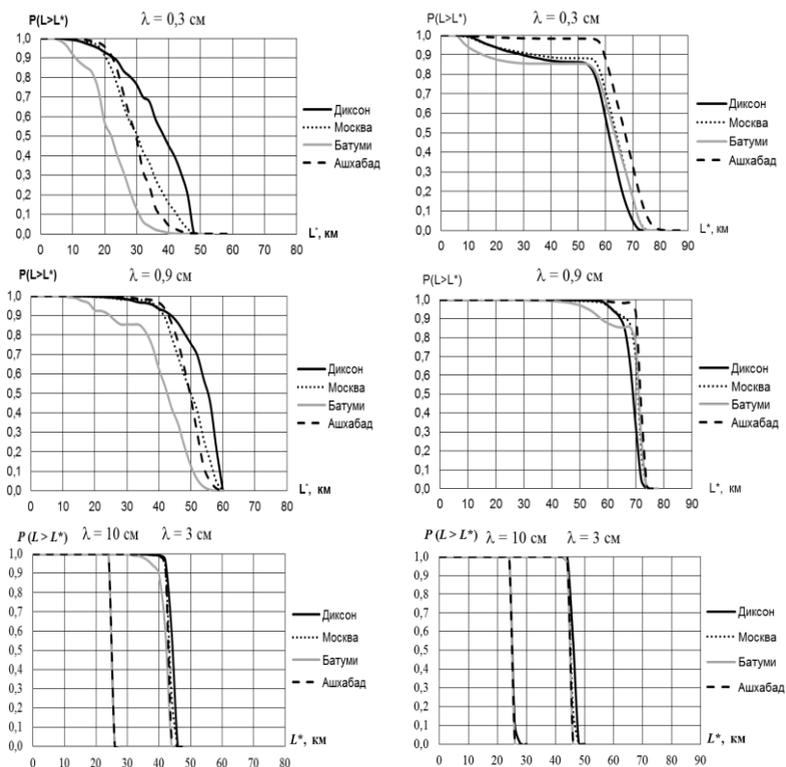
**Рис. 1. Алгоритм вычисления оптических показателей погодных явлений**

Что лучше: узкая диаграмма направленности и высокий энергетический потенциал у миллиметровых локаторов при более сильном ослаблении в атмосфере или наоборот – свободное прохождение в атмосфере, но широкая диаграмма направленности у сантиметровых локаторов?

В вакууме (табл. 2) ответ очевиден, но в атмосфере наилучшие показатели у локатора с длиной волны  $\lambda = 9 \text{ мм}$ . Только в Батуми, где выпадает почти 3000 мм осадков в год, он немного уступает локатору с  $\lambda = 3 \text{ см}$  (рис. 2). Наклон трассы под углом  $45^\circ$  к горизонту для 3- и 10-сантиметровых мало что меняет, но для миллиметровых (3 и 9 мм) увеличивается дальность действия и всепогодность. Кривые «соединяются» в узкий жгут, так как уменьшается длина дождевых трасс.

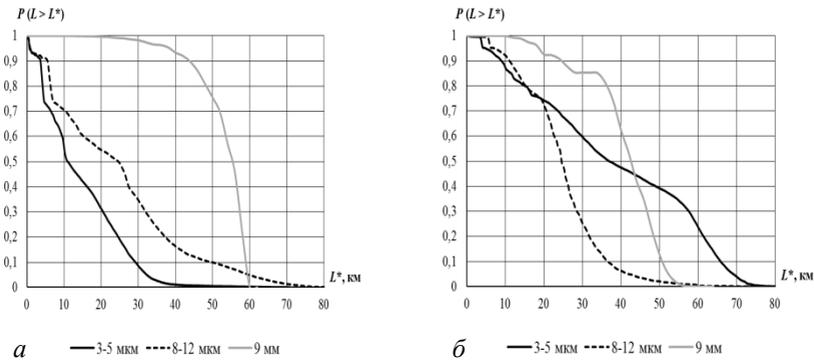
### Параметры модельных РЛС

№ п/п	Частота излучения	Длина волны, мм	Энергия импульса, Дж	Эффективная площадь антенны, м <sup>2</sup>	Дальность обнаружения цели с ЭПР = 1 м <sup>2</sup> в вакууме	Комплексные показатели преломления воды для радиоволн (по данным [12])
1	0,1 ТГц	3	0,6	1,0	144,2	$3,41 - 1,94 \cdot i$
2	33 ГГц	9	0,6	1,0	83,2	$5,55 - 2,85 \cdot i$
3	10 ГГц	30	0,6	1,0	46,5	$8,81 - 1,96 \cdot i$
4	3 ГГц	100	0,6	1,0	24,9	$8,90 - 0,69 \cdot i$



**Рис. 2.** Всепогодность РЛС с длинами волн  $\lambda = 0,3$  см,  $\lambda = 0,9$  см,  $\lambda = 3$  см и  $\lambda = 10$  см (указаны на графике) в функции дальности для горизонтальных трасс (левый столбец) и для угла наклона трассы к горизонту  $45^\circ$  (правый столбец), ЭПР=1 м<sup>2</sup>

Большой интерес представляет сопоставление всепогодностей тепловизоров и локаторов. Задача эта непростая, так как требует точной увязки излучательной способности объекта в ИК-области с его эквивалентной площадью рассеивания (ЭПР) в радиообласти. К тому же сопоставлять их можно только на горизонтальных приземных трассах, свободных от облаков. Наиболее корректно это можно сделать при наблюдении ракеты «Томагавк», движущейся на наблюдателя. Характерные графики изображены на рис. 3. В холодных зонах преимущество локатора очень существенно, а вот в тёплых зонах, в особенности – с большим количеством дождей (Батуми), ситуация выравнивается, и даже появляются ситуации, когда тепловизор обнаруживает цель дальше локатора. Отчасти это объясняется тем, что интенсивность сигнала локатора падает пропорционально  $\theta^{2L}/L^4$ , тогда как до тепловизора он доходит, ослабляясь пропорционально  $\theta^L/L^4$  (где  $\theta$  – прозрачность 1 км атмосферной трассы,  $L$  – дальность обнаружения).



**Рис. 3. Всепогодность тепловизоров с длинами волн 3 – 5 и 8 – 12 мкм и локатора с  $\lambda = 9$  мм в функции дальности для горизонтальных трасс для Диксона (а) и Батуми (б). ЭПР = 1 м<sup>2</sup>**

1. Шипунов, А.Г. Дальность действия, всеуточность и всепогодность телевизионных и тепловизионных приборов наблюдения [Текст]: монография / А.Г. Шипунов, Е.Н. Семашкин. – Москва: Машиностроение, 2011. – 218 с.
2. Шипунов, А.Г. Всепогодность радиолокационных и тепловизионных каналов наведения комплексов ПВО [Текст] / А.Г. Шипунов, Е.Н. Семашкин. – Москва: Машиностроение, 2013. – 280 с.

## **ФОТОНИКА И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ В СЕНСОРИКЕ, ОБРАБОТКЕ ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИИ**

*Самарский университет, г. Самара,  
soifer@ssau.ru*

### **Оптическая микроманипуляция**

Использование дифракционных оптических элементов в оптическом микроманипулировании позволяет решить задачу оптического вращения микромеханических устройств. Так, пучки Бесселя успешно перемещают по круговой траектории группу сферических микрообъектов.

При вращении относительно тяжелой микротурбины использование пучков Бесселя нежелательно, так как высокая концентрация мощности в основном кольце пучка приводит к разрушению микротурбины, для успешного вращения микротурбины необходимо распределить мощность излучения на всю ее площадь, для этого используется суперпозиция из нескольких вихревых пучков. Рассмотрено движение микротурбины диаметром 100 мкм при вращении суперпозиций вихревых пучков.

### **Дифракционный объектив**

Коллективом Института систем обработки изображений (ИСОИ) РАН получены прорывные результаты в создании однолинзовых дифракционных объективов с последующей реконструкцией полученных изображений. В 2015 г. опубликованы первые в мире результаты по получению цветных изображений высокого разрешения при помощи четырехуровневой дифракционной линзы. Методы реконструкции на основе обратной свертки, примененные в этой работе, показали, что использование дифракционной оптики для получения изображений возможно, однако качество существенно уступает рефракционным линзам. Совершенствование оптической компоненты и методов реконструкции позволило перейти к 256-уровневым гармоническим линзам с восстановлением изображений на основе сверточных нейронных сетей глубокого обучения. Методы нейросетевой реконструкции изображений значительно превосходят методы на основе обратной свертки по качеству.

Разработанная технология имеет широкий спектр практического применения в системах технического зрения для малых космических аппаратов, БПЛА и систем видеонаблюдения. Технология позволяет получить новое сочетание разрешения и стоимости системы, а для ряда задач получить принципиально недостижимые ранее результаты. Так,

становится возможной установка длиннофокусных объективов на малые БПЛА, грузоподъемности которых недостаточно для установки длиннофокусных рефракционных объективов.

Классические длиннофокусные системы обеспечивают высокое разрешение при малом угле обзора, тогда как широкофокусные системы обеспечивают широкий угол обзора при малом разрешении. Проблему необходимости компромисса между углом обзора и разрешением системы позволяет решить многоапертурный подход. Разработанная технология позволяет создавать новый класс сверхлегких и простых в производстве многоапертурных систем, применимых в том числе и для малых БПЛА.

### **Компактные гиперспектрометры**

В 2015 г. в ИСОИ РАН был создан маломассогабаритный гиперспектрометр на основе схемы Оффнера. Этот гиперспектрометр был разработан как замена прибору, установленному на космическом аппарате Ресурс П. Использование нестандартного дисперсионного элемента в виде дифракционной решетки на выпуклой поверхности позволило добиться хороших результатов. При схожих характеристиках по пространственному и спектральному разрешению прибор имеет в десятки раз меньший вес и энергопотребление.

Дальнейшее совершенствование конструкции гиперспектрометров основывалось на использовании дифракционных оптических элементов со сложной структурой, микрорельеф таких элементов состоит из микрорельефов дифракционной линзы и дифракционной решетки. Такие элементы могут выполнять сразу две функции в спектральном приборе: формировать изображение и осуществлять разложение в спектр.

Такой дифракционный оптический элемент позволяет предельно минимизировать массогабаритные характеристики гиперспектрометра, сохраняя при этом хорошее пространственное и спектральное разрешение.

Габариты и масса прибора на основе этого элемента позволяют создать гиперспектрометр для мобильных устройств, в том числе мобильных телефонов.

### **Реализация дифференциальных и интегральных операторов**

Оптические устройства и компоненты фотоники, реализующие различные дифференциальные и интегральные операторы, рассматриваются как новая элементная база для аналоговых электронно-оптических вычислительных систем. Интегральные фотонные схемы позволят преодолеть фундаментальные физические ограничения, связанные с традиционными интегральными схемами на основе полупроводников. Такие схемы, в частности, позволят решать научные задачи,

описываемые дифференциальными уравнениями, на 5 – 6 порядков быстрее, чем это происходит сейчас с применением электронных вычислительных устройств. По оценкам автора, время «оптического решения» дифференциального уравнения составляет  $\sim 100$  фс.

В докладе рассмотрено выполнение операций временного дифференцирования и интегрирования оптических импульсов с помощью резонансных структур нанопотоники: резонансных дифракционных решеток и систем однородных слоев – решеток Брэгга. Коэффициент отражения или пропускания дифракционной структуры в окрестности резонанса позволяет с высокой точностью аппроксимировать передаточную функцию дифференцирующего или интегрирующего фильтра. Для аналогового решения дифференциальных уравнений в докладе рассмотрены интегральные структуры на основе системы кольцевых резонаторов. В результате прохождения оптического сигнала через каскад кольцевых резонаторов огибающая оптического импульса принимает вид, совпадающий с решением дифференциального уравнения заданного порядка.

Для эффективного решения задач обработки изображений требуются структуры нанопотоники, осуществляющие заданные пространственные преобразования оптического сигнала. В связи с этим в докладе рассмотрена оптическая реализация операций «пространственного дифференцирования» и вычисления оператора Лапласа по пространственным координатам с использованием брэгговских решёток с «дефектом». Рассмотренные структуры перспективны для оптической обработки изображений.

### **Фотоника «на чипе»**

В настоящее время ведущие компании-производители вычислительной техники активно развивают технологии «кремниевой нанопотоники», ориентированные на создание вычислительных систем нового поколения. В данных технологиях предполагается использовать в качестве информационного носителя световые волны вместо электрических сигналов. В конце 2015 г. был создан первый прототип однокристально-го электронно-оптического микропроцессора.

В докладе рассмотрены интегральные спектральные фильтры и спектрометры на чипе. В частности, предложена простая конфигурация спектрометра, интегрированного в двумерный волноводный слой. Представленные результаты моделирования показывают высокие рабочие характеристики предложенного фильтра, позволяющего эффективно управлять положением полосы пропускания за счет изменения расстояния между выемками.

# РАЗДЕЛ 1

## УПРАВЛЕНИЕ В РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ

*О.К. Акмаев, Р.Г. Кудояров, Р.А. Мунасыпов, С.И. Фецак*

### СТАНОК-РОБОТ С АДАПТИВНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

*Уфимский государственный авиационный технический университет,  
г. Уфа,  
format\_invest@mail.ru*

Создание ракетно-космической и транспортной техники нового поколения связано с разработкой и применением энергетических установок с повышенной энергоэффективностью на базе гибридных силовых установок летательных аппаратов нового поколения. Инновацией в данной области являются гибридные энергетические установки на базе газотурбинных двигателей (ГТД), электрических двигателей и двигателей внутреннего сгорания (ДВС), а также технология их изготовления с использованием интеллектуального проектирования и управления технологическими и производственными процессами.

Поверхность деталей ГТД, например, моноколеса, является фасонной, поэтому при создании траектории формообразования необходимо применение многокоординатных (3 – 5 осевых) мехатронных станков. Повышенные требования к производительности и качеству обрабатываемой поверхности обуславливают важность вопроса подбора оптимальных режимов и стратегий обработки. Внедрение высокоскоростной обработки деталей в машиностроительное производство с целью повышения производительности вследствие увеличения скорости резания при обработке приводит к более сложным упругим деформациям станочной системы и отражается на размерной точности обработки, стойкости режущего инструмента и характере его износа.

Для преодоления вышеуказанных проблем перспективно использование обрабатывающего оборудования нового поколения – станков-роботов. В рамках Госзадания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 0.712.2014/К) разработан и изготовлен оригинальный станок-робот на принципах параллельной кинематической структуры [1]. Отличительной его особенностью является то, что шпиндельный узел "висит" на трех парах штанг постоянной длины, расположенных в вертикальной плоскости, образуя параллелограммы, что повышает как крутильную, так и изгибную жесткость станка, что способствует повы-

шению производительности и точности обработки. На рис. 1 представлен общий вид опытного образца станка-робота, включающего трехосевой параллельный модуль, обеспечивающий инструменту три поступательных степени свободы, и глобусный стол (на рис. 1 не показан), обеспечивающий две вращательные степени свободы.



- Размеры рабочего поля,  $\Phi 260 \times 300$  мм
- Частота вращения шпинделя,  $24000 \text{ мин}^{-1}$
- Скорость рабочей подачи, 15 м/мин
- Скорость холостого хода, 30 м/мин
- Ускорение перемещ. инстр.  $10 \text{ м/с}^2$
- Площадь, занимаемая станком,  $2,5 \times 2,25$  м
- Высота станка, 1,9 м
- Масса станка, 3200 кг

***Рис. 1. Станок-робот, разработанный ФГБОУ ВО УГАТУ***

Однако применение разработанного станка-робота требует создания новых адаптивных алгоритмов управления, которые не только управляют технологическими перемещениями, но и компенсируют возникающие при этом упругие перемещения, обусловленные силами резания, а также обеспечивают устойчивость работы и качество обрабатываемого изделия [2].

Процесс обработки сложнопрофильных деталей ГТД и ДВС в силу их конструктивных особенностей накладывает дополнительные жесткие требования к системе управления станка-робота как по диапазонам перемещений, так и по прикладываемым усилиям на рабочий инструмент.

Требуемая траектория перемещения исполнительного органа (шпиндельная бабка) задается согласованным перемещением кареток, на которых смонтированы опоры штанг, связанных со шпиндельной бабкой. То есть для поддержания требуемой подачи  $S$  используется три привода, которые перемещают инструмент по декартовым координатам.

Таким образом, особенностью системы управления станка-робота по аналогии с промышленными роботами, накладывающей дополнительные сложности на процесс управления по сравнению с традиционными порталными конструкциями станков, является необходимость

перемещения обрабатывающего инструмента в трехмерном пространстве, что требует решения следующих задач.

1. Планирование положений. Необходимо совместить зоны обслуживания станка-робота с рабочим пространством, в котором технологическая операция выполняется таким образом, чтобы рабочий инструмент мог быть доставлен в любое требуемое положение с необходимой ориентацией.

2. Планирование движений. Необходимо выбрать траекторию движения объекта или рабочего инструмента. При этом не только траектория движения, но также законы изменения скоростей и ускорений должны соответствовать требованиям технологического процесса обработки лопаток, с учетом возможностей станка-робота.

3. Планирование усилий. Требования технологического процесса должны быть согласованы с возможностями станка-робота – развивать необходимые скорости, силы и моменты в различных точках рабочего пространства.

4. Анализ динамической точности. Решение перечисленных задач может потребовать учета динамики станка-робота, так как точность движения по траекториям зависит от развиваемых скоростей и ускорений. Кроме того, программирование станка-робота без учета его динамики может приводить к появлению эффекта перекрестных связей вследствие взаимного динамического влияния на движение штанг станка-робота.

Решение вышеуказанных задач основывается на методах решения прямой и обратной задач кинематики и динамики. Как уже указывалось ранее, в процессе резания возникают вибрации, которые воздействуют на привод главного движения и шпиндельную платформу. Для контроля и компенсации их влияния в систему управления дополнительно введены три датчика вибрации, блок адаптивного управления и блок контроля и диагностики. Блок адаптивного управления на основе сигналов с датчиков вибрации вырабатывает сигналы, корректирующие параметры системы управления. Блок контроля и диагностики проводит постоянный мониторинг уровня вибрации в элементах станка-робота, и, в случае превышения допустимых показателей, сигнализирует о наличии неисправности. Кроме того, блок контроля и диагностики контролирует состояние привода главного движения, потребляемую мощность и частоту вращения.

1. Компоновка многоцелевого станка на основе принципов параллельной кинематики: пат. РФ № 2542878 / О. К. Акмаев, Б. А. Еникеев, А. Ф. Юсупов; опубл. 27.02.2015, Бюл. № 6. – 8 с.
2. *Фецак, С.И.* Предпосылки создания системы адаптивного управления роботом-станком [Текст] / С.И. Фецак, Ю.В.Идрисова, Р.А. Мунасыпов // Десятая всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2017): материалы 10-й Всероссийской мультиконференции: в 3 т. / отв. ред. И.А. Каляев. – 2017. – Т.2. – С. 181–183.

## ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ТРАЕКТОРИЙ В ЗАДАЧЕ ПРЕСЛЕДОВАНИЯ

<sup>1</sup>Московский автомобильно-дорожный институт  
(технический университет),

<sup>2</sup>Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва,  
Point15@ro.ru, vlpavl@mail.ru

В двумерной и трёхмерной постановках рассмотрено обобщение задачи преследования, когда преследуемый объект движется по окружности (плоский случай) или по винтовой линии (трёхмерный случай), рассмотрены различные случаи зависимости скоростей объектов в задаче. Аналитически получены условия устойчивости траекторий движения объектов в задаче. Возможная реализация рассмотренной задачи – преследование дроном другого летательного объекта.

Траектория объекта-преследователя в системе координат, вращающейся вокруг начала координат с угловой скоростью  $\omega = \frac{V_0}{R_0}$  объекта-цели, является решением автономной системы дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \dot{x} = \frac{V_0}{R_0} y + V \frac{R_0 - x}{\sqrt{(R_0 - x)^2 + y^2}} \\ \dot{y} = -\frac{V_0}{R_0} x - V \frac{y}{\sqrt{(R_0 - x)^2 + y^2}} \end{cases} \quad (1)$$

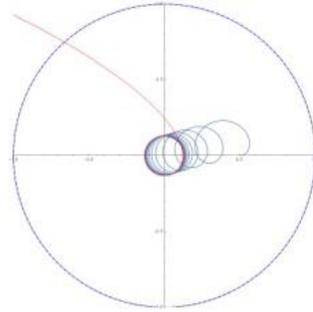
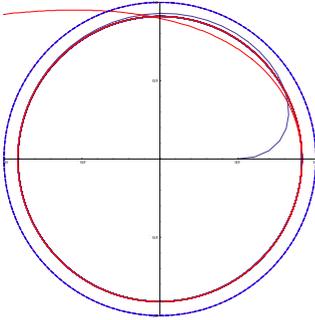
Существуют две естественные постановки задачи:

Первая постановка: скорость объекта-преследователя зависит от расстояния до начала координат:  $V = f(\sqrt{x^2 + y^2}) = f(r)$ .

Вторая постановка: скорость объекта-преследователя зависит от расстояния до объекта – цели:  $V = f(\sqrt{(R_0 - x)^2 + y^2})$ .

Для обеих постановок были найдены матрицы линейных частей системы (1) в особых точках, для первой постановки найдены собственные числа матрицы линейной части системы в особых точках, найдены условия, в которых достигается устойчивое и неустойчивое положение равновесия. Для второй постановки в связи с затруднительностью выражения условий устойчивости в явном виде через функцию зависимости скорости от расстояния до цели были приведены на конкретных примерах подтверждения, в каких случаях траектория движения будет устойчива (рис. 1), а в каких нет (рис. 2) (от каких параметров и насколько это зависит).

$$\begin{aligned} x'(t) &= \frac{(-x + \cos(t)) \left( \frac{1}{2} + \sqrt{(-x + \cos(t))^2 + (-y + \sin(t))^2} \right)}{\sqrt{(-x + \cos(t))^2 + (-y + \sin(t))^2}}, \\ y'(t) &= \frac{(-y + \sin(t)) \left( \frac{1}{2} + \sqrt{(-x + \cos(t))^2 + (-y + \sin(t))^2} \right)}{\sqrt{(-x + \cos(t))^2 + (-y + \sin(t))^2}}. \end{aligned}$$

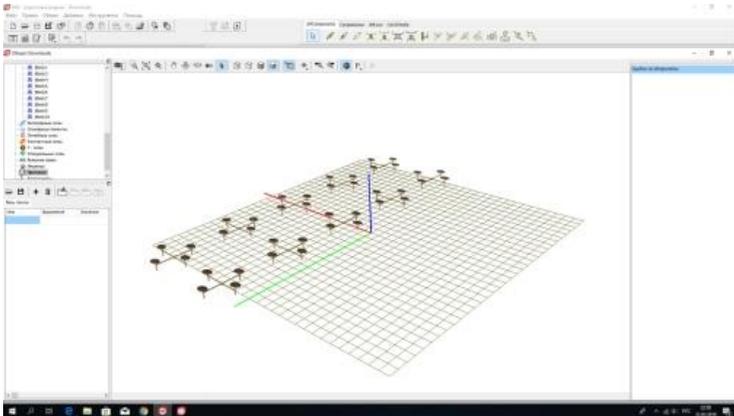


**Рис. 1. Устойчивая траектория**    **Рис. 2. Неустойчивая траектория**

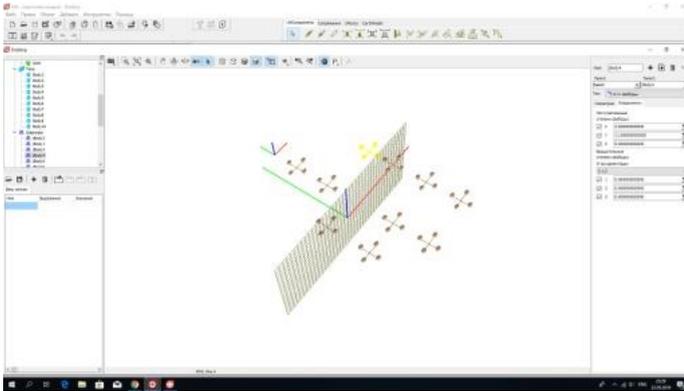
Было проверено утверждение, что если траектория цели не содержит отрезки прямой, то расстояние между точками  $P(t)$  различных траекторий преследователя уменьшается с увеличением времени  $t$ .

В пакете «Универсальный механизм» ведётся моделирование движения группы из 10 дронов с расположением в два ряда по 5 штук в каждом (рис. 3).

Проверяется возможность управления группой дронов с движением по восходящей винтовой траектории, их поведение в случае постановки задачи, как задачи преследования (1 дрон является лидером и группа из 9 дронов, расположенная по 3 дрона в 3 ряда) с условием бесконечного преследования.



**Рис. 3. Расположение 10 дронов**



**Рис. 4. Окончание моделирования движения (подъём, движение по окружности, приземление)**

### Заключение

При определенных условиях, накладываемых как на траекторию объекта-преследователя, так и объект цели, можем получить как устойчивую траекторию, так и неустойчивую. Использование пакета Wolfram Mathematica показывает, что поведение численных решений систем дифференциальных уравнений движения соответствует приведенному ранее следующему свойству решений: траектории преследователя с разными начальными данными при  $t=0$  сближаются при увеличении  $t$ . В программном комплексе «Универсальный механизм» моделируются различные траектории движения группы дронов, проверяется устойчивость траекторий движения для группы дронов для дальнейших экспериментов с квадрокоптерами в реальных условиях.

1. Савелов, А.А. Плоские кривые. Систематика, свойства, применения (справочное руководство) [Текст] / А.А. Савелов. – Москва: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1960. – 293 с.
2. Амелькин, В.В. Дифференциальные уравнения в приложениях [Текст] / В.В. Амелькин. – Москва: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1987. – 160 с.
3. Паньков, С.Я. Теория и методика управления авиацией [Текст]: учебное пособие / С.Я. Паньков: в 2 ч. – Ульяновск: УВАУ ГА, 2006. – 190 с.
4. Трошин, П.И. Компьютерная геометрия и геометрическое моделирование (задачи) [Текст]: учебно-методическое пособие / П.И. Трошин. – Казань: Казанский федеральный университет, 2015. – 55 с.
5. Электронный ресурс: <http://www.hsu.edu/academicforum/2006-2007/2006-7AFPursuit.pdf>

## **РАЗРАБОТКА РОБАСТНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОКАНАЛЬНЫМ МЕХАТРОННЫМ ОБЪЕКТОМ НА ОСНОВЕ ГРАМИАННОГО ПОДХОДА**

*Ивановский государственный энергетический университет, г. Иваново,  
anis-2012@yandex.ru*

В настоящее время роботы-манипуляторы широко применяются на машиностроительных предприятиях, где выполняются операции сварки, окраски, смены заготовок на станках и другие. К системам автоматического управления (САУ) промышленными роботами предъявляются жесткие требования, выполнение которых осложняется нелинейным характером объекта, взаимным влиянием каналов управления, а также изменением параметров в процессе движения [1].

Большинство САУ роботами-манипуляторами строятся по принципу декомпозиции объекта на отдельные звенья и синтеза локальных регуляторов методами модального управления. Однако при таком подходе не учитывается взаимное влияние каналов управления звеньями, что приводит к ухудшению качества переходных процессов при одновременном движении по нескольким координатам.

В то же время синтез централизованной САУ роботоманипулятором, с учетом взаимного влияния звеньев методами модального или оптимального управления осложняется проблемой робастности, поскольку параметры объекта в процессе движения меняются в широких пределах, а сама линеаризованная в рабочей точке модель, очевидно, является приближенной.

В данной работе предлагается методика синтеза робастной САУ роботоманипулятором, основанная на линеаризации модели объекта, коррекции системных свойств в направлении повышения управляемости грамианным методом [2] и разработке централизованного регулятора состояния методом модального управления.

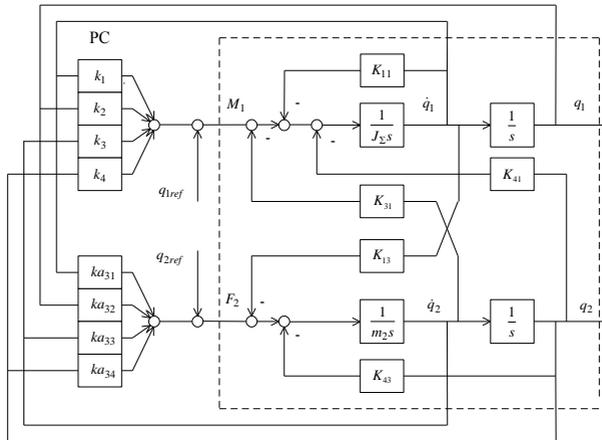
Рассмотрим предлагаемую методику на примере САУ двухзвенным роботоманипулятором, динамические свойства которого описываются системой нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} J_1 + J_2 + m_2(q_2 - l_2 + p_2)^2 \ddot{q}_2 + 2m_2(q_2 - l_2 + p_2) \dot{q}_2 \dot{q}_1 = M_1 \\ m_2 \ddot{q}_2 - m_2(q_2 - l_2 + p_2) \dot{q}_1^2 = F_2 \end{cases}$$

где  $J_1$  и  $J_2$  – моменты инерции 1-го и 2-го звена;  $m_2$  – масса 2-го звена;  $q_1$  и  $\dot{q}_1$  – угловое положение и скорость 1-го звена;  $q_2$ ,  $\dot{q}_2$  и  $\ddot{q}_2$  – положение, скорость и ускорение 2-го звена;  $l_2$  и  $p_2$  – длина и положение

центра тяжести 2-го звена;  $M_1$  – вращательный момент привода 1-го звена;  $F_2$  – силовое воздействие привода 2-го звена.

Значения параметров объекта  $J_1 = 0,3 \text{ Н м}^2$ ;  $l_2 = 1,14 \text{ м}$ ;  $p_2 = 0,7 \text{ м}$ ; основные параметры 2-го звена носят интервальный характер:  $J_2 = 1,2 \pm 0,1 \text{ Н м}^2$ ;  $m_2 = 22,8 \pm 10,0 \text{ кг}$ . Система управления должна обеспечивать аperiодический характер переходного процесса по выходной координате при длительности переходного процесса не более 0,6 с.



**Рис.1. Структурная схема системы управления роботом-манипулятором с PC**

Линеаризованная модель данного объекта приведена на рис. 1, соответствующее векторно-матричное описание в координатах состояния  $\mathbf{x} = [\dot{q}_1, q_1, \dot{q}_2, q_2]$  при управлении  $\mathbf{U} = [M_1 \ F_2]$  и выходе  $y = q_2$  имеет вид

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{U} ;$$

$$y = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x} ,$$

где  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{C}$  – матрицы состояния, входа и выхода объекта с размерностями  $4 \times 4$ ,  $4 \times 2$ ,  $1 \times 4$ .

Поскольку значения координат при движении робота меняются, оптимальные величины коэффициентов линеаризации  $K_{11} = 5,517$ ;  $K_{31} = 8,025$ ;  $K_{41} = 3,21$ ;  $K_{43} = 2,334$  были получены путем идентификации линейной модели при  $\dot{q}_1 = 0,32 \text{ рад/с}$ ,  $\dot{q}_2 = 0,22 \text{ м/с}$  и  $q_2 = 0,55 \text{ м}$ .

В соответствии с методикой синтеза робастной САУ, представим объект управления в одноканальной форме, приняв вход 1-го звена в качестве управляющего, а вход 2-го звена используем для коррекции системных свойств объекта:  $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{B}_1 u_1 + \mathbf{B}_2 u_2$ , где  $\mathbf{B}_1$  и  $\mathbf{B}_2$  – столб-

цы матрицы  $\mathbf{B} = [\mathbf{B}_1 \ \mathbf{B}_2]$ ;  $u_2 = \mathbf{E}\mathbf{A}'\mathbf{x}$  – сигнал корректирующего устройства;  $\mathbf{A}'$  – матрица корректирующих связей;  $\mathbf{E} = [0 \ 0 \ 1 \ 0]$  – двоичная матрица;  $u_2 = \mathbf{K} \cdot \mathbf{x}$  – управляющее воздействие основного регулятора состояния (РС).

Реализуемая средствами комплекса MatLab процедура вычисления грамиана управляемости для рассматриваемого объекта *gram* с последующим сингулярным разложением *svd* дает следующие результаты:

$$\hat{\Sigma}_c = \text{diag} [9,5557 \cdot 10^{-4} \ 3,8414 \cdot 10^{-5} \ 5,6844 \cdot 10^{-7} \ 1,8335 \cdot 10^{-8}].$$

Относительно малые значения 3-го и 4-го сингулярных чисел грамиана свидетельствуют о тенденции объекта к потере управляемости.

Применение предложенного ранее итерационного метода [2] дает новое распределение сингулярных чисел грамиана управляемости объекта, позволяющее решить задачу синтеза робастной системы с регулятором состояния:

$$\hat{\Sigma}_c = \text{diag} [9,587 \cdot 10^{-4} \ 3,8348 \cdot 10^{-5} \ 1,8617 \cdot 10^{-7} \ 3,0585 \cdot 10^{-8}].$$

Желаемое распределение сингулярных чисел грамиана управляемости достигается путем коррекции 3-й строки матрицы состояния объекта  $\mathbf{A}^* = \mathbf{A} - \mathbf{A}'$ , физически реализуемой введением в структуру САУ дополнительного регулятора (рис. 1) с параметрами:

$$ka_{31} = -2,323 \cdot 10^{-2}; ka_{32} = 5,9080; ka_{33} = -3,7378; ka_{34} = -1,973 \cdot 10^{-2}.$$

Для скорректированного таким образом объекта с матрицами состояния  $\mathbf{A}^*$  и входа  $\mathbf{B}_1$  методом модального управления синтезируется робастная система с регулятором состояния.

Синтез основного РС был проведен на основе желаемого характеристического полинома Ньютона  $D(s) = (s - \Omega_o)^4$  при заданном значении  $\Omega_o = 10,5$  рад/с по линейной модели скорректированного объекта:  $\mathbf{K} = [-5,0964 \cdot 10^1 \ -4,6772 \cdot 10^2 \ -1,3162 \cdot 10^2 \ -1,3561 \cdot 10^3]$ .

Как показывает анализ переходных характеристик, полученных путем моделирования САУ роботом-манипулятором с учетом его нелинейных свойств, при вариации параметров  $J_2$  и  $m_2$  в заданных пределах синтезированная система обеспечивает апериодический характер переходного процесса при длительности не более 0,6 с.

1. Вукобратович, М. Неадаптивное и адаптивное управление манипуляционными роботами / М. Вукобратович, Д. Стокич, Н. Кирчински: пер. с англ. – Москва: Мир, 1989. – 376 с.
2. Анисимов, А.А. Итерационный метод структурно-параметрического синтеза робастных систем с регуляторами состояния / А.А. Анисимов, С.В. Тарарькин // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2018. – №4. – С. 42–56.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИГАТЕЛЯ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ РАСХОДОМ ТОПЛИВА\*

МИРЭА–Российский технологический университет, г. Москва,  
guryanova@mirea.ru

### Введение

Современные транспортные комплексы\средства, в том числе и большегрузные автомобили (БГА), немислимы без достаточно развитой бортовой информационно-управляющей системы (БИУС) [1]. Одной из важнейших задач БИУС является задача обеспечения энергоэффективности функционирования всего транспортного комплекса (ТК). Поэтому актуальна задача управления силовыми агрегатами БГА с учетом текущих условий и режимов движения ТК, с минимальными затратами топлива.

Двигатель может быть представлен как совокупность основных подсистем – впускного коллектора, впрыска топлива, преобразования процесса горения в крутящий момент, динамики вращательного движения. В работе ставится задача по совмещению моделей этих подсистем и модели двигателя БГА в форме многопараметровой характеристики.

### Математические модели подсистем двигателя

Привод коленчатого вала двигателя (КВД) переводит в крутящий момент давление, создаваемое в цилиндропоршневой группе. Допускаем, что КВД является жёстким, движущиеся поршни, соединённые со стержнем КВД, маховиком и первичным валом сцепления, описаны моментом инерции  $J_{eng}$ . Тогда динамику вращательного движения можно представить так:

$$\omega_e = \frac{1}{J_{eng}} \int \sum_{i=1}^n M_n dt, \quad (1)$$

где  $\omega_e$  – частота вращения КВД двигателя,  $M_n$  – крутящие моменты элементов двигателя,  $J_{eng}$  – момент инерции двигателя.

Подсистема впускного коллектора и подсистема рециркуляции выхлопных газов может быть выражена в виде следующих уравнений:

$$\begin{cases} \dot{m}_{ao} = \dot{m}_{ai} + \frac{P_a \cdot V \cdot M}{R \cdot T^2} - \frac{V \cdot M}{R \cdot T^2} \\ \dot{m}_{egro} = \dot{m}_{egri} + \frac{(P - P_a) \cdot V \cdot M_{egr}}{R \cdot T^2} \cdot \dot{M} - \frac{V \cdot M_{egr}}{R \cdot T} \cdot (\dot{P} - \dot{P}_a) \end{cases}, \quad (2)$$

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 17-08-00516).

где  $\dot{m}_{ao}$  – массовый расход топлива внутри впускного коллектора (кг/с),  $\dot{m}_{ai}$  – массовый расход топлива, поступающий из дроссельной заслонки (кг/с),  $\dot{m}_{egro}$  – массовый расход выхлопных газов, поступающих во впускной коллектор (кг/с),  $\dot{m}_{egri}$  – массовый расход топливно-воздушной смеси, поступающей из впускного коллектора (кг/с),  $V$  – объём коллектора ( $\text{л}^3$ ),  $\dot{P}_a$  – парциальное давление воздуха во впускном коллекторе,  $\dot{P}$  – давление во впускном коллекторе,  $M, M_a, M_{egr}$  – молекулярная масса смеси, воздуха, выхлопных газов соответственно (кг/моль),  $T$  – температура внутри коллектора (К),  $\bar{R}$  – универсальная газовая постоянная (Дж/моль · К).

Взаимосвязь между командой на подачу топлива и топливно-воздушной массой характеризуется задержками из-за дискретного характера процесса впуска. В описании этого процесса участвует такой параметр, как фракция впрыскиваемого топлива [2]:

$$\gamma = \begin{cases} 1, & \text{если } \Phi_{PW} \leq \Phi_{IVC} - \Phi_{SOI} \\ \frac{\Phi_{IVC} - \Phi_{SOI}}{\Phi_{PW}}, & \text{если } \Phi_{PW} > \Phi_{IVC} - \Phi_{SOI} \end{cases}, \quad (3)$$

где  $\Phi_{SOI}$  – угол поворота в начале впрыска,  $\Phi_{IVC}$  – угол поворота КВД при закрытии впускного клапана,  $\Phi_{PW}$  – ширина импульса инжектора.

Для описания механики жидкости и газа в системе впрыска топлива используется следующее уравнение:

$$\dot{m}_{f0} = \dot{m}_{ff2} + \dot{m}_{ff3} + \dot{m}_{fs1}, \quad (4)$$

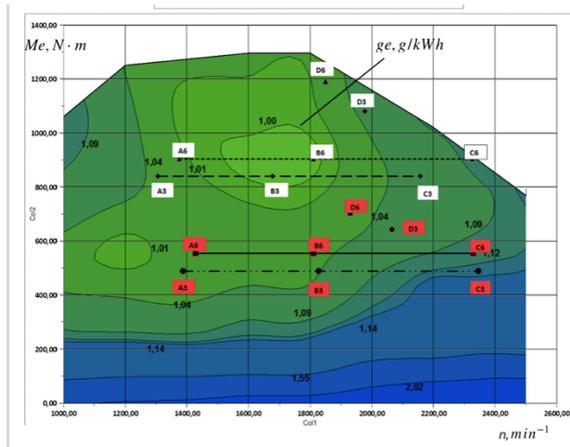
где  $\dot{m}_{f0}$  – массовый расход топлива в цилиндре (кг/с),  $\dot{m}_{ff2}$  – массовый расход топлива после закрытия впускного клапана,  $\dot{m}_{ff3}$  – массовый расход топлива до закрытия впускного клапана,  $\dot{m}_{fs1}$  – массовый расход топлива при обтекании стен цилиндра потоком жидкости.

В подсистеме горение топлива в цилиндрах преобразовывается в индикаторную мощность  $N_{ind}$  или индикаторный крутящий момент  $M_{ind}$ . Многопараметровая характеристика (МПХ) двигателя [3] отражает КПД двигателя. С помощью этой характеристики можно найти расход топлива. Модель по нахождению расхода топлива при известном удельном расходе топлива  $g_e$  описана в работе [4]. Связь суммарной мощности сопротивления  $N_e$  и величины эффективного давления приведена в зависимости.

$$N_{ei} = \frac{V_p \cdot P_{ei} \cdot n}{900}, \quad (5)$$

где  $V_p$  – рабочий объём двигателя ( $\text{л}^3$ ),  $P_{ei}$  – эффективное давление (кгс/см<sup>2</sup>),  $n$  – частота вращения КВД (об/мин)

На рис. 1 отражены совмещенные МПХ и нагрузки автомобиля при различных алгоритмах управления.



**Рис. 1. Совмещённая МПХ дизельного двигателя и нагрузка на него со стороны БГА при различных алгоритмах управления**

Минимальный расход топлива сосредоточен в центре поверхности МПХ. Чем ближе расположена к этой области нагрузка со стороны БГА, тем эффективнее с точки зрения затрат топлива будет его движение. Например, в точках В3 и В6 расход топлива будет минимальным. Обсуждаются результаты математического моделирования.

1. Асанов, А.З. Архитектура бортовых информационно-управляющих систем, роботизированных большегрузных магистральных автомобилей [Текст] / А.З. Асанов // Российский технологический журнал. – 2018. – №3. – Режим доступа: <https://rtj.mirea.ru/journal-archive/2017/volume-5-no-3/> (дата обращения: 28.04.2019 г.).
2. Iserman, Engine Modeling and Control. Modeling and electronic Management of Inertial Combustion Engines. / Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. – P. 646.
3. Карбачев, В.С. Влияние характеристик двигателя на параметры скоростных свойств и топливной экономичности автомобиля [Текст] / Д.Х. Валеев, В.С. Карбачев // Грузовик. –2001. –№6. – С.15–19.
4. Ван, Е.В. Разработка математической модели двигателя внутреннего сгорания для грузового автомобиля [Текст] / Е.В. Ван, Е.О. Гурьянова // VIII Камские чтения: всероссийская научно-практическая конференция. – Набережные Челны: Издательско-полиграфический центр Набережночелнинского института КФУ, 2016. – С. 58–60.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЧЕТКОГО ЦИФРОВОГО ФИЛЬТРА ДЛЯ РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА В СРЕДЕ SIMULINK

Юго-Западный государственный университет, г. Курск,  
fregat\_mn@rambler.ru, marinok-1@yandex.ru

### Постановка задачи

Цифровые фильтры применяются для стабилизации работы устройства, подавления сторонних шумов, а также устранения ложных показаний с датчиков [1]. Эффективным является применение цифровых фильтров в системах управления роботами-манипуляторами для стабилизации перемещения их звеньев. В данной работе рассматривается разработка нечеткого цифрового фильтра в среде Simulink.

### Модель нечеткого цифрового фильтра в среде Simulink

Устройство робота-манипулятора имеет четыре звена: платформа основания, левое и правое плечи, захват. На каждом звене закреплен сервопривод. Каждый сервопривод приводится в движение поворотом ручки соответствующего потенциометра (рис. 1). Осуществляется это следующим образом.

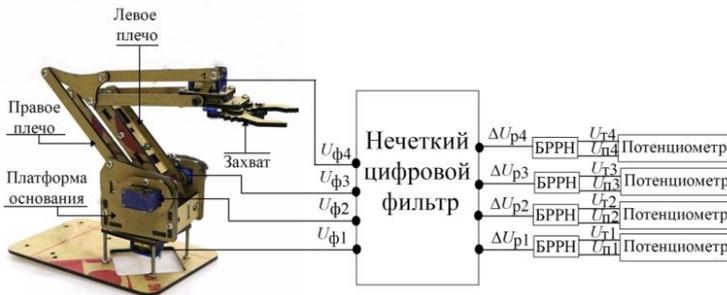


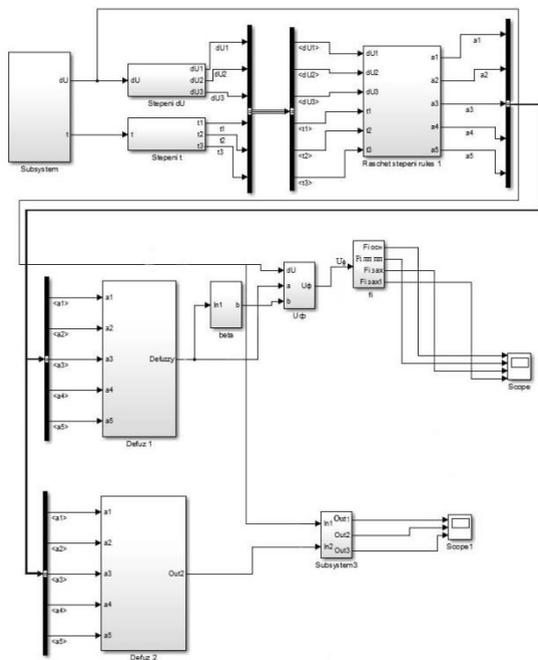
Рис. 1. Устройство робота-манипулятора

От потенциометров в блок расчета разности напряжений поступают по два сигнала, где по формуле 1 находится их разность:

$$\Delta U_p = U_t - U_n, \quad (1)$$

где  $U_t$  – текущее значение напряжения,  $U_n$  – предыдущее значение напряжения. Полученная разность поступает на вход нечеткого цифрового фильтра.

Модель устройства нечеткого цифрового фильтра для робота-манипулятора, разработанная в среде Simulink, представлена на рис. 2.



**Рис. 2. Модель нечеткого цифрового фильтра в среде Simulink**

В блоке «Subsystem» формируются две входные переменные:  $\Delta U$  – разность между текущим и предыдущим значениями напряжений и  $t$  – время поворота звеньев робота-манипулятора. Далее сигналы входных переменных поступают в блоки «Stepeni  $dU$ » и «Stepeni  $t$ », в которых рассчитываются степени истинности входных переменных и формируются по шесть сигналов  $\Delta U_1$ ,  $\Delta U_2$ ,  $\Delta U_3$ ,  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ . Полученные сигналы поступают в блок «Raschet stepeni rules 1», где с помощью операций минимума и максимума формируются девять нечетких правил управления, затем в этом же блоке рассчитываются значения коэффициента регулирования  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ ,  $\alpha_4$ ,  $\alpha_5$  [2]. В блоке «Defuz 1» рассчитывается четкое  $\alpha$  с помощью упрощенного метода дефазификации по формуле:

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^{n=5} \alpha_i \cdot M_i}{\sum_{i=1}^{n=5} \alpha_i} = \frac{\alpha_1 \cdot M_1 + \alpha_2 \cdot M_2 + \alpha_3 \cdot M_3 + \alpha_4 \cdot M_4 + \alpha_5 \cdot M_5}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_5}, \quad (2)$$

Сигнал  $\alpha$  поступает в блок «beta», где находится второй коэффициент регулирования по формуле:

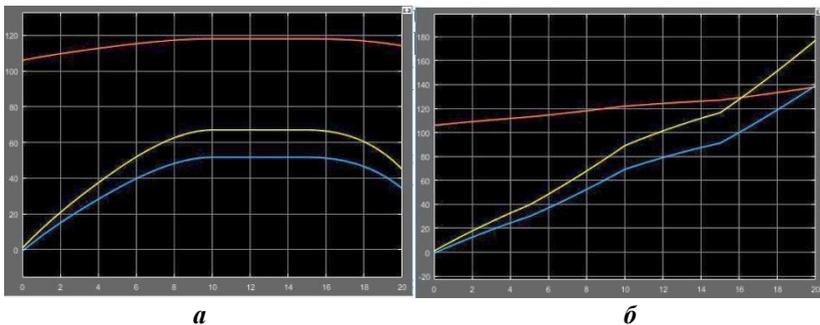
$$\beta = 1 - \alpha. \quad (3)$$

В блоке находится выходное напряжение:

$$U_{\phi} = \alpha \cdot U_{\Pi} + \beta \cdot U_{T}. \quad (4)$$

В блоке «Defuz 2» находится выходное напряжение по методу разности площадей.

**Эксперимент.** В качестве эксперимента проводилось сравнение результатов работы нечеткого цифрового фильтра на основе разных методов дефаззификации. На рис. 3,а представлен график переходного процесса для четырех звеньев робота-манипулятора на основе упрощенного метода дефаззификации, а на рис. 3,б на основе метода разности площадей [3].



**Рис. 3** Графики переходного процесса для четырех звеньев робота-манипулятора: а) упрощенный метод дефаззификации; б) метод разности площадей

На основании графиков делается вывод о том, что второй метод дефаззификации эффективнее. Таким образом, осуществляется моделирование нечеткого цифрового фильтра в системе Simulink.

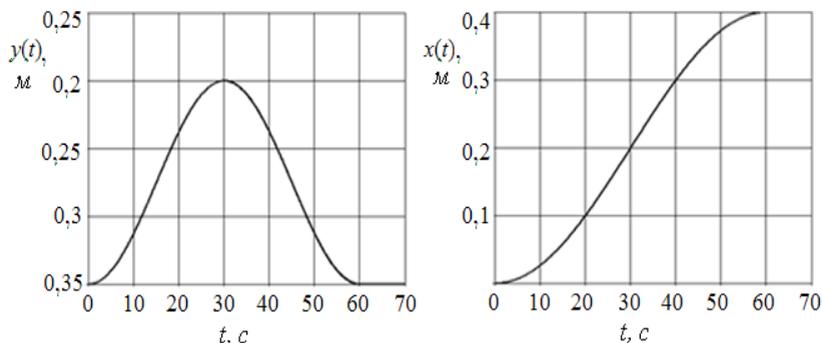
1. *Бобырь, М.В.* Нечеткий цифровой фильтр для управления роботом-манипулятором ARMino [Текст] / М.В. Бобырь, М.Ю. Лунева, К.С.А. Ноливос // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2019. – Т. 40, №4. – С. 244–250.
2. *Бобырь, М.В.* Нечеткая эргатическая система управления охлаждением изделий [Текст] / М.В. Бобырь, А.А. Нассер, М.А. Абдулджаббар // Десятая всероссийская мультikonференция по проблемам управления (МКПУ-2017): материалы 10-й Всероссийской мультikonференции. – Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 2017. – С. 115–117.
3. *Bobur, M.V.* A method of defuzzification based on the approach of areas ratio [Текст] / M.V. Bobur, N.A. Milostnaya, S.A. Kulabuhov // Applied soft computing, 2017. – Т. 59. – С. 19–32.

## О СИНТЕЗЕ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ЯКОРНО-ТРОСОВОГО ДВИЖИТЕЛЯ ПРИ ПЕРЕМЕЩЕНИИ ПО ЗАДАННОЙ ТРАЕКТОРИИ\*

*Волгоградский государственный технический  
университет, г. Волгоград,  
Центр технологий компонентов робототехники  
и мехатроники, г. Иннополис,  
dtm@vstu.ru*

### Постановка задачи

При движении робототехнического комплекса, оснащенного якорно-тросовым движителем [1 – 3], например, при движении подводной робототизированной платформы [4], перенос якоря в единичном цикле движителя может осуществляться по различным траекториям. Задачей системы управления электроприводами якорно-тросового движителя при этом является обеспечение перемещения якоря в соответствии с заданными законом изменения координатами  $y(t)$ ,  $x(t)$  (рис. 1).



**Рис. 1. Изменение координат заданной траектории во времени**

### Определение параметров движения

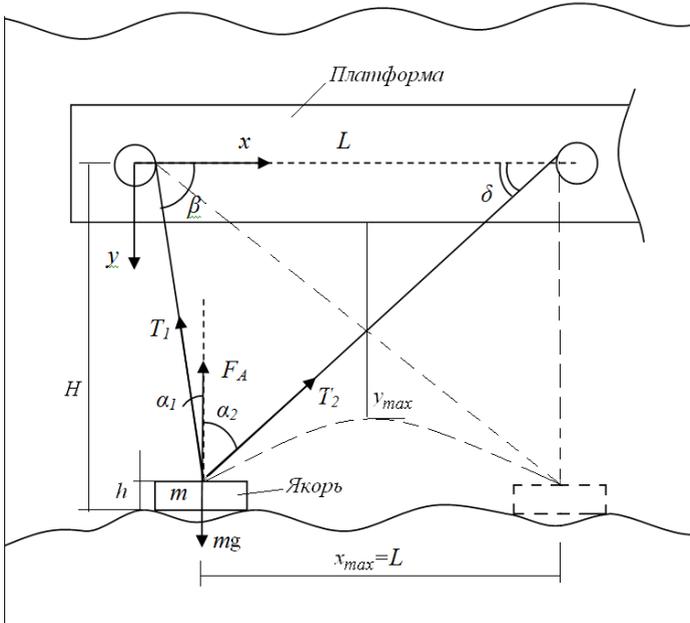
Определение параметров движения якорно-тросового движителя для единичного цикла переноса произведено на основе расчетной схемы, представленной на рис. 2.

Система уравнений, описывающих движение якоря объемом  $V$ , имеет вид

\* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФН № 18-71-10069.

$$\begin{cases} m\ddot{y} = mg - T_1 \cos \alpha_1 - T_2 \cos \alpha_2 - \rho g V \\ m\ddot{x} = T_2 \sin \alpha_2 - T_1 \sin \alpha_1 \end{cases}$$

и позволяет определить усилия в тросах для каждой точки траектории, а также моменты  $M = TR$  для электродвигателей, обеспечивающих такие усилия ( $R$  – радиус маховиков движителя).



**Рис. 2. Расчетная схема определения параметров движения якоря**

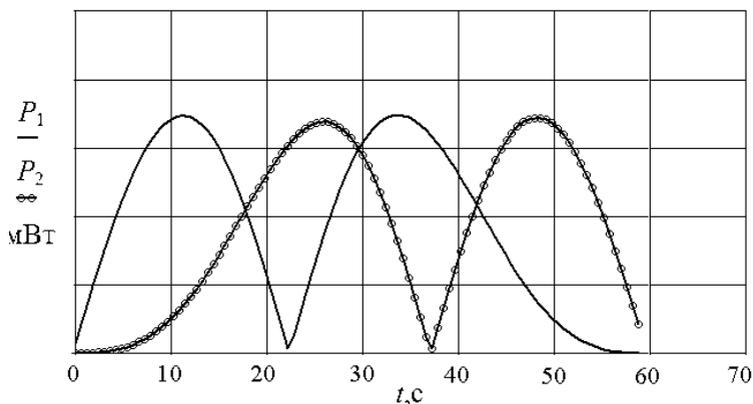
Определение энергозатрат движителя на перемещение якоря по заданной траектории определяется как суммарная мощность обоих электроприводов за весь единичный цикл движения:

$$A = \int_0^{\tau} P_1(t) dt + \int_0^{\tau} P_2(t) dt,$$

где  $\tau$  – время переноса якоря из начальной точки траектории в конечную.

Получены законы изменения во времени управляющих воздействий для электроприводов движителя – напряжений якоря при использовании двигателей постоянного тока или частоты коммутации обмоток при использовании шагового двигателя.

На рис. 3 представлена зависимость изменения мощностей электроприводов при реализации закона перемещения якоря, соответствующего рис. 1.



**Рис. 3. Изменение мощностей электроприводов 1 и 2**

В результате получены законы изменения управляющих воздействий для электроприводов якорно-тросового движителя при перемещении якоря по заданной траектории.

1. Mathematical Modelling of Mobile Robot Motion with Propulsion Device of Discrete Interacting with the Support Surface / E.S. Briskin et al. // MATHMOD 2018 / Wien (Austria), 2018. – P. 259–264.
2. Брискин, Е.С. Управление движением подводного мобильного робота с якорно-тросовыми движителями [Текст] / Е.С. Брискин, Н.Г. Шаронов, В.А. Серов, И.С. Пеньшин // Робототехника и техническая кибернетика. – №2(19). – Санкт-Петербург: ЦНИИ РТК. – 2018. – С. 39–45.
3. Брискин, Е.С. Определение усилий в движителях якорно-тросового типа [Текст] / Е.С. Брискин, И.С. Пеньшин, Л.Д. Смирная, Н.Г. Шаронов // Известия ВолГГТУ. Сер. Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. – 2017. – № 14 (209). – С. 87–90.
4. Серов, В.А. Задачи технологических роботизированных шагающих платформ при освоении подводных (подлёдных) месторождений полезных ископаемых [Текст] / В.А. Серов, И.В. Ковшов, С.А. Устинов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 9 (194). – С. 181–191.

## КИНЕМАТИЧЕСКИЙ И ДИНАМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРОМ ПАРАЛЛЕЛЬНО-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ

<sup>1</sup>*Волгоградский государственный аграрный университет,*

<sup>2</sup>*Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград,*

*Центр технологий компонентов робототехники и мехатроники,*

*Университет Иннополис, г. Иннополис,*

*vgssa@mail.ru, viczhoga@gmail.com*

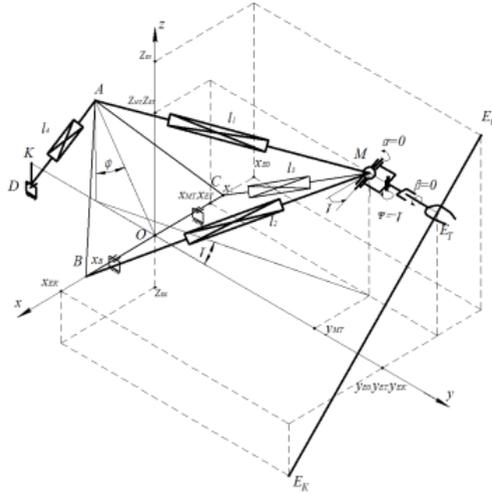
Разработка алгоритмов управления роботами-манипуляторами параллельно-последовательной структуры является актуальной проблемой в задачах динамического манипулирования.

К наиболее важным задачам при разработке манипуляторов параллельно-последовательной структуры относится создание методов синтеза алгоритмов программных перемещений исполнительных механизмов, обеспечивающих реализацию требуемых траекторий и законов движения рабочего органа манипулятора, и позиционирование объекта манипулирования в трехмерном пространстве. Рассматривается манипулятор параллельно-последовательной структуры (рис. 1) с семью управляемыми степенями свободы. Жесткость конструкции обеспечивает пирамида, составленная из трех активных звеньев переменной длины  $AM$ ,  $BM$ ,  $CM$ , а дополнительную маневренность и манипулятивность – исполнительное звено  $AD$  и манипулятор последовательной структуры с тремя управляемыми степенями свободы.

Для определения пространственного положения манипулятора и рабочего органа захвата вводятся пять систем координат. Абсолютная система  $Oxyz$  (рис. 1) и подвижные системы координат  $O_jx_jy_jz_j$  ( $j = 1 \div 4$ ). Конструкция манипулятора обеспечивает голономные связи между длинами исполнительных звеньев, координатами  $x_M(t)$ ,  $y_M(t)$ ,  $z_M(t)$  точки  $M$  и углом поворота  $\varphi$  основания  $ABC$ . В качестве обобщенных координат принимаются параметры  $q_1 = \varphi$ ,  $q_2 = \gamma$ ,  $q_3 = x_M$ ,  $q_4 = y_M$ ,  $q_5 = z_M$ , которые описывают конфигурацию манипулятора – трипода с поворотным основанием. Координаты  $q_6 = \alpha$ ,  $q_7 = \psi$ ,  $q_8 = \beta$  описывают состояние трехзвенного захватного устройства. Уравнения Лагранжа второго рода в явной форме записываются в виде

$$\sum_{k=1}^8 A_{sk} \ddot{q}_k + \sum_{k=1}^8 \sum_{m=1}^8 [k, m, s] \cdot \dot{q}_k \dot{q}_m = Q_s + \lambda \frac{\partial f(q_s)}{\partial q_s} - \frac{\partial \Pi}{\partial q_s}, \quad (1)$$

где  $Q_s$  – обобщенная сила, соответствующая  $S$  координате;  $-\partial\Pi/\partial q_s$  – обобщенная сила потенциальных активных сил, соответствующая  $s$  координате;  $\lambda$  – множитель Лагранжа;  $[k, m, s]$  – символы Кристоффеля первого рода.



*Рис. 1. Расчетная схема манипулятора-трипода на поворотном основании с трехступенным захватным устройством*

**Кинематический синтез** программных перемещений исполнительных цилиндров манипулятора последовательно-параллельной структуры, обеспечивающих реализацию требуемых траекторий рабочего органа манипулятора, основывается на интерполяции конечным набором сплайнов третьего и четвертого порядка заданных законов перемещения характерной точки рабочего органа манипулятора (рис. 1)  $E[x_E(t), y_E(t), z_E(t)]$  и его направляющих косинусов  $a_{pq}(t)$ . Находятся значения координат  $x_E(t), y_E(t), z_E(t)$  точки  $E$  рабочего органа захвата и направляющих косинусов  $a_{pq}(t)$  в момент времени  $t_i = i \cdot \Delta\tau$ ,  $i = 0, 1, 2, 3, \dots, n$ . Определяется конфигурация  $l_k(t_i)$ , ( $k = 1 \div 4$ ) манипулятора в каждой точке траектории рабочего органа решением оптимизационной задачи из условия минимума критерия обобщенной энергии [1]. Зная значения обобщенных координат в моменты времени  $t_i$ , на каждом отрезке проводится интерполяция конечным набором сплайнов третьего и четвер-

того порядка [2] т. е. находятся полиномы, выражающие обобщенную координату как функцию времени.

**Динамический синтез.** Для определения законов формирования управляющих сил  $F_i(t)$  и моментов  $T_\psi(t), T_\alpha(t), T_\beta(t)$ , обеспечивающих перемещение рабочего органа по программной траектории, используется математическая модель динамики манипулятора (1), из которых находим явные зависимости управляющих усилий и моментов от обобщенных координат их скоростей и ускорений. Подставляя выражения для заданных законов изменения обобщенных координат, получаем законы изменения программных управляющих усилий. Однако из-за инерционности механизмов передачи движений исполнительных звеньев, фактическая траектория  $x_E(t), y_E(t), z_E(t)$  может отличаться от заданной  $x_E^{pr}(t), y_E^{pr}(t), z_E^{pr}(t)$ . Алгоритм формирования управляющих усилий исполнительных приводов манипулятора в зависимости от обобщенных координат формируем из условия, чтобы ускорения обобщенных координат определялись выражениями

$$\ddot{q}_i = \ddot{q}_i^{pr}(t) + b_{i1}\Delta\dot{q}_i(t) + b_{i2}\Delta q_i(t) = 0, \quad (2)$$

где  $b_{i1}, b_{i2}$  – постоянные положительные коэффициенты;

$\Delta q_i(t) = q_i^{pr}(t) - q_i(t)$  – отклонения текущих значений обобщенных координат от программных.

После подстановки (2) в выражения управляющих сил и моментов находятся искомые законы формирования управляющих усилий и моментов по текущим значениям обобщенных координат и их скоростей. Алгоритмы формирования управляющих напряжений, поступающих на входы электродвигателей исполнительных приводов манипулятора, находятся с учетом динамической характеристики электродвигателей. Приводятся результаты решения для прямолинейного поступательного перемещения рабочего органа манипулятора с заданной ориентацией в пространстве.

1. *Жога, В.В.* Задача позиционирования манипулятора параллельно-последовательной структуры с управляемым захватным устройством [Текст] / В.В. Жога, В.В. Дяшкин-Титов, И.А. Несмиянов, Н.С. Воробьева // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – Т. 17, № 8. – С. 525–530.
2. *Воробьева, Н.С.* Отслеживание приводами манипулятора параллельно-последовательной структуры программных перемещений рабочего органа [Текст] / Н.С. Воробьева, В.В. Жога, И.А. Несмиянов // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2019. – № 2. – С. 154–165.

**ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА  
МАКСИМАЛЬНОЙ СТЕПЕНИ УСТОЙЧИВОСТИ  
ДЛЯ СИСТЕМЫ С ИНТЕРВАЛЬНЫМ  
ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИМ ПОЛИНОМОМ\***

*Национальный исследовательский Томский политехнический  
университет, г. Томск,  
saga@tpu.ru*

**Введение**

В системах автоматического управления (САУ) параметры объекта управления могут изменяться в известных и достаточно широких интервалах. В условиях такой интервальной неопределенности параметров представляет интерес задача обеспечения максимального быстродействия САУ. Известно, что быстродействие системы определяется степенью устойчивости. Поэтому, согласно [1 – 4], для синтеза системы целесообразно применить критерий максимальной степени устойчивости. В [5] разработана методика определения параметров регулятора, обеспечивающих максимальную степень устойчивости стационарной системы. Представляет интерес модификация этой методики для интервальных систем, характеристические полиномы которых имеют интервальные коэффициенты. Подобные полиномы получили название интервальных характеристических полиномов (ИХП). Очевидно, что при изменении коэффициентов ИХП изменяется и степень устойчивости системы. Для определения минимальной степени устойчивости системы с ИХП воспользуемся следующими двумя положениями. Во-первых, она имеет место в одной из вершин многогранника интервальных коэффициентов [6]. Во-вторых, для нахождения этой вершины достаточно рассмотреть только определенный набор проверочных вершин [7]. Таким образом, поставленную выше задачу предлагается решать, как максиминную: определение робастных настроек линейного регулятора, при которых достигается максимум минимальной степени устойчивости системы в проверочных вершинах многогранника коэффициентов ИХП.

**Максимизация степени устойчивости системы  
с интервальным характеристическим полиномом**

Если объект управления содержит интервальные параметры, то характеристический полином системы может быть записан в виде

---

\* Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-58-00045 Бел\_а).

$$D(s, k) = \sum_{i=0}^n [d_i^{\mathbf{r}}(k)] \cdot s^i, \quad (1)$$

где  $k$  – вектор параметров регулятора. Интервальные коэффициенты полинома образуют многогранник  $P_d$  с числом вершин  $V = 2^{n+1}$ .

Система с интервальной неопределенностью коэффициентов характеристического полинома имеет минимальную степень устойчивости в одной из проверочных вершин  $P_d$ , определяемых в [7]. Для систем низкого порядка координаты таких вершин приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Координаты проверочных вершин**

Степень ИХП	Координаты проверочных вершин
$n = 2$	$V_1 = \overline{d_0} \overline{d_1} \overline{d_2}$ ; $V_2 = \underline{d_0} \underline{d_1} \overline{d_2}$ ; $V_3 = \underline{d_0} \overline{d_1} \underline{d_2}$
$n = 3$	$V_1 = \overline{d_0} \overline{d_1} \overline{d_2} \overline{d_3}$ ; $V_2 = \underline{d_0} \overline{d_1} \underline{d_2} \overline{d_3}$ ; $V_3 = \overline{d_0} \underline{d_1} \overline{d_2} \underline{d_3}$ ; $V_4 = \underline{d_0} \underline{d_1} \underline{d_2} \overline{d_3}$
$n = 4$	$V_1 = \overline{d_0} \overline{d_1} \overline{d_2} \overline{d_3} \overline{d_4}$ ; $V_2 = \underline{d_0} \overline{d_1} \underline{d_2} \overline{d_3} \overline{d_4}$ ; $V_3 = \overline{d_0} \underline{d_1} \overline{d_2} \underline{d_3} \overline{d_4}$ ; $V_4 = \underline{d_0} \underline{d_1} \overline{d_2} \overline{d_3} \underline{d_4}$ ; $V_5 = \overline{d_0} \overline{d_1} \underline{d_2} \underline{d_3} \overline{d_4}$ ; $V_6 = \underline{d_0} \underline{d_1} \underline{d_2} \overline{d_3} \overline{d_4}$ ; $V_7 = \overline{d_0} \underline{d_1} \underline{d_2} \overline{d_3} \underline{d_4}$ ; $V_8 = \underline{d_0} \underline{d_1} \overline{d_2} \overline{d_3} \underline{d_4}$ ; $V_9 = \underline{d_0} \overline{d_1} \underline{d_2} \overline{d_3} \overline{d_4}$

Подставим в (1)  $s = \alpha + j\beta$  и на основании [5] составим системы уравнений для определения максимальных значений минимальной степени устойчивости в проверочных вершинах многогранника  $P_d$

$$\begin{cases} \operatorname{Re} D_v(\alpha, \beta, k) = 0; \operatorname{Im} D_v(\alpha, \beta, k) = 0; \\ \partial \operatorname{Re} D_v(\alpha, \beta, k) / \partial \alpha = 0; \partial \operatorname{Im} D_v(\alpha, \beta, k) / \partial \alpha = 0; \\ \text{L} \\ \partial^m \operatorname{Re} D_v(\alpha, \beta, k) / \partial \alpha^m = 0; \partial^m \operatorname{Im} D_v(\alpha, \beta, k) / \partial \alpha^m = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Количество уравнений системы (2) определяется числом искоемых переменных, которыми являются  $\alpha, \beta$  и параметры регулятора. Решив систему (2)  $V$  раз, получим  $V$  наборов значений параметров регулятора и соответствующие этим наборам значения  $\alpha_{v \max}$  максимальной степени устойчивости системы в каждой из вершин. Из этих данных необходимо выбрать вершину  $q$ ,  $q \in 1, V$  с наименьшей максимальной степенью

устойчивости  $\alpha_{q \min}$  и полученные для нее значения параметров регулятора  $k = k^*$ .

Далее при  $k = k^*$  следует во всех остальных вершинах найти степени устойчивости  $\alpha_v(k^*)$ ,  $v = \overline{1, V}$ ,  $v \neq q$  и сравнить их с  $\alpha_{q \min}$ . Если  $\alpha_v(k^*) > \alpha_{q \min}$ , то задача решена. Если же в какой-то из вершин  $\alpha_v(k^*) < \alpha_{q \min}$ , то необходимо продолжить исследования и составить систему вида (2) для всех пар проверочных вершин многогранника  $P_d$ . Так, например, при двух параметрах регулятора система уравнений для пары вершин с индексами  $i$  и  $j$  будет иметь вид

$$\begin{cases} \operatorname{Re} D_i(\alpha, \beta_i, k_1, k_2) = 0; \\ \operatorname{Im} D_i(\alpha, \beta_i, k_1, k_2) = 0; \\ \operatorname{Re} D_j(\alpha, \beta_j, k_1, k_2) = 0; \\ \operatorname{Im} D_j(\alpha, \beta_j, k_1, k_2) = 0; \\ \partial \operatorname{Re} D_i(\alpha, \beta_i, k_1, k_2) / \partial \alpha = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Необходимо решить систему (3)  $C_v^2$  раз (число сочетаний из  $V$  по 2) и из всех решений выбрать то, которое дает минимальное значение  $\alpha_{\min}$ .

### Числовой пример

На основе разработанной методики проведем параметрический синтез робастного ПИ-регулятора  $W_p(s) = (K_I + K_p s) / s$  для системы управления движением необитаемого подводного аппарата лагом. ИХП системы имеет вид

$$D(s) = d_4 \cdot s^4 + d_3 \cdot s^3 + d_2 \cdot s^2 + d_1 \cdot s + d_0,$$

где  $[d_0] = 4 \cdot K_I \cdot [K_T] \cdot K_S$ ;  $[d_1] = 4 \cdot K_p \cdot [K_T] \cdot K_S$ ;  $[d_2] = [c_z] \cdot V^{2/3} \cdot \rho \cdot [k]$ ;

$$[d_3] = 2 \cdot ([m] + \lambda_{33}) + [c_z] \cdot T_S \cdot V^{2/3} \cdot \rho \cdot [k] + [c_z] \cdot T_T \cdot V^{2/3} \cdot \rho \cdot [k];$$

$$[d_4] = 2 \cdot (T_S \cdot [m] + T_T \cdot [m] + T_S \cdot \lambda_{33} + T_T \cdot \lambda_{33}) + [c_z] \cdot T_S \cdot T_T \cdot V^{2/3} \cdot \rho \cdot [k],$$

$V = 0.02$  – водоизмещение НПА;  $\rho = 1000$  – плотность воды;  $T_S = 1$  – постоянная времени датчика;  $T_T = 1$  – постоянная времени движителя;  $\lambda_{33} = 4.65$  – присоединенная масса необитаемого подводного аппарата;  $K_S = 1$  – передаточный коэффициент датчика;  $[k] = [1; 2]$  – коэффициент интервальной линеаризации;  $[c_z] = [2.2; 2.7]$  – гидродинамический коэффициент необитаемого подводного аппарата;  $[K_T] = [4; 5]$  – переда-

точный коэффициент двигателя;  $[m]$  – масса необитаемого подводного аппарата. Необходимо определить настройки ПИ-регулятора, обеспечивающие максимальное быстродействие системы управления. В результате применения методики найдены:  $K_I = 0.2$ ,  $K_p = 3.75$ ,  $\alpha = 0.042$ .

### Основные результаты

Для повышения быстродействия интервальной САУ разработана методика параметрического синтеза робастного регулятора. Предложенный подход дает достаточно простую процедуру определения параметров регулятора, обеспечивающих максимальную степень устойчивости интервальной САУ. Процедура основана на интервальном расширении метода математического программирования. Методика апробирована на числовом примере.

1. *Волков, А.Н.* Метод синтеза систем автоматического управления с максимальной степенью устойчивости и заданной колебательностью [Текст] / А.Н. Волков, Ю.В. Загашвили // Известия РАН. Теория и системы управления. – 1997. – № 1. – С. 35–41.
2. *Ким, Д.П.* Синтез систем управления максимальной робастной степени устойчивости [Текст] / Д.П. Ким // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2007. – № 5. – С. 52–57.
3. *Fiodorov, I.* Synthesis algorithms of controllers for automatic control systems with maximum stability degree / I. Fiodorov // Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering series. – 2013. – № 37. – 139–143.
4. *Шубладзе, А.М.* Достаточные условия оптимальности структур в системах максимальной степени устойчивости произвольного вида [Текст] / А.М. Шубладзе // Автоматика и телемеханика. – 1999. – № 4. – С. 43–57.
5. *Татаринов, А.В.* Задачи математического программирования, содержащие комплексные переменные, и предельная степень устойчивости линейных динамических систем [Текст] / А.В. Татаринов, А.М. Цирлин // Известия РАН. Теория и системы управления. – 1995. – № 1. – С. 28–33.
6. *Гусев, Ю.М.* Анализ и синтез линейных интервальных динамических систем (состояние проблемы). Анализ с использованием интервальных характеристических полиномов [Текст] / Ю.М. Гусев, В.Н. Ефанов, В.Г. Крымский // Техническая кибернетика. – 1991. – № 1. – С. 3–30.
7. *Гайворонский, С.А.* Параметрический синтез линейного регулятора для интервального объекта управления [Текст] / С.А. Гайворонский, Т.А. Езангина // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2019. – № 5.

## СИНТЕЗ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО УРОВНЯ РОБОТОВ С КОНЕЧНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ\*

<sup>1</sup>Институт радиотехнических систем и управления ЮФУ, г. Таганрог,  
<sup>2</sup>Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону,  
gaiduk\_2003@mail.ru, kap56@mail.ru

### Введение

В последнее время для управления элементами исполнительного уровня роботов все более широко применяются микропроцессоры и микроконтроллеры, созданные на основе интегральных технологий, т.е. цифровые системы управления (ЦСУ). Системы этого типа обладают улучшенными показателями по качеству управления, надежности, технологичности изготовления и адаптируемости к изменениям условий функционирования [1 – 3]. Важной особенностью ЦСУ является возможность иметь конечный переходный процесс при постоянном перерегулировании. Качество управления на исполнительном уровне роботов можно существенно повысить, путем придания им свойства астатизма.

В данной работе ставится задача разработки метода формирования желаемых передаточных функций астатических ЦСУ с конечным переходным процессом и постоянным перерегулированием.

### Постановка задачи

Цифровые системы с конечным переходным процессом – это системы, передаточная функция которых имеет вид  $W_{yg}(z) = H_0(z) / z^{n_{\text{сис}}}$ . Если эта система имеет порядок астатизма  $v_g$ , то её передаточная функция  $W_{yg}(z)$  удовлетворяет условию

$$1 - W_{yg}(z) = N(z)(z-1)^{v_g} / z^{n_{\text{сис}}}, \quad (1)$$

где  $n_{\text{сис}}$  – порядок системы;  $N(z)$  – полином, степень которого  $n_N = \deg N(z) = n_{\text{сис}} - v_g$ .

При  $n_{\text{сис}} = 2$  и  $v_g = 2$  простейшая система этого типа имеет передаточную функцию  $W_{yg}^*(z) = (2z-1) / z^2$ , а разностное уравнение  $-y_k = 2g_{k-1} - g_{k-2}$ . Значения реакции  $y_k$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots$  этой системы на ступенчатое  $g_{1k} = 1(k)$  равны:  $y_{10} = 0, y_{11} = 2, y_{12} = 1, y_{13} = 1, \dots$ , а на линейное воздействие  $g_{2k} = k$  они

---

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 18-58-00051.

равны:  $y_{20} = 0, y_{21} = 0, y_{22} = 2, y_{23} = 3, y_{24} = 4, \dots$  Очевидно переходные процессы, являющиеся конечными, так как длятся два такта, а ошибки системы, вызванные указанными входными воздействиями, равны нулю. Однако перерегулирование составляет 100 %, что, конечно, не приемлемо для практики.

В работах [2, 3] установлено, что для уменьшения перерегулирования в цифровых системах необходимо увеличивать их порядок. На свойства систем существенно влияет запаздывание  $\tau = \mu_{\text{чис}} T$ , которое обусловлено временем на передачу сигналов, преобразование переменных и вычисление управлений в микроконтроллере. Здесь  $T$  – период работы последнего, а  $\mu_{\text{чис}}$  – относительный порядок системы.

В связи с этим далее рассматривается задача разработки метода определения желаемых передаточных функций  $W_{yg}^*(z)$  цифровых систем с  $\mu_{\text{чис}} > 1$ , при которых порядок астатизма  $v_g > 1$ , переходный процесс является конечным, а перерегулирование постоянное.

### Решение задачи

В работе получен конструктивный алгоритм построения желаемых передаточных функций цифровых систем с заданным порядком астатизма, постоянным перерегулированием и конечной длительностью переходного процесса, с учетом относительного порядка, обусловленного реализующей системой с заданной частью. Этот алгоритм заключается в определении степени  $n_{\text{чис}}$ , при которой полином

$$\bar{D}(z) = z^{n_{\text{чис}}} - (1 + \gamma)z^{n_{\text{чис}} - \mu_{\text{чис}}} + \gamma \quad (2)$$

с заданными значениями  $\mu_{\text{чис}}$  и  $\gamma = \sigma \% / 100\%$  имеет  $v_g$  корней, равных единице. В системе MATLAB были найдены порядки  $n_{\text{чис}}$  цифровых систем при  $v_g = 2$  и некоторых значениях  $\sigma \%$  и  $\mu_{\text{чис}}$ , приведенные в таблице 1.

На основе уравнения (2) и данных табл. 1 передаточная функция  $W_{yg}^*(z)$  при  $v_g = 2$  определяется вытекающей формулой

$$W_{yg}^*(z) = [(1 + \gamma)z^{n_{\text{чис}} - \mu_{\text{чис}}} - \gamma] / z^{n_{\text{чис}}}, \quad v_g = 2. \quad (3)$$

Таблица 1

### Порядок цифровых систем

Порядок астатизма $v_g = 2$				
$\sigma \% \backslash \mu_{\text{чис}}$	1	2	3	4
10	11	22	33	44
15	8	16	24	32
20	6	12	18	24
25	5	10	15	20
33	4	8	12	16

Из данных табл. 1 следует, что с уменьшением перерегулирования  $\sigma$  % резко возрастает порядок системы и длительность переходного процесса. Поэтому для сохранения приемлемой длительности переходных процессов, необходимо одновременно с уменьшением требуемых значений  $\sigma$  % уменьшать и период  $T$ . При этом возрастают требования к быстродействию используемых процессоров.

### Пример

С целью иллюстрации эффективности предложенного метода, построим желаемую передаточную функцию цифровой астатической системы управления элементом исполнительного уровня робота с относительным порядком  $\mu_{\text{сис}} = 3$ , вторым порядком астатизма и постоянным перерегулированием 20 %. В данном случае  $\nu_g = 2$ ,  $\gamma = 0,2$ , поэтому по табл. 1 находим  $n_{\text{сис}} = 18$ . Подставляя значения  $n_{\text{сис}}$ ,  $\mu_{\text{сис}}$  и  $\gamma$  в формуле (3), получим

$$W_{\text{yg}}^*(z) = (1, 2z^{15} - 0, 2) / z^{18}. \quad (4)$$

Построенная в MATLAB при  $T = 0,5$  с реакция системы с передаточной функцией (4) при нулевых начальных условиях на воздействие  $g_k = 1(k)$  показана на рис. 1,а. На рис. 1,б показана её реакция на линейное воздействие  $g_k = 0,5k$ , полученная в Simulink. Эти рисунки позволяют заключить, что система с желаемой передаточной функцией (4) имеет требуемые свойства.

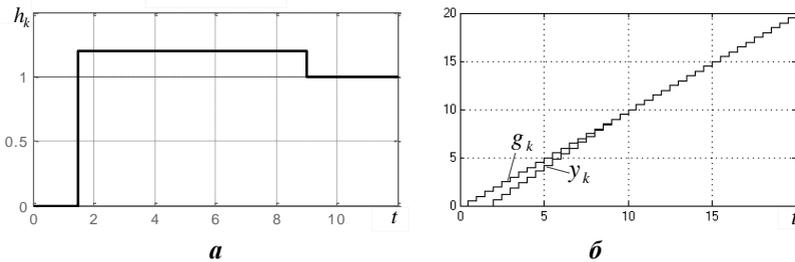


Рис. 1. Реакции системы с передаточной функцией (4)

1. Гайдук, А.Р. Синтез системы управления движением группы мобильных роботов в условиях неопределенности [Текст] / А.Р. Гайдук, И.А. Каляев, С.Г. Капустян, И.О. Шаповалов // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2018. – № 4(79). – С. 112–122.
2. Гайдук А.Р. Анализ и аналитический синтез цифровых систем управления [Текст] / А.Р. Гайдук, Е.А. Плаксиенко. – Санкт-Петербург: Лань, 2018. – 272 с.
3. Семенов, А.В. Процедура автоматизированного синтеза цифровых управляющих систем [Текст] / А.В. Семенов, А.Р. Гайдук, Ю.А. Геложе, А.В. Семенова // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 4(153). – С. 150–157.

## СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БАЛАНСИРУЮЩИМ РОБОТОМ НА ОСНОВЕ ВТОРОГО МЕТОДА ЛЯПУНОВА\*

Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова  
НИТУ «МИСиС», г. Старый Оскол,  
lastconst@yandex.ru

### Введение

В работе решается задача управления двухколесными балансирующими роботами. Рассматриваемый класс объектов характеризуется неустойчивостью и наличием в математическом описании нескольких видов нелинейностей: возведение фазовых координат в степень и применение к ним тригонометрических функций [1]. Кроме того, при прикладном использовании подобных объектов возникает изменение значений его параметров (массы, положения центра масс и коэффициента трения колес о дорожную поверхность), что, в целом, и определяет необходимость применения адаптивных алгоритмов управления.

Применяемые на сегодняшний день системы управления балансирующими роботами, а в большинстве случаев это оптимальные LQ-алгоритмы и ПИД-регуляторы, не способны обеспечить компенсацию существенных параметрических возмущений, хотя и обладают определенной робастностью по отношению к ним [2].

Для решения данной проблемы в работе предлагается система адаптивного управления, основанная на втором методе Ляпунова [3] и использовании эталонной модели [4]. Для построения такого регулятора в исследовании: 1) получено математическое описание эталонной динамики робота (при номинальных значениях его параметров), 2) выполнен расчет LQ-регулятора, 3) на основе второго метода Ляпунова разработан алгоритм адаптации параметров регулятора, не требующий знания значений элементов матрицы коэффициентов усиления объекта.

### Описание системы адаптивного управления

Полученная в исследовании система автоматического управления представлена на рис. 1.

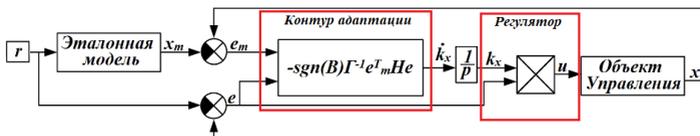


Рис. 1. Структурная схема контура управления

\* Исследование проведено при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-47-31003 р\_а).

Её структурная схема состоит из эталонной модели, блока регулятора и контура адаптации. В качестве эталонной модели применена замкнутая система

$$\begin{cases} \dot{x}_m = (A - BK)x_m + BKr \\ y_m = Cx_m \end{cases}, \quad (1)$$

состоящая из математической модели робота [5], полученной при его номинальных параметрах и, ввиду неустойчивости рассматриваемого объекта, LQ-регулятора, рассчитанного для стабилизации такой системы посредством решения уравнения Риккати. Здесь  $K$  – матрица коэффициентов LQ-регулятора.

Для вывода вида закона управления и адаптации было получено уравнение в отклонениях

$$\dot{e}_m = A_m e_m + B(\tilde{k}_x x + \tilde{k}_r r), \quad (2)$$

где  $e_m$  – разница между выходом объекта и эталонной модели. Здесь  $\tilde{k}_x = k_x^* - k_x$  и  $\tilde{k}_r = k_r^* - k_r$  – разница между идеальными и реальными коэффициентами регулятора.

Векторы состояний для объекта  $x$  и эталонной модели  $x_m$  содержат по семь координат, описание которых приведено в [5].

Для получения закона управления и адаптации выберем функцию Ляпунова

$$V = e_m^T H e_m + |B| \left( \frac{1}{2} \tilde{k}_x^T \Gamma \tilde{k}_x + \frac{1}{2} \tilde{k}_r^T \Gamma \tilde{k}_r \right), \quad (3)$$

зависящей от ошибки  $e_m$  и разницы между идеальными и реальными коэффициентами регулятора. Здесь  $\Gamma$  – положительно определенная диагональная матрица. Для выбора значений ее элементов был предложен алгоритм, зависящий от текущего и предыдущего значений задания. Матрица  $H$  найдена как решение уравнения Ляпунова

$$A_m^T H + H A_m = -I. \quad (4)$$

Производная выбранной функции Ляпунова будет отрицательной при справедливости равенств

$$u = k_x e, \quad (5)$$

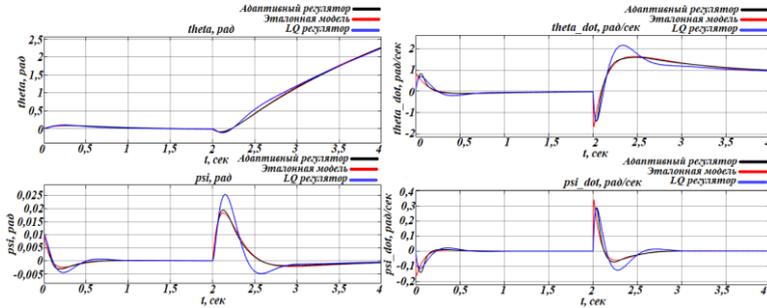
$$\dot{k}_x = -\text{sgn}(B) \Gamma^{-1} e_m^T H e \quad (6)$$

и  $\dot{k}_r = -\tilde{k}_x$ .

### Тестирование системы на модели балансирующего робота

Экспериментальная проверка разработанной системы адаптивного управления была проведена на модели балансирующего робота в среде Matlab Simulink. Сравнение качества управления адаптивного регулятора производилось с оптимальным LQ-регулятором. При проведении таких экс-

периментов масса робота была увеличена относительно номинальной в  $(2 \div 14)$  раз. Первые две секунды эксперимента объект работает в режиме стабилизации, а последние две – в режиме слежения за уставкой по координате скорости движения. Результаты для 14-кратного изменения массы приведены на рис. 2 как наиболее наглядные. Для остальных опытов они имеют сходный вид. Переходные процессы приведены по координатам  $\theta$  – угол поворота колес и  $\psi$  – угол отклонения робота от нормали, а также по их производным.



**Рис. 2. Переходные характеристики балансирующего робота**

В целом разработанная адаптивная система управления сводит переходные процессы балансирующего робота с измененной массой к переходным процессам эталонной модели.

### Заключение

В работе изложен подход к построению адаптивной системы управления, выполняющей компенсацию действия на объект управления параметрических возмущений. Эффективность предлагаемого подхода подтверждают эксперименты, проведенные на модели балансирующего робота.

1. *Формальский, А.М.* Управление движением неустойчивых объектов [Текст] / А.М. Формальский. – Москва: Физматлит, 2012. – 232 с.
2. *Бобцов, А.А.* Методы адаптивного и робастного управления нелинейными объектами в приборостроении [Текст] / А.А. Бобцов, В.О. Никифоров, А.А. Пыркин. – Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2013. – 277 с.
3. *Аксенов, Г.С.* Синтез адаптивных регуляторов на основе метода функции Ляпунова [Текст] / Г.С. Аксенов, В.Н. Фомин // Автоматика и телемеханика. – 1982. – № 6. – С. 126–137.
4. *Павлов, Б.В.* Системы прямого адаптивного управления [Текст] / Б.В. Павлов, И.Г. Соловьев. – Москва: Наука, 1989. – С. 136.
5. *Глуценко, А.И.* О применении оперативного обучения для нейросетевого регулятора при управлении двухколесным балансирующим роботом [Текст] / А.И. Глуценко, В.А. Петров, К.А. Ласточкин // Системы управления и информационные технологии. – 2018. – №3(73). – С. 27–32.

*В.Г. Градецкий, М.М. Князьков, Е.А. Семенов, А.Н. Суханов*

## **РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТА ВЕРТИКАЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ\***

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, г. Москва,  
Ipm\_labrobotics@mail.ru*

Разработанный робот вертикального перемещения (рис. 1) предназначен для выполнения различного вида работ: от снятия и перемещения особо опасных грузов из труднодоступных мест – вертикальных стен, потолочных перекрытий – до проведения технологических операций.



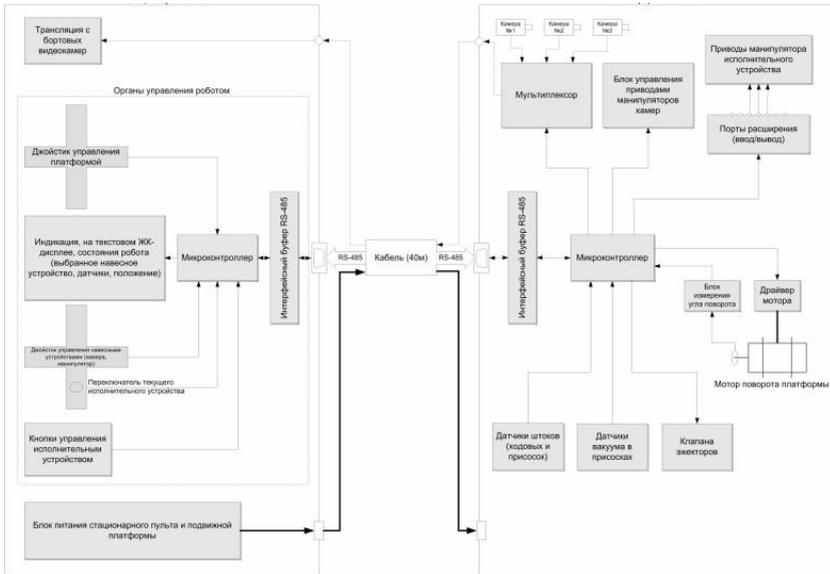
***Рис. 1. Робот вертикального перемещения с технологическим оборудованием***

Такие роботы способны перемещаться по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям и содержат следующие основные системы: механическую, транспортную, управляющую, измерительно-информационную, сенсорную и технологическую.

Управление движением робота и его навесными механизмами осуществляет оператор в супервизорном режиме по радиосвязи или по проводному каналу. Команды, подаваемые с поста управления, поступают на бортовую систему робота (рис. 2). Все промежуточные операции, связанные с переходом с одной плоскости на другую, осуществляются автоматически при помощи бортового микроконтроллера.

---

\* Работа выполнена в рамках Гостемы: «Механика и управление движением роботов и робототехнических систем» № АААА-А17-117021310384-9.



**Рис. 2. Система управления робота вертикального перемещения**

Алгоритм перемещения робота по вертикальной поверхности приведен далее в текстовом виде.

Исходное положение робота: штоки приводов движения в положении назад, штоки приводов схватов внутренней платформы в положении вниз, штоки приводов схватов внешней платформы в положении вверх, питание эжекторов схватов внутренней платформы включено, питание эжекторов схватов внешней платформы выключено.

Опрос датчика давления на входе в робот. При положительном выходе датчика даётся разрешение на выход в цикл.

При включении джойстика в положение вперёд с контроллера выдаётся следующая последовательность команд: переключение штоков приводов движения в положение вперёд, опрос датчиков приводов движения вперёд, при положительном выходе переключение штоков приводов схватов внешней платформы в положение вниз, опрос датчиков штоков приводов схватов внешней платформы в положение вниз, при положительном выходе питание эжекторов схватов внешней платформы включено, опрос датчиков вакуума схватов внешней платформы, при положительном выходе питание эжекторов схватов внутренней платформы выключено, переключение штоков приводов схватов внутренней платформы в положение вверх, опрос датчиков штоков приводов схватов внутренней платформы в положение вверх, при положительном вы-

ходе переключение штоков приводов движения в положение назад, опрос датчиков штоков приводов движения в положение назад, переключение штоков приводов схватов внутренней платформы в положение вниз, опрос датчиков штоков приводов схватов внутренней платформы в положение вниз, при положительном выходе питание эжекторов схватов внутренней платформы включено, опрос датчиков вакуума схватов внутренней платформы, при положительном выходе питание эжекторов схватов внешней платформы выключено, переключение штоков приводов схватов внешней платформы в положение вверх. Возвращение в исходное положение. Опрос пульта управления.

При включении джойстика в положение назад с контроллера выдаётся следующая последовательность команд: переключение штоков приводов схватов внешней платформы в положение вниз, опрос датчиков штоков приводов схватов внешней платформы в положение вниз, при положительном выходе питание эжекторов схватов внешней платформы включено, опрос датчиков вакуума схватов внешней платформы, при положительном выходе питание эжекторов схватов внутренней платформы выключено, переключение штоков приводов схватов внутренней платформы в положение вверх, опрос датчиков штоков приводов схватов внутренней платформы в положение вверх, при положительном выходе переключение штоков приводов движения в положение вперёд, опрос датчиков штоков приводов движения в положение вперёд, при положительном выходе переключение штоков приводов схватов внутренней платформы в положение вниз, питание эжекторов схватов внутренней платформы включено, опрос датчиков вакуума схватов внутренней платформы, при положительном выходе питание эжекторов схватов внешней платформы выключено, переключение штоков приводов схватов внешней платформы в положение вверх, опрос датчиков штоков приводов схватов внешней платформы в положение вверх, при положительном выходе переключение штоков приводов движения в положение назад. Возвращение в исходное положение.

1. Черноусько, Ф.Л. Принципы движения и проблемы динамики мобильных роботов [Текст] / Ф.Л. Черноусько, В.Г. Градецкий // Мехатроника и робототехника (МИР-07): материалы Международной выставки-конгресса, Ленэкспо, 2007. – С. 89–90.
2. Bridge, B. Field Trials of a Cell of Climbing Cooperating Robots for Fast and Flexible Manufacturing of Large Scale Engineering Structures / B. Bridge, H.E. Leon Rodriguez, S.C. Mondal, T.P. Sattar // Proceed. of the CLAWAR2009 International Conference, edited by O. Tosun, H. Akin, M.O. Tokhi, G.S. Virk, ISBN-13978-981-4291-26-2, published by World Scientific Publishing. – P. 801–810.

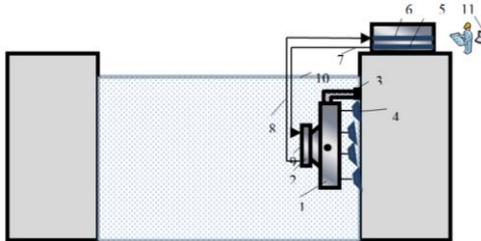
*В.Г. Градецкий, М.М. Князьков, Е.А. Семенов, А.Н. Суханов*

## **СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТАМИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ В СЛОЖНЫХ СРЕДАХ\***

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, г. Москва,  
Ipm\_labrobotics@mail.ru*

Объектом управления являются роботы вертикального перемещения (РВП) с вакуумными контактными устройствами (ВКУ), которые предназначены для перемещения по вертикальным и наклонным поверхностям, расположенным под водой, и выполнения различных технологических операций [1, 2]. Примерами таких поверхностей служат стены бассейнов выдержки атомных электростанций, корпуса кораблей, затопленные дамбы [3, 4].

Концепция РВП, предназначенного для движения по подводным поверхностям (рис. 1), включает следующие модули и узлы: 1 – корпус ПРВП, 2 – узел поворота, 3 – технологическое оборудование с видеокамерой, 4 – вакуумные захватные устройства, 5 – выход системы управления, 6 – вход системы управления, 7 – управляющие сигналы, 8 – сигналы обратной связи, 9 – шина входа/выхода ПРВП, 10 – уровень жидкости, 11 – пульт оператора.



**Рис. 1. Робот вертикального перемещения в водной среде**

Особое внимание заслуживают контактирующие устройства с поверхностью, за счет которых робот перемещается, поскольку они предназначены для надежного удержания робота на таких поверхностях. Для осуществления движения в сложных условиях ВКУ являются наиболее приемлемыми, так как они могут осуществлять контакт с ферромагнитными и неферромагнитными поверхностями, находящимися в водной среде.

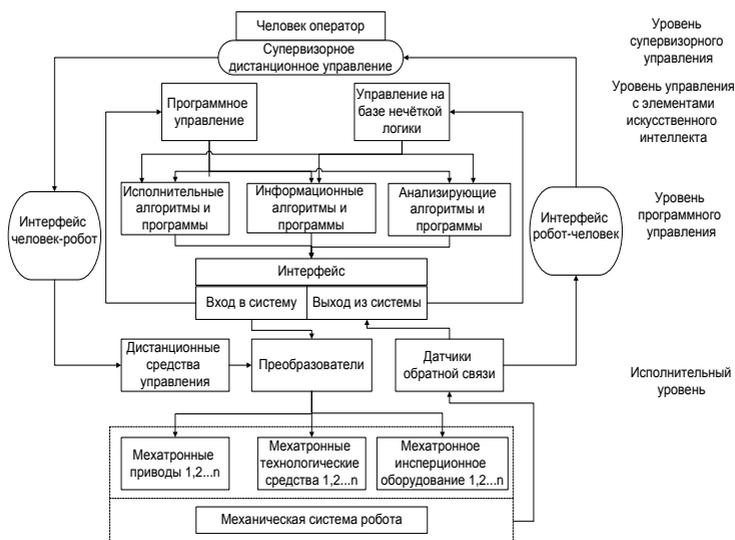
Несмотря на то, что ранее были разработаны адаптивные к поверхности перемещения ВКУ, необходимо было разработать концепцию систем управления РВП, учитывая особенности их движения в таких сложных условиях, как находящиеся под водой поверхности. Отметим, что существенными составляющими концепции являлись предложенные ранее кон-

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 18-08-00357.

струкции вакуумных захватов, способных адаптироваться к изменениям рабочей среды на произвольно ориентированных в пространстве поверхностях [5, 6]. Предложены различные режимы управления для устройств генерации вакуума, в зависимости от качества поверхности перемещения и среды функционирования робота вертикального перемещения.

В процессе проведения экспериментальных исследований выяснилось, что созданные ранее захватные устройства требуют дополнительной модернизации, а системы управления РВП нуждаются в структурной разработке. Учитывая, что в сложных экстремальных условиях могут возникнуть неожиданные изменения, за которые программным управлением автоматизировать не возможно, оказалось целесообразным в структуру системы управления ввести кроме ВКУ с элементами адаптации уровни более высокого управления, включая человека-оператора.

Структура и уровни управления (рис. 2) позволяют осуществлять как автоматическое программное движение в штатных стандартных условиях, так и вмешательство человека-оператора при возникновении неожиданных ситуаций.



**Рис. 2. Уровни и структура управления робота вертикального перемещения и участие человека-оператора**

В состав вакуумных захватных устройств входит система очувствления по уровню вакуума, углу наклона поверхности и траектории перемещения робота. Величина вакуума в захватных устройствах может варьироваться в широком диапазоне значений и позволяет рационально регулировать уровень расхода и давления в системе питания робота.

Разработанные алгоритмы управления учитывают ситуационные изменения окружающей сложной среды, в которой перемещается робот.

Для отработки разработанных алгоритмов управления была проведена серия экспериментов с вакуумными захватными устройствами в воздушной и водных средах, на различной глубине погружения. По результатам работ выработаны рекомендации по проектированию адаптивных ВКУ, которые могут быть использованы на роботах вертикального перемещения при эксплуатации их в сложных средах.

1. *Sattar, T.* Design of a climbing robot for inspection aircraft wings and fuselage / T. Sattar, S. Chen, B. Bridge, J. Shang // *An International Journal*. – 2007. – Vol. 34. – P. 445–502.
2. *Rashed, M. Al.* Climbing robot for NDT applications / M. Al. Rashed, M. Kimball, L. Vega, D. Vera, J. Soler, M. Correa, A. Garcia, G. Virk, T. Sattar // *Proceed. of Clawar 2017 Intern. Conf., Porto-Portugal, 2017*. – P. 285–292.
3. *Градецкий, В.Г.* Адаптивные захватные устройства мобильных роботов с миниатюрными эжекторами [Текст] / В.Г. Градецкий, М.М. Князьков, Е.А. Семенов, А.Н. Суханов // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2016. – Т. 17, № 3. – С. 172–177.
4. Tariq P. Sattar, Paul Hilton, MIDDMAR Faruq Howlader, Deployment of Laser Cutting Head with Wall Climbing Robot for Nuclear Decommissioning. *Proceed. of CLAWAR 2016 Inter. Conference, Advance in Cooperative Robotics, London, UK, Sept. – 2016*. – P. 725–732.
5. *Градецкий, В.Г.* Управляемое формирование вакуума в устройствах сцепления с поверхностями при движении мобильных роботов с аэродинамическим прижимом [Текст] / В.Г. Градецкий, М.М. Князьков, Л.Н. Кравчук, А.А. Крюкова, Е.А. Семенов, А.Н. Суханов, В.Г. Чашухин // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2017. – № 7. – С. 447–451.
6. *Robotics in Nuclear Facilities, 1991, Special Issue for Exhibitions of the 11th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SmiRT 11), Tokyo August 1991*. – P. 25–28.

*А.И. Дивеев, Е.Ю. Шмалько*

## **К ЧИСЛЕННЫМ МЕТОДАМ СИМВОЛЬНОЙ РЕГРЕССИИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ\***

*ФИЦ «Информатика и управление» РАН, г. Москва,  
aidiveev@mail.ru, e.shmalko@gmail.com*

Рассматривается синергетический подход к решению задачи управления. Предложен численный способ решения задачи синергетического управления на основе методов символьной регрессии. Обсуждаются перспективы применения синергетического подхода в управлении.

---

\* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 17-08-01203-а).

В теории синергетического управления целевые терминальные условия записываются через агрегированные переменные, для которых затем записывают итоговое дифференциальное уравнение в виде

$$T\psi(x, u) + F(\psi(x, u)) = 0, \quad (1)$$

где  $\psi(x, u)$  – вектор агрегированных переменных,  $x$  – вектор состояния объекта управления,  $u$  – вектор управления,  $T$  – постоянный параметр, функция  $F(\psi(x, u))$  выбирается из условия аналитического решения уравнений и удовлетворяет условиям  $F(0) = 0$ .

Уравнение (1) также записывается в виде системы алгебраических уравнений

$$T \frac{\partial \psi(x, u)}{\partial x} \dot{f}(x, u) + F(\psi(x, u)) = 0, \quad (2)$$

где  $\dot{f}(x, u)$  – вектор правых частей математической модели объекта управления.

Согласно теории синергетического управления [1, 2], дифференциальное уравнение (1) обладает свойством устойчивости в пространстве агрегированных переменных, и, если из него найти управление аналитическим решением обратной задачи, то получим управление, которое обеспечивает свойство аттрактора для многообразия, формируемого агрегированными переменными.

Рассмотрим задачу управления автономным мобильным роботом с помощью синергетического похода. Объект управления описывается системой дифференциальных уравнений

$$\dot{x} = u_1 \cos(\theta), \quad \dot{y} = u_1 \sin(\theta), \quad \dot{\theta} = u_2, \quad (3)$$

где  $x, y$  – координаты положения центра масс объекта на плоскости,  $\theta$  – угол между вектором скорости объекта и осью  $x$ .

Терминальное условие попадания в заданную точку запишем через агрегированные переменные

$$\psi = (x - x^f)^2 + (y - y^f)^2 + (\theta - \theta^f)^2. \quad (4)$$

Тогда из уравнения (2) находим

$$T(2u_1(x - x^f)\cos\theta + 2u_1(y - y^f)\sin\theta + 2(\theta - \theta^f)u_2) + F((x - x^f)^2 + (y - y^f)^2 + (\theta - \theta^f)^2) = 0. \quad (5)$$

Откуда получаем выражение для управления

$$u_1 = - \frac{2(\theta - \theta^f)u_2 + F((x - x^f)^2 + (y - y^f)^2 + (\theta - \theta^f)^2)}{2T((x - x^f)\cos\theta + (y - y^f)\sin\theta)}. \quad (6)$$

Одно уравнение для двух компонент управления позволяет находить при разных значениях  $u_1$  различные значения  $u_2$ . В общем виде управление не обеспечивает свойства аттрактора терминальному многообразию (4).

Представление терминального двумерного многообразия (4) в форме нуль-мерного многообразия

$$\psi_1 = (x - x^f)^2 = 0, \quad \psi_2 = (y - y^f)^2 = 0, \quad \psi_3 = ((\theta - \theta^f)^2 = 0 \quad (7)$$

приводит к получению трех алгебраических уравнений для нахождения двух компонент управления и также не обеспечивает нахождения управления, придающего терминальному многообразию (7) свойства аттрактора. В общем случае для нахождения управления, обеспечивающего свойства аттрактора для терминального многообразия, необходимо задание дополнительных условий.

При численном решении задачи синергетического управления методами символьной регрессии рассматриваем нуль-мерное терминальное многообразие как точку стабилизации и находим управление в виде обратной связи, которое обеспечивает свойства устойчивости точке терминального многообразия. Данная задача не представляет особой трудности для численных методов символьной регрессии [3] и может быть решена достаточно эффективно для любого управляемого объекта.

Более сложным случаем является задача управления, в которой необходимо придать свойства аттрактора терминальному многообразию с размерностью более нуля. Для многообразия с размерностью единица, когда терминальные условия задаются  $n - 1$  алгебраическим уравнением, эффективным оказался прием задания многоточечного критерия стабилизации [4]. Данный критерий требует после попадания на терминальное многообразие движения по этому терминальному многообразию и прохождения на нем некоторого заданного количества точек. Все заданные точки должны находиться на некотором расстоянии друг от друга, причем это расстояние должно превышать заданную положительную величину. Если управление не обеспечивает прохождения всех заданных точек на многообразии, то функционал штрафует величину, пропорциональную количеству не пройденных точек. Если после прохождения некоторого числа точек объект сходит с терминального многообразия, то счетчик количества пройденных точек на многообразии обнуляется. Одномерное многообразие представляет собой линию, в общем случае кривую, поэтому порядок прохождения точек и характер движения объекта на многообразии определить легко, хотя и здесь, как показывают эксперименты, иногда возникает проблема направления движения по многообразию. Для некоторых начальных условий одно и то же управление, найденное методом символьной регрессии, обеспечивает движение через все заданные точки как в прямом, так и в обратном направлениях.

Для терминальных многообразий порядка более единицы найти какой-то общий подход для формулировки критерия оптимальности при решении задачи синтеза численными методами символьной регрессии не удалось. Основная проблема состоит в том, чтобы определить характер движения объекта управления в окрестности терминального многообразия с размерностью более единицы. Заметим, что это может быть поверхность или некоторая область подпространства состояний. Здесь для построения многоточечного критерия необ-

ходимо сформулировать большое количество дополнительных условий, которые указывают на то, как должен двигаться объект в окрестности терминального многообразия. Если не определять эти условия, то метод синтеза системы управления, построенный на основе методов символьной регрессии, находит такое управление, которое обеспечивает стабилизацию объекта относительно одной точки в окрестности терминального многообразия. Очевидно, что нульмерное многообразие всегда является подмногообразием многообразия более высокого порядка. Следовательно, удовлетворение условия подпадания на многообразии с размерностью ноль удовлетворяет условиям попадания на многообразия с размерностью единица и выше.

1. Колесников, А.А. Синергетическая теория управления [Текст] / А.А. Колесников. – Таганрог: ТРТУ, Москва: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.
2. Колесников, А.А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза [Текст] / А.А. Колесников. – Москва: Едиториал УРСС, 2005. – 228 с.
3. Дивеев, А.И. Численные методы решения задачи синтеза управления [Текст] / А.И. Дивеев. – Москва: Издательство Российского университета дружбы народов, 2019. – 192 с.
4. Дивеев, А.И. Численные методы синтеза синергетического управления групповым взаимодействием роботов [Текст] / А.И. Дивеев, Е.Ю. Шмалько // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2017. – № 9. – С. 6 – 21.

*Ю.Ф. Долгий, А.Н. Сесекин, О.Л. Таишлыков, И.А. Чупин*

## **ДЕКОМПОЗИЦИОННОЕ ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МЕХАНИЗМОМ ПЕРЕГРУЗКИ ТОПЛИВНЫХ СБОРОК\***

*Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург,  
a.n.sesekin@urfu.ru*

### **Введение**

Система перегрузки реактора БН-800 предназначена для перегрузки топливных сборок и состоит из совокупности узлов, обеспечивающих наведение механизма перегрузки на заданные координаты, захватывание, подъем, опускание и поворот сборок. На горловине корпуса реактора БН-800 расположены три поворотные пробки, меньшая из них расположена внутри средней и средняя внутри большой пробки. На меньшей пробке размещен механизм захвата топливной сборки. Пробки, являющиеся крышкой реактора, выполняют роль тепловой и биологической защиты [1], а также осуществляют наведение механизма перегрузки на заданные координаты активной зоны

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 17-08-01385.

с целью захвата топливной сборки и ее перемещения в требуемую зону с заданными координатами. В данной работе рассматривается задача наискорейшего наведения захвата, расположенного на меньшей пробке, на заданную топливную сборку в предположении, что пробки будут поворачиваться последовательно, и в каждый момент возможен поворот только одной пробки. Решение такой задачи будет способствовать уменьшению времени остановки энергоблока для выполнения операций по перегрузке топлива. Для этой задачи построена математическая модель, которая описывает движение трех связанных пробок. На ее основе предложен алгоритм построения оптимального управления при сделанных предположениях.

### Математическая модель движения пробок реактора

Математическую модель перегрузочного устройства можно описать с помощью следующих уравнений Лагранжа второго рода [2]:

$$\begin{aligned}
 & (J_1 + J_2 + J_3)\varphi_1'' + (J_2 + J_3)\varphi_2'' + J_3\varphi_3'' + m_2(e_2^2\varphi_1'' + \\
 & + e_2a \cos(\varphi_2 + \alpha) (2\varphi_1'' + \varphi_2'') - e_2a \sin(\varphi_2 + \alpha)((2\varphi_1' + \varphi_2')\varphi_2') + \\
 & + m_3 (e_2^2\varphi_1'' + e_3^2(\varphi_1'' + \varphi_2'') + e_2e_3 \cos(\varphi_2) (2\varphi_1'' + \varphi_2'') + \\
 & - e_2e_3 \sin(\varphi_2) (2\varphi_1' + \varphi_2')\varphi_2' = u_1 ; \\
 & (J_2 + J_3)(\varphi_1'' + \varphi_2'') + J_3\varphi_3'' + \\
 & + m_2e_2a(\cos(\varphi_2 + \alpha) \varphi_1'' + \sin(\varphi_2 + \alpha) \varphi_1'^2) + \\
 & + m_3(e_3^2(\varphi_1'' + \varphi_2'') + e_2e_3(\cos(\varphi_2) \varphi_1'' + \sin(\varphi_2)\varphi_1'^2)) = u_2 ; \\
 & J_3(\varphi_1'' + \varphi_2'' + \varphi_3'') = u_3, \tag{1}
 \end{aligned}$$

где  $\varphi_1$  – угол поворота большой пробки;  $\varphi_2$  – угол поворота малой пробки относительно большой;  $J_1$  – момент инерции большой пробки относительно центра большого круга;  $J_2$  – момент инерции малой пробки относительно ее центра масс;  $m_2$  – масса малой пробки;  $e_2$  – расстояние между центром масс малой пробки и центром масс большой пробки (при этом мы предполагаем, что центр масс малой пробки совпадает с центром пробки);  $u_1, u_2, u_3$  – управляющие моменты, приложенные к большой, средней и малой пробкам соответственно (рис. 1), подчиненные ограничениям

$$|u_1| \leq \mu_1, |u_2| \leq \mu_2, |u_3| \leq \mu_3. \tag{2}$$

Математическая модель (1) управляемой системы является достаточно сложной и применять к ней принцип максимума Л.С. Понтрягина [3] весьма проблематично. В связи с этим мы рассматриваем декомпозиционный вариант этой задачи. А именно, далее будем предполагать,

что пробки на крышке реактора будут вращаться последовательно, причем при вращении одной пробки остальные будут зафиксированы каждая в своей относительной системе координат.

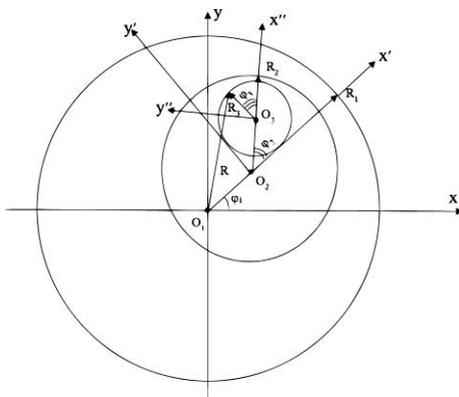


Рис. 1. Схема поворотных пробок реактора БН-800

### Декомпозиционный вариант задачи предельного быстрогодействия

Такая задача рассматривалась в работе [4]. В этом случае оптимальное время, требуемое на разворот  $i$ -й пробки, равно

$$\theta_i = \sqrt{\frac{J_i}{\mu_i} |\Delta\varphi_i|},$$

где  $\Delta\varphi_i = \varphi_i^f - \varphi_i^0$ ,  $\varphi_i^0$  и  $\varphi_i^f$  – начальное и конечное положение угла  $\varphi_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ .

В результате общее время перегрузки задается формулой

$$\theta_0 = \sqrt{\frac{J_1}{\mu_1} |\Delta\varphi_1|} + \sqrt{\frac{J_2}{\mu_2} |\Delta\varphi_2|} + \sqrt{\frac{J_3}{\mu_3} |\Delta\varphi_3|}, \quad (3)$$

где  $\varphi_1^f$ ,  $\varphi_2^f$ ,  $\varphi_3^f$  связаны двумя кинематическими соотношениями. В результате получили задачу минимизации нелинейного функционала (3) при двух нелинейных кинематических связях. Для решения этой задачи предложен численный метод.

1. Бельтюков, А.И. Атомные электростанции с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем [Текст]: учебное пособие / А.И. Бельтюков, А.И. Карпенко, С.А. Полуяктов, О.Л. Ташлыков, Г.П. Титов, А.М. Тучков, С.Е. Щеклеин: в 2 ч. Ч. 1; под общ. ред. С.Е. Щеклеина, О.Л. Ташлыкова. – Екатеринбург: УрФУ, 2013. – 548 с.
2. Апель, П. Теоретическая механика [Текст] / П. Апель. – Москва: Физматлит. – 1960. – Т.2. – 487 с.
3. Понтрягин, Л.С. Математическая теория оптимальных процессов [Текст] / Л.С. Понтрягин, В.Г. Болтянский, Р.В. Гамкрелидзе, Е.Ф. Мищенко. – Москва: Наука, 1983. – 393 с.
4. Dolgi, Yu.F. Optimal control of the fuel reload mechanism / Yu.F. Dolgi, A.N. Sesekin, O.L. Tashlykov, E.Z. Zaynullina // IFAC – PaperOnLine. – Vol.51, No. 32. – P. 636–641.

## **МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ СКОЛЬЗЯЩИХ НАБЛЮДАТЕЛЕЙ ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ МЕХАТРОННЫХ ОБЪЕКТОВ\***

*Дальневосточный федеральный университет,  
Институт проблем морских технологий ДВО РАН, г. Владивосток,  
Университет Иннополис, г. Иннополис,  
zhirabok@mail.ru, zuev@marine.febras.ru*

### **Введение**

В докладе рассматривается задача функционального диагностирования различных блоков и устройств мехатронных объектов (МО), описываемых линейными динамическими моделями, в присутствии возмущений. Эта задача интенсивно исследуется уже более 30 лет, было разработано несколько методов диагностирования – диагностические наблюдатели, фильтры Калмана, соотношения паритета, идентификация. Одним из методов идентификации является метод, основанный на специальных наблюдателях, использующих особенности скользящего режима [1].

Скользящие наблюдатели применяются для решения задачи идентификации дефектов в линейных и нелинейных системах [2, 3], в ряде практических приложений [4]. В докладе по аналогии с [3] рассматриваются линейные объекты, для которых решается задача идентификации дефектов в присутствии возмущений, но при наложении менее жестких, нежели в [3], ограничений. Кроме того, предлагаемый подход позволяет добиться уменьшения сложности средств диагностирования.

### **Метод построения скользящих наблюдателей для диагностирования МО**

Рассмотрим МО, описываемые линейной моделью:

$$\dot{x}(t) = Fx(t) + Gu(t) + Dd(t) + L\rho(t), \quad y(t) = Hx(t), \quad (1)$$

где  $x(t) \in R^n$ ,  $u(t) \in R^m$ ,  $y(t) \in R^l$  – векторы состояния, управления и выхода;  $F \in R^{n \times n}$ ,  $G \in R^{n \times m}$ ,  $D \in R^{n \times q}$ ,  $L \in R^{n \times p}$  и  $H \in R^{l \times n}$  – известные матрицы;  $d(t) \in R$  – функция, описывающая дефекты: при их отсутствии  $d(t) = 0$ , при появлении дефекта  $d(t)$  становится неизвестной функцией

---

\* Работа выполнена при поддержке РФФ (проект 16-19-00046 П (разработан метод построения редуцированных моделей) и гранта Президента РФ МК-1987.2018.8 (выполнен синтез робастных наблюдателей).

времени;  $\rho(t) \in R^p$  – вектор, описывающий действующие на систему возмущения,  $\rho(t)$  предполагается неизвестной функцией времени.

В отличие от [3], где скользящий наблюдатель строится на основе исходной модели МО (1), предлагаемый подход опирается на редуцированную модель МО (1), которая в общем случае описывается уравнением

$$\dot{x}_*(t) = F_*x_*(t) + G_*u(t) + J_*y(t) + D_*d(t) + L_*\rho(t), \quad y_*(t) = H_*x_*(t), \quad (2)$$

где  $x_* \in R^k$  – вектор состояния,  $F_*$ ,  $G_*$ ,  $J_*$ ,  $H_*$ ,  $D_*$  и  $L_*$  – постоянные матрицы. Предполагается, что при отсутствии дефектов и возмущений выполняются равенства  $x_*(t) = \Phi x(t)$  и  $y_*(t) = R_*y(t)$  для некоторых матриц  $\Phi$  и  $R_*$ , удовлетворяющих условиям

$$\Phi F = F_*\Phi + J_*H, \quad R_*H_* = H\Phi. \quad (3)$$

Алгоритм построения редуцированных моделей для МО подробно рассмотрен в работе [5]. При этом в зависимости от особенностей системы (2), характера влияния на нее дефекта и возмущений возможны три случая и соответственно три варианта действий.

1. Существует матрица  $\Phi$ , удовлетворяющая условиям (3), такая, что  $\Phi L = 0$  и  $\Phi D \neq 0$ ; последнее означает существование модели, не чувствительной к возмущениям и чувствительной к дефекту. Задача точной идентификации дефекта решается за счет построения скользящего наблюдателя.

2. Существует матрица  $\Phi$ , удовлетворяющая условиям (3), такая, что  $\Phi D = 0$  и  $\Phi L \neq 0$ ; последнее означает существование модели, не чувствительной к дефекту. При решении этой задачи строится скользящий наблюдатель, который осуществляет оценку этих возмущений. Эта оценка далее используется в диагностическом наблюдателе, обеспечивающем обнаружение дефекта.

3. Для любой матрицы  $\Phi$ , удовлетворяющей условиям (3), выполняются неравенства  $\Phi D \neq 0$  и  $\Phi L \neq 0$ . Задача приближенной идентификации дефекта решается методами, рассматриваемыми в [5].

По аналогии с [3] скользящий наблюдатель для оценки величины дефекта (или возмущения) предложено строить в виде

$$\hat{x}_*(t) = F_*\hat{x}_*(t) + G_*u(t) + J_*y(t) + D_*v(t) - Ke_y(t), \quad \hat{y}_*(t) = H_*\hat{x}_*(t), \quad (4)$$

где матрица  $K$  выбирается так, чтобы  $F_{**} = F_* - KH_*$  стала устойчивой

матрицей;  $v(t) = \begin{cases} -g \frac{Qe_y(t)}{\|Qe_y(t)\|}, & \text{если } e_y(t) \neq 0, \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$  скаляр  $g$  выбирается из

условия  $g > \|d(t)\|$ ;  $e_y(t) = \hat{y}_*(t) - y_*(t) = \hat{y}_* - R_* y(t)$  – ошибка по выходу;  $Q$  – матрица, удовлетворяющая условию [3]  $PD_* = H_*^T Q^T$  (где  $P$  – симметрическая положительно определенная матрица).

Поскольку в скользящем режиме обнуляется рассогласование между наблюдателем и объектом диагностирования, то функция  $d(t)$  может быть оценена в виде

$$d(t) = -g \frac{Qe_y(t)}{\|Qe_y(t)\| + \delta},$$

где  $\delta$  – малая положительная константа.

Результаты математического моделирования подтвердили работоспособность и высокую эффективность предложенного в проекте нового метода робастного поиска и идентификации дефектов в МО на основе скользящих наблюдателей.

### Заключение

В работе для решения задачи идентификации дефектов в МО использован метод на основе скользящих наблюдателей. Предложенная модификация этого метода позволила ослабить ограничения, накладываемые на условия его реализации, для решения указанных задач при наличии возмущений и уменьшить сложность средств диагностирования по сравнению с известными методами. Полученная оценка величины дефекта может быть использована для обеспечения свойства отказоустойчивости системы.

1. Уткин, В.И. Скользящие режимы и их применение в системах с переменной структурой / В.И. Уткин. – Москва: Наука, 1974.
2. Edwards, C. On the development of discontinuous observers / C. Edwards, S. Spurgeon // International Journal of Control. – 1994. – Vol. 59. – P. 1211–1229.
3. He, J. Fault Reconstruction based on sliding mode observer for nonlinear systems / J. He, C. Zhang // Mathematical Problems in Engineering. – 2012. – P. 1–22.
4. Chandra, K. Fault reconstruction for a quadrotor using an LPV sliding mode observer / K. Chandra, H. Alwi, C. Edwards // Proceedings of the 9th IFAC Symposium “Safeprocess”. Paris, France, 2015. – P. 374–379.
5. Жирабок, А.Н. Методы диагностирования линейных систем на основе скользящих наблюдателей / А.Н. Жирабок, А.В. Зуев, А.Е. Шумский // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2019. – № 4. – С. 120–136.

## АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГРУППОЙ РОБОТОВ С «ВЕДУЩИМ» В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ\*

<sup>1</sup>Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону,

<sup>2</sup>Институт радиотехнических систем и управления ЮФУ, г. Таганрог,  
kap56@mail.ru, gaiduk\_2003@mail.ru, vsp46@mail.ru

### Введение

Требования к качеству систем управления группами роботов непрерывно повышаются, область их применения расширяется, при этом часто возникает необходимость решения задачи управления в условиях неопределенности. В случае группы роботов неопределенность обусловлена априорной неизвестностью и математической модели как группы в целом, так и отдельных роботов, а также условий функционирования группы. В то же время все эти факторы имеют определяющее значение и для построения систем управления роботами, и для эффективного функционирования роботов [1, 2].

В общем случае группы роботов могут быть однородными или гетерогенными, однако в данном случае рассматривается задача управления группой, состоящей из однотипных роботов, выполняющих однотипные задачи: транспортировка, картографирование и т.п. Это позволяет реализовать принцип управления с «ведущим». Применение этого принципа в условиях неопределенности обеспечивает большую оперативность в оценке складывающейся ситуации и формировании соответствующих алгоритмов управления. В этих условиях наиболее более эффективными представляются адаптивные алгоритмы управления с идентификацией [2, 3]. При наличии в группе «ведущего» появляется возможность решение задачи синтеза алгоритмов возложить на «ведущего», что позволяет упростить управляющие комплексы остальных роботов группы. Особое значение этот фактор приобретает в большой группе и малых размерах основных роботов-исполнителей.

Целью данной работы является решение задачи синтеза адаптивных алгоритмов управления, которая включает аналитические алгоритмы идентификации моделей роботов и синтеза законов управления. В предлагаемом методе применяются марковский алгоритм идентификации и аналитический синтез систем с управлением по выходу и воздействиям [3, 4]. Так как обе эти задачи решает робот ведущий, то далее рассматривается он один; полученный алгоритм он передает в системы управления роботов, членов его группы.

### Постановка задачи

Предположим, группа включает  $N_{гр}$  роботов, каждый из которых описывается уравнениями

---

\* Исследования выполнены при поддержке РФФИ, проекты 16-29-04194, 17-29-07054, 19-08-01226.

$$\dot{x} = Hx + hu, \quad y = k^T x + d u, \quad (1)$$

где  $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$  – вектор состояния;  $u = u(x)$  и  $y = y(x, u)$  – управление и выходная переменная некоторого робота;  $H, h, k$  и  $d$  – числовые матрицы, векторы соответствующих размерностей и число. Порядок  $n$  робота (1) и его параметры являются априори неизвестными. При этом значение  $n$  всех роботов группы не превышает заранее известного значения  $n_{\max}$ , а система уравнений (1) является полной [4].

Задача идентификации заключается в определении передаточных функций  $W_{yu}(p) = y(p)/u(p)$  однотипных роботов группы. Для этой цели применяются пробные управления  $u(t) = u_0 1(t)$ , которые можно представить как последовательность прямоугольных импульсов с амплитудой  $u_0$  и длительностью равной периоду дискретизации  $T_{\text{ди}}$ . Это позволяет ввести дискретно-подобные объекты (ДПО) следующего вида:

$$\tilde{x}_k = \tilde{H}\tilde{x}_k + \tilde{h}\tilde{u}_k, \quad \tilde{y}_k = \tilde{k}\tilde{x}_k + \tilde{d}\tilde{u}_k. \quad (2)$$

Здесь предполагается, что при  $u(t) = u_0 1(t)$ , всех  $t = kT_{\text{ди}}$  и  $x_0 = 0$ ,  $\tilde{x}_0 = 0$  выполняются условия

$$\tilde{u}_k = u_0(kT_{\text{ди}}), \quad \tilde{y}_k = y(kT_{\text{ди}}), \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

В силу условий (3) по дискретным значениям  $y(kT_{\text{ди}})$  реакции идентифицируемого робота на пробные управления  $u_0 1(t)$  можно найти значения марковских параметров соответствующего ДПО (2), которые позволяют найти его передаточную функцию  $\tilde{W}_{\tilde{y}\tilde{u}}(z) = \tilde{y}(z)/\tilde{u}(z)$ . Аналогично условия (3) также обеспечивают (но лишь при определенных условиях) аналитическое определение по  $\tilde{W}_{\tilde{y}\tilde{u}}(z)$  передаточной функции  $W_{yu}(p)$ , которая описывает роботы группы в сложившихся условиях. Обычно последняя получается как отношение полиномов от  $p$ , т.е.  $W_{yu}(p) = H_0(p)/H(p)$ . Математические соотношения, позволяющие осуществить указанные операции, составляют алгоритмическую основу марковского алгоритма идентификации, подробно изложенного в [3]. Поэтому здесь этот алгоритм не рассматривается.

### Построение адаптивного управления

Параметры этого управления вычисляются на основе полиномов  $H_0(p)$  и  $H(p)$ , полученных в результате решения задачи идентификации. При этом предполагается, что в памяти контроллера ведущего робота содержатся таблицы стандартных нормированных передаточных функций (СНПФ), приведенные, например, в [4. С. 344–346]. Здесь же хранится информация о требуемых показателях качества систем управления: порядок астатизма  $v_g^*$  к

задающему воздействию  $g = g(t)$ ; допустимые значения: длительности переходного процесса  $t_{\text{пн}}^*$  с; перерегулирования  $\sigma^*$  % ; степени устойчивости  $\eta_{\text{sys}}^*$  ; относительного порядка  $\mu_{\text{ay}}^* = 1$  и параметра алгоритма  $\tau_0$  .

Рассмотрим более простой вариант аналитического синтеза, который используется, если  $\text{Re } p_i^{H_0} \leq -\eta_{\text{sys}}^*$  ,  $i = \overline{1, \deg H_0(p)}$  . В противном случае применяется также аналитический вариант, изложенный в [4. С. 177–180]. В результате выполнения процедуры синтеза вычисляются все коэффициенты полиномов:  $R(p)$ ,  $Q(p)$  и  $L(p)$  . Затем выполняется преобразование

$$W_{\text{уг}}(z) = \frac{z-1}{z} Z_T \left\{ \frac{Q(p)}{pR(p)} \right\}, \quad W_{\text{уы}}(z) = \frac{z-1}{z} Z_T \left\{ \frac{L(p)}{pR(p)} \right\}. \quad (4)$$

Здесь  $Z_T\{\cdot\} - z_T$  – преобразование, выполняемое численным путем при  $T = T_{\text{ay}}$  [4]. На основе полученных в результате преобразования (4) полиномов  $\hat{R}(z)$ ,  $\hat{Q}(z)$  и  $\hat{L}(z)$  записываются уравнения

$$(z-1)^y u(z) = w(z), \quad \hat{R}(z)w(z) = \hat{Q}(z)g(z) - \hat{L}(z)y(z),$$

в которых переход к оригиналам даёт искомый алгоритм адаптивного управления в сложившихся условиях. Этот алгоритм ведущий робот передает по каналам связи в системы управления роботов своей группы.

### Заключение

Таким образом, предложенные методы идентификации и аналитического синтеза позволяют ведущему роботу находить новые адаптивные алгоритмы управления, при существенных изменениях как параметров роботов, так и условий их функционирования. Тем самым обеспечивается эффективное функционирование всей группы роботов при наличии априорных неопределенностей.

1. Капустян, С.Г. Децентрализованный метод коллективного распределения целей в группе роботов [Текст] / С.Г. Капустян // Известия вузов. Электроника. – 2006. – № 2. – С. 84–91.
2. Каляев, И.А. Управление группой БЛА в задаче формирования строя [Текст] / И.А. Каляев, А.Р. Гайдук, С.Г. Капустян // Робототехника и техническая кибернетика. – 2014. – № 4(5). – С. 28–39.
3. Гайдук, А.Р. Интеллектуальное управление мобильными роботами в условиях неопределенности [Текст] / А.Р. Гайдук, С.Г. Капустян, М.Ю. Медведев, А.А. Дьяченко, И.О. Шаповалов // 10-я Всероссийская мультиконференция (Дивноморское, Геленджик): материалы мультиконференции. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ. – 2017. – Т. 2. – С. 253–255.
4. Гайдук, А.Р. Теория и методы аналитических систем автоматического управления (Полиномиальный подход) [Текст] / А.Р. Гайдук. – Москва: Физматлит, 2012. 415 с.

**КОМПЛЕКСНЫЙ МНОГОЦЕЛЕВОЙ МОНИТОРИНГ ГРУППОЙ  
АВТОНОМНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ\***

*Институт динамики систем и теории управления СО РАН, г. Иркутск,  
gorthauers@gmail.com*

Актуальность проблемы управления автономными транспортными средствами (роботами) в процессе выполнения сложных групповых миссий подтверждается большим числом исследований, проводимых в странах Западной Европы, США, Японии, Китае и России. В ситуациях, когда требуется обеспечить мониторинг некоторого региона при нехватке времени или ресурсов на развертывание сети статического наблюдения, использование группы автономных транспортных средств (АТС) позволяет добиться оперативного освещения обстановки в представляющих интерес областях. При этом неизбежно возникает задача распределения заданий и планирования маршрутов, когда каждому роботу в группе должен быть поставлен в соответствие ряд обследовательских работ в разных областях региона. В том случае, когда требуется проведение непрерывного мониторинга на длительном промежутке времени, выполнение подобных работ приобретает регулярный характер [1], что приводит к значительному усложнению задачи групповой маршрутизации. Такая задача планирования, когда заданное множество целей должно регулярно посещаться роботами с заданной частотой и при действующих ограничениях, совмещает в себе сразу несколько известных NP-трудных транспортных задач: систематического наблюдения [2], энергоэффективной маршрутизации [3], задачи мультикоммивояжера и ряда других вариаций классической задачи маршрутизации транспорта. В то же время, в зависимости от вида выполняемых задач, конструктивных особенностей АТС и специфики среды функционирования, на работу группы может накладываться целый ряд дополнительных, зачастую нетривиальных пространственно-временных и технических ограничений. Такие задачи маршрутизации, объединяющие в себе целый спектр различных ограничений и требований, в современной литературе принято относить к широкому классу комплексных задач маршрутизации [4]. Решение именно таких сложных постановок, позволяющих осуществлять детализированное моделирование реальных ситуаций, на данный момент представляет наибольший практический и научно-исследовательский интерес.

---

\* Работа выполнена при поддержке проекта РНФ №16-11-00053.

### Постановка задачи маршрутизации

В общем случае, миссии АТС по многоцелевому мониторингу состоят в посещении и обследовании (проведении ряда работ) группой мобильных роботов заданного множества целей с рекомендуемой частотой на длительном отрезке времени. Задача маршрутизации группы при этом заключается в построении допустимого группового маршрута, обеспечивающего, насколько это возможно, своевременное обследование всех целей роботами при действующих ограничениях.

Обозначим через  $T$  общую длительность всей миссии.

Пусть миссия включает  $n$  целей (заданий), расположенных в рамках обозначенной области. Каждой цели поставлен в соответствие набор параметров, описывающих ее местоположение и тип:

- идентификационный номер цели  $i$ ;
- расположение цели в пространстве  $\langle (x_i^S, y_i^S, z_i^S), (x_i^F, y_i^F, z_i^F) \rangle$  – координаты начала и завершения проведения работ;
- периодичность цели  $p_i \in N$  – требуемая длительность временного промежутка между двумя последовательными посещениями цели роботами группы;
- строгий или нестрогий тип цели  $t_i \in \{1,2\}$ , в зависимости от того, допускается ли преждевременное обследование цели в случае прибытия АТС ранее требуемого срока;
- минимальное количество роботов  $l_i \in \{1,2, \dots, n\}$ , требуемое для обследования цели;
- длительность разового обследования цели группой из  $l_i$  АТС;
- возможность  $e_i \in \{0,1\}$  ускоренного обследования цели в случае участия дополнительного количества АТС  $a > l_i$ .

Пусть группа автономных транспортных средств, выполняющая миссию, состоит из  $m$  функционально идентичных роботов, которые могут различаться между собой своей крейсерской скоростью  $v_j$ . В данной работе не рассматриваются вопросы, связанные с ограниченной емкостью аккумуляторных батарей: подразумевается, что каждый раз при разрядке робота из действующей группы производится его незамедлительная замена на аналогичное АТС с полной батареей.

Поскольку все цели миссии расположены в рамках ограниченного региона и могут быть представлены в виде сети, где каждый узел будет соответствовать одной из целей миссии, мы можем напрямую перейти к решению задачи маршрутизации транспорта на графе. В этом случае каждому ребру графа присваивается значение его веса – длина траектории, соответствующая кратчайшему пути между двумя смежными целями. Таким образом, итоговый полносвязный граф  $G$  будет представлять собой “дорожную карту” текущей многозадачной миссии.

## Гибридный эволюционный подход к маршрутизации

Класс комплексных задач маршрутизации является чрезвычайно трудным, что объясняет эвристическую природу большинства подходов, используемых для его решения. Наиболее эффективные из них объединяют структуры метаэвристик со сложными стратегиями поиска по окрестностям и принципами работы точных методов. Согласно представленным в литературе исследованиям [5, 6], гибридные эволюционные алгоритмы позволяют находить близкие к оптимальным решения с лучшей масштабируемостью и за лучшее время, чем в среднем любые другие эвристические и метаэвристические подходы.

В связи с этим в качестве подхода к эффективному планированию маршрутов группы АТС предлагается использовать оригинальную модификацию эволюционного алгоритма. Структура разработанной модификации включает в себя набор оригинальных конструктивных эвристик и эвристик улучшения, процедуру продвинутого локального поиска, а также набор дополнительных алгоритмических схем, направленных на повышение эффективности работы алгоритма в условиях большой размерности задачи и жестких пространственно-временных ограничений.

Общая эффективность разработанного подхода обеспечивается сочетанием работы генетических операторов, учитывающих специфику задачи, с правильно подобранными методами локального поиска и интеллектуальной балансировкой между исследованием пространства поиска и его разработкой, что позволяет избежать преждевременной сходимости алгоритма. Произведена программная реализация разработанного подхода, проведены расчеты на тестовом наборе задач.

1. *Dunbabin, M.* Robots for environmental monitoring: Significant advancements and applications / M. Dunbabin, L. Marques // IEEE Robotics and Automation Magazine. – 2012. – Vol. 19. – No. 1. – P. 24–39.
2. *Fargeas, J.L.* Persistent visitation under revisit constraints / J.L. Fargeas, B. Hyun, P. Kabamba, A. Girard // 2013 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). – 2013. – P. 952–957.
3. *Afshar-Bakeshloo, M.* A green vehicle routing problem with customer satisfaction criteria / M. Afshar-Bakeshloo, A. Mehrabi, H. Safari etc. // Journal of Industrial Engineering International. – 2016. – Vol. 12. – No. 4. – P. 529–544.
4. *Hartl, R.F.* Special Issue on Rich Vehicle Routing Problems / R.F. Hartl, G. Hasle, G.K. Janssens // Central European Journal of Operations Research. – 2006. – Vol. 14. – No. 2. – P. 103–104.
5. *Laporte, G.* Chapter 4: Heuristics for the Vehicle Routing Problem / G. Laporte, S. Ropke, T. Vidal // Vehicle Routing. – 2014. – P. 87–116.
6. *Koc C., Bektas T., Jabali O., Laporte G.* Thirty years of heterogeneous vehicle routing // European Journal of Operational Research. – 2016. – Vol. 249. – No. 1. – P. 1–21.

## АНАЛИТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ДИСКРЕТНОГО СТОХАСТИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ НЕЛИНЕЙНОГО ОБЪЕКТА\*

*Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург,  
skolesnikova@yandex.ru*

### Введение в проблему и постановка задачи

Рассматривается задача управления нелинейным объектом, описание которого задано в виде системы стохастических разностных уравнений [1 – 4].

Предлагается новый метод аналитического конструирования стохастической системы управления, концептуальную базу которого составляют детерминированный метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов [4] и стратегии управления, минимизирующие дисперсию выходной переменной [2, 3].

### Постановка задачи

Задано вероятностное пространство  $(\Omega, \mathcal{F}, (\mathcal{F}_k)_{k \geq 0}, \mathbf{P})$ ,  $\mathcal{F}_k = \sigma\{\xi[t] = (\xi_1[t], \dots, \xi_m[t]), t \leq k\}$  и последовательности независимых одинаково распределенных некоррелированных случайных величин  $\{\xi_i[t]\}_{t \geq 0}$ ,  $i = \overline{1, m_1}$ ,  $m_1 \leq n$ ;  $\mathbf{E}\{\xi_i[t]\} = 0$ ,  $\mathbf{D}\{\xi_i[t]\} = \sigma_i^2$ ,  $t \geq 0$ .

Стохастический векторный объект управления  $\mathbf{X}[t] = (X_1[t], \dots, X_n[t])$  имеет описание:

$$\mathbf{X}[t+1] = \mathbf{F}[t] + \mathbf{u}[t] + \xi[t+1] + c\xi[t], \quad (1)$$

$\mathbf{F}[t] := \mathbf{F}(\mathbf{X}[t]) \in \mathbf{R}^n$ ,  $\mathbf{u} \in \mathbf{R}^m$ ,  $m \leq n$ ,  $\xi \in \mathbf{R}^l$ ,  $l \leq n$ ,  $0 < c < 1$ ,  $t \in \{0, 1, \dots\}$  – нелинейная функция, управление, шум, постоянный коэффициент, дискретная переменная времени соответственно.

Требуется определить закон управления  $\mathbf{u}$ , обеспечивающий выполнение следующих свойств системы управления:

- 1)  $\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{E}\{\psi[t]\} = 0$ , где  $\psi[t] = \Psi(\mathbf{X}[t]) \in \mathbf{R}^m$  – некоторая заданная векторная функция, выражающая свойства целевой системы;
- 2)  $\mathbf{E}\{\psi_j[t]\} = 0$ ,  $\mathbf{E}\{\psi_j[t+1] + \lambda_j \psi_j[t]\} = 0$ ,  $j = \overline{1, m}$ ,  $t \rightarrow \infty$ ;

\* Исследование выполнено при поддержке РФФИ № 17-08-00920.

- 3) минимум дисперсии величин  $\Psi[t+1] + \lambda\Psi[t]$ ,  $\mathbf{X}[t]$ ,  $t \rightarrow \infty$ ;  
 $\mathbf{D}\{\Psi_j[t+1] + \lambda_j\Psi_j[t]\} \rightarrow \min$ ,  $\mathbf{D}\{\mathbf{X}[t]\} \rightarrow \min$ ,  $j = \overline{1, m}$ ,  $t \rightarrow \infty$ ;

- 4) минимум среднего значения функционала качества:

$$\Phi = \sum_{t=0}^{\infty} \sum_{j=1}^m \left( \alpha_j^2 (\Psi_j[t])^2 + (\Delta\Psi_j[t])^2 \right). \quad (2)$$

Коэффициенты  $\alpha_j, \lambda_j$ ,  $j = \overline{1, m}$  являются параметрами синтезируемой системы управления, имеют содержательный смысл и связаны между собой определенной в [4] зависимостью.

### Решение задачи

Основные положения построения стохастической дискретной системы управления нелинейным объектом среди АКАР-стратегий, минимизирующих дисперсию, оформим в виде следующего алгоритма.

1. Формирование структуры управления в соответствии с классическим методом аналитического конструирования агрегированных регуляторов [4] в предположении полной определенности в описании (известен закон изменения шумов). Переменные управления на этом этапе обозначим через  $\hat{\mathbf{u}}^A[t]$ ,  $t \in \{0, 1, \dots\}$ .

2. Определение условного математического ожидания  $\hat{\mathbf{u}}[t] = \mathbf{E}\{\hat{\mathbf{u}}^A[t] | \xi^t\}$ , где  $\xi^t = (\xi[t], \xi[t-1], \dots, \xi[0])$ ,  $\xi[t] = (\xi_1[t], \dots, \xi_n[t])$ .

Осуществимость этой операции обусловлена особенностями детерминированного АКАР-синтеза (1-го этап) и исходными предположениями в описании (1) с учетом попарной независимости случайных величин  $\xi_i[t], \xi_j[t], X_i[t], X_j[t], i \neq j$ ;  $n$  – размерность объекта (1).

*Замечание.* В условиях независимых шумов  $\{\xi_i[t]\}_{t \geq 0}$  управление  $\mathbf{u}[t]$  будет определяться совокупностью величин  $\{\mathbf{X}[s]\}_{s=0, t}^{\infty}, \{\mathbf{u}[s]\}_{s=0, t-1}^{\infty}$ , или  $\mathbf{u}[t] = \mathbf{U}(\mathbf{X}[t], \mathbf{X}[t-1], \dots, \mathbf{X}[0]; \mathbf{u}[t-1], \mathbf{u}[t-2], \dots, \mathbf{u}[0])$ ,  $t \in \{0, 1, \dots\}$ .

Здесь переменная  $\hat{\mathbf{u}}[t]$  зависит от случайной величины  $\xi[t]$ .

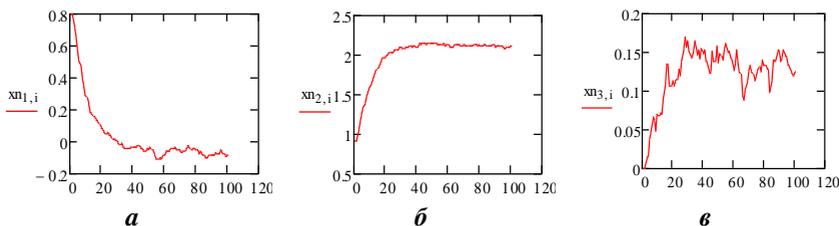
3. Исключение переменной  $\xi[t]$  из выражения  $\mathbf{E}\{\hat{\mathbf{u}}^A[t] | \xi^t\}$  на основе декомпозиции исходного уравнения (1) и уравнений  $\Psi_j[t+1] + \lambda_j\Psi_j[t] = 0$ ,  $j = \overline{1, m}$  (левых частей уравнений Эйлера–Лагранжа для функционала (2)). Синтез стохастического регулятора со свойствами 1) – 4) закончен.

### Иллюстративный пример

Применение представленного алгоритма для решения задачи управления движением центра масс подвижного объекта, поведение которого описывается системой разностных стохастических векторных уравнений

$$\begin{aligned} x_1[t+1] &= x_1[t] + \tau x_2[t], \\ x_2[t+1] &= x_2[t] + \tau a q(x_1[t], x_2[t]) + \tau a u[t] + \xi[t+1] + c \xi[t], \end{aligned} \quad (3)$$

где  $q, u \in R^3, x_1[t] \in R^3, x_2[t] \in R^3, u \in R^3, a = m^{-1}, m = \|m_{ij}\|_{3 \times 3}$  (числовая матрица); случайные величины при фиксированном  $t \{ \xi[t] \}_{t \geq 0}, t \in \{0, 1, \dots\}$  и постоянная  $c$  обладают теми же свойствами, что и при описании объекта (1);  $q(x_1[t], x_2[t])$  – известная векторная функция;  $\tau$  – коэффициент пропорциональности, связанный с процессом дискретизации непрерывного объекта, привело к системе управления, результаты моделирования которой представлены на рис. 1.



**Рис. 1. Качество переходных процессов с заданными значениями  $x_1^* = (-0,057; 2,129; 0,14)$  для целевой переменной  $x_1 = (x_{11}, x_{12}, x_{13})$  из (3): а –  $x_{11}[t]$ ; б –  $x_{12}[t]$ ; в –  $x_{13}[t]$  с уровнем шума  $\sigma = 0,1$**

В докладе обсуждаются свойства стохастического регулятора и границы его применимости.

1. *Astroem, K.J.* Adaptive control / K.J. Astroem, B. Wittenmark. – New York: Dover Publications, 2008.
2. *Острем, К.Ю.* Введение в стохастическую теорию управления [Текст] / К.Ю. Острем. – Москва: Мир, 1973.
3. *Kolesnikova, S.I.* Multiple-control system for nonlinear stochastic discrete object / S.I. Kolesnikova // Optimization Methods and Software. – 2018. – №3 (34). – P. 578–585.
4. *Колесников, А.А.* Синергетика и проблемы теории управления [Текст]: сборник научных трудов / А.А. Колесников; под ред. А.А. Колесникова. – Москва: Физматлит, 2004.

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ  
В СЛОЖНОФОРМАЛИЗУЕМЫХ ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ\***

*Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский  
институт робототехники и технической кибернетики,  
г. Санкт-Петербург,  
alexab@rtc.ru*

Несмотря на огромные достижения в области автоматизации, до сих пор существуют сферы человеческой деятельности, автоматизация которых либо крайне неэффективна, либо вообще не представляется возможной, когда, казалось бы, весьма несложные операции (с которыми легко справляется любой малоквалифицированный персонал) вообще не поддаются автоматизации. Заполнить многие из таких «свободных от автоматизации ниш» могли бы высокоадаптивные и автономные мобильные роботы (МР).

«Интеллектуализация» МР является важнейшим направлением развития МР. Под этим термином здесь понимается повышение уровня адаптивности МР к сложным быстроизменяющимся внешним условиям или повышение степени независимости (автономности) процесса функционирования МР от человека-оператора. С увеличением степени автономности МР упрощается процесс управления роботом, уменьшается отрицательное влияние человеческого фактора, возрастает общая эффективность от применения МР. Основные трудности при этом состоят в создании алгоритмического обеспечения, позволяющего автоматически управлять движением роботов.

Учитывая успехи алгоритмов глубокого обучения в различных сложноформализуемых задачах, было решено проанализировать и сравнить различные нейросетевые подходы к синтезу алгоритмов управления автономными МР.

Таким образом, актуальность задачи создания алгоритмов системы управления МР на основе нейронных сетей, с одной стороны, определяется востребованностью автономных МР, с другой – отсутствием эффективных алгоритмов, способных автономно решать плохо формализуемую задачу управления автономным МР в различных средах.

Обучение с подкреплением – один из способов машинного обучения, в ходе которого испытуемая система обучается, взаимодействуя с некоторой средой. То есть для создания алгоритма управления нет необ-

---

\* Работа проводилась в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 075-00924-19-00 “Разработка и исследование новых архитектур реконфигурируемых растущих нейронных сетей, методов и алгоритмов их обучения”.

ходимости формализовать систему и способ решения. Достаточно описать целевую функцию, которая в общем виде будет описывать задачу.

Для проведения эксперимента были взяты следующие алгоритмы обучения с подкреплением с аналоговым управлением:

- DDPG [1];
- PPO [2];
- TRPO [3],

а также 4 алгоритма с дискретным управлением:

- CEM [4];
- DQN [1];
- DUEL DQN [5];
- SARSA [6].

Для сравнения алгоритмов обучения с подкреплением были проведены эксперименты: отдельно для дискретного управления и отдельно для аналогового. Данное разделение обусловлено наличием различных методов для двух типов управления. Для дискретного управления решалась задача равновесия обратного маятника, а для аналогового управления – задача равновесия двойного обратного маятника. Оба класса алгоритмов сравнены по одинаковым критериям. Скорость обучения определяется по эпизоду, на котором алгоритм достигает максимальной награды. Чем меньше это значение, тем быстрее алгоритм обучается. Лучший результат определяет качество работы алгоритма. Чем выше значение данного критерия, тем лучше качество. Критерий стабильность отвечает за степень переобучения алгоритма. Если значение да, то в проведенном эксперименте качество алгоритма после прохождения лучшего результата падало. Количество обучаемых параметров влияет на скорость обучения. Чем больше параметров, тем дольше будет учиться алгоритм, при прочих равных условиях. По результатам экспериментов составлена сравнительная табл. 1.

*Таблица 1*

**Сравнение алгоритмов обучения с подкреплением**

Алгоритм	Скорость обучения	Лучший результат	Стабильность	Количество обучаемых параметров	Тип управления
CEM	2500	35	Да	658	Дискретное
DQN	80	200	Да	658	Дискретное
DUEL DQN	140	200	Да	658	Дискретное
SARSA	450	160	Нет	658	Дискретное
DDPG	1500	2800	Нет	9000	Аналоговое
PPO	4200	7500	Да	4485	Аналоговое
TRPO	3000	6200	Да	4485	Аналоговое

По результатам проведённого эксперимента установлено, что лучшими методами обучения с подкреплением для дискретного управления являются DQN и Duel DQN, показавшие схожие результаты. Алгоритм DQN обучился достаточно быстро – ему потребовалось на 60 эпизодов меньше, чем Duel DQN, поэтому можно заключить, что алгоритм DQN является лучшим в рамках этого эксперимента. Для аналогового управления самую большую скорость обучения показал алгоритм DDPG, но его максимальный результат в 2,2 раза меньше, чем результат TRPO, и в 2,7 раза меньше, чем результат PPO. Алгоритмы PPO и TRPO не были переобучены за 4500 эпизодов, в то время как DDPG начал переобучаться сразу после своего максимального значения, после 1500 эпизодов. Лучшими алгоритмами для аналогового управления являются алгоритмы PPO и TRPO, если основным является критерий качества, а если главным является скорость обучения, то DDPG.

1. *Николенко, С.И.* Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей [Текст] / С.И. Николенко. – Санкт-Петербург: Питер, 2018. – 480 с.
2. *Schulman, J.* Proximal Policy Optimization Algorithms / J. Schulman, F. Wolski, P. Dhariwal, A. Radford, O. Klimov // arXiv:1707.06347v2. – 2017.
3. *Schulman, J.* Trust Region Policy Optimization / J. Schulman, S. Levine // arXiv:1502.05477v5. – 2017.
4. *Kroese, D.P.* Cross-Entropy Method / D.P. Kroese // arXiv:1503.01842v1. – 2015.
5. *Wang, Z.* Reinforcement Learning : An Introduction / Z. Wang T. Schaul // arxiv.org:1511.06581. – 2016.
6. *Sutton, R.* Dueling Network Architectures for Deep Reinforcement Learning / R.Sutton, A.Barto // The MIT Press. – 2017.

*Ю.Н. Макаров<sup>1</sup>, И.С. Рубцов<sup>2</sup>, В.Б. Носиков<sup>2</sup>, В.В. Семёнов<sup>2</sup>,  
Е.С. Юрцев<sup>2</sup>, В.Д. Ходжаев<sup>3</sup>, Н.А. Шушкевич<sup>3</sup>, В.Н. Бойкачёв<sup>4</sup>*

**МОДЕЛИ СЕТЕВОГО УПРАВЛЕНИЯ ЦИФРОВЫХ  
ПРОИЗВОДСТВ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МОДУЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ  
ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ  
РОБОТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ И ДРУГОЙ  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗИРОВАННОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ  
НАУЧНОГО И НАРОДНО-ХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

<sup>1</sup>Госкорпорация «Роскосмос», <sup>2</sup>ФГУП «НПО «Техномаш»,  
<sup>3</sup>ОАО «НИИ ТП» РКС, <sup>4</sup>АНО НТЦ «Техком», г. Москва,  
*Y.Arhangelskaya@tmnp.ru*

В настоящее время актуальными стали проблемы исследований и разработки современных технологий, обеспечивающих проведение цифрового имитационного моделирования процессов функционирова-

ния производственного комплекса на этапах изготовления и развертывания рядов крупногабаритных трансформируемых конструкций модульных защитных экранов космического назначения, обеспечивающих защиту космических аппаратов (КА) от столкновений с элементами космического мусора (КМ) и метеороидами.

Проблемными, в первую очередь, являются задачи исследований и разработки технологий преобразования графических информационных моделей, описывающих поэтапное преобразование заготовок и сырья в детали, затем деталей в сборочные единицы, типовые модули защитных экранов и законченные конструктивно-функциональные модули для сборки, монтажа и фиксации финальных изделий ракетно-космической техники (РКТ), в соответствующие цифровые модели процессов изготовления крупногабаритных трансформируемых модулей защитных экранов (ТМЗЭ) для перспективных КА различного назначения. Опыт показывает, что эти задачи существенно упрощаются, если КА построены на основе унифицированных базовых несущих конструкций по «коаксиально-контейнерному» принципу.

Следующей сложной проблемой является обоснование основных требований к разрабатываемым цифровым моделям процессов функционирования производственного комплекса на этапах изготовления и развертывания ТМЗЭ-РКТ являются модели сетевого управления цифровых производств космического базирования для изготовления крупногабаритных сверхлёгких базовых несущих конструкций перспективных изделий РКТ.

Цифровые модели сетевого управления процессами функционирования наземного и космического сегментов производственного комплекса должны отражать инженерные аспекты, необходимые для более детальной проработки ряда типовых задач технологической подготовки производства (ТПП): выбор поверхностей базирования; определение точности и надежности базирования в зависимости от вида обработки и т.д.

Решение этих задач, в свою очередь, упростит некоторые проблемы организации и управления процессами технологической подготовки производства, обеспечивающих выбор, проектирование, изготовление, комплектацию и эксплуатацию парка технологического оборудования, технологической оснастки и средств технологического оснащения процессов технического контроля и испытаний.

Таким образом, инновационные решения для производства вновь создаваемых рядов ТМЗЭ-РКТ начинают проявляться на этапах подготовки и выбора цифровых моделей конструктивно-технологических решений по облику самого изделия РКТ, а также планируемых моделей сетевого управления цифровым космическим

производством для изготовления крупногабаритных элементов базовых несущих конструкций (БНК).

Приоритет здесь за выбранными вариантами этапов финального производства рядов ТМЗЭ-РКТ в космосе. Оно предполагается полностью автоматическим, только при частичной экспертной поддержке технологов и разработчиков с Земли. Именно эти нюансы отражают выбор модели сетевого управления цифровых космических производств для сквозной отраслевой системы автоматизированного проектирования и ТПП крупногабаритных образцов ТМЗЭ-РКТ для конкретных типов КА и других перспективных изделий РКТ, изготавливаемых в наземном и космическом сегментах комбинированного производства. К таким цифровым моделям инновационных конструктивно-технологических решений по облику ТМЗЭ-РКТ и его цифрового производства можно отнести, например, следующие:

Во-первых, цифровые модели сетевого управления космическими производственными роботизированными комплексами (КПРК), описывающие или (и) поясняющие инновационные производственные процессы, реализуемые в космосе при автоматическом изготовлении и сборке компонентов ТМЗЭ-РКТ, а также изделия РКТ в целом.

Во-вторых, цифровые модели сетевого управления встроенными распределенными датчиками и датчиковой аппаратурой, используемыми как в технологических целях, так и в интересах повышения эффективности управления функционированием (манипуляцией) элементов БНК крупногабаритных ТМЗЭ-РКТ на этапах сборки, штатной эксплуатации, обслуживания и ремонта на космической орбите.

В-третьих, цифровые модели, описывающие процессы сетевого управления новыми технологическими процессами и процедурами изготовления типовых модулей бронезащиты со встроенной матричной датчиковой аппаратурой, линиями передачи данных и электропитания, а также средств «электронной паспортизации» и диагностики. Такой выбор здесь определяется принципиально новыми возможностями интеллектуализации конструктивно-функциональных элементов и систем бронезащиты перспективных КА, изделий РКТ различного назначения и другой высокотехнологичной продукции.

## **ВЫБОР МУЛЬТИАГЕНТНОЙ АРХИТЕКТУРЫ ПРИ РАЗРАБОТКЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМ НЕОБИТАЕМЫМ ПОДВОДНЫМ АППАРАТОМ\***

*АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», г. Санкт-Петербург,  
martynowa999@bk.ru*

При разработке и проектировании системы управления автономно-го необитаемого подводного аппарата (АНПА) с использованием мультиагентной технологии остро стоит вопрос выбора наиболее подходящей разновидности архитектуры мультиагентной системы управления из их широкого разнообразия [1 – 3].

В зарубежной литературе описан общий подход к выбору наиболее подходящей разновидности архитектуры системы управления робота [3,4]. Однако АНПА представляет собой морской робототехнический комплекс, особенностью которого является чрезвычайная сложность всех его систем из-за отсутствия навигации по спутниковым сигналам, ограниченности гидроакустической подводной связи и существенного влияния внешней среды на функционирование АНПА. В связи с этим задача выбора разновидности архитектуры мультиагентной системы управления АНПА является актуальной.

**Целью работы** на основе обобщения зарубежного опыта явилось формирование подхода к выбору наиболее подходящей разновидности архитектуры мультиагентной системы управления АНПА с учетом конкретных целевых задач, стоящих перед АНПА.

Для выбора наиболее подходящей разновидности архитектуры, прежде всего, формируются основные критерии выбора, основанные на нефункциональных требованиях (non-functional requirement – NFR) [6], которым должна удовлетворять архитектура мультиагентной системы управления АНПА в зависимости от задач, стоящих перед АНПА. Такими критериями являются координация, предсказуемость, отказоустойчивость, масштабируемость, адаптивность, безопасность, реальное время [4]. Затем для каждой разновидности рассматриваемой альтернативной архитектуры формируются характеристики, которые могут оказать как положительное, так и отрицательное влияние на критерий [4]. Например, для хорошей координации агентов между собой необходимо взаимодействие между агентами, однако в многоуровневой архитектуре команды и транзакции часто могут пропускать промежуточные уровни, что приво-

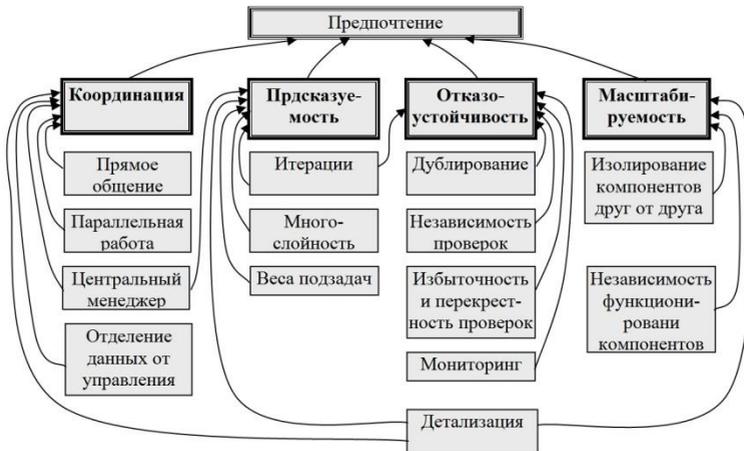
---

\* Работа выполнена при поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований (проекты №17-08-00666, №19-08-00253).

дит к нарушению координации между агентами. В архитектуре «Дерево задач» агенты работают параллельно, однако при этом имеют слабую возможность взаимодействия друг с другом для координации. Сформированные характеристики, в свою очередь, также могут зависеть от характеристик более низкого уровня, например, координация зависит от прямого общения между агентами, как это было отмечено выше.

Основные критерии и сформированные иерархически расположенные характеристики выстраивают в виде графа. При переходе из одного узла в другой задаются качественные или количественные оценки: при положительном влиянии – с плюсом, при отрицательном влиянии – с минусом. Далее последовательно применяется алгоритм распространения меток (the Label Propagation algorithm – LPA) [7], позволяющий находить сообщества в графе, используя только сетевую структуру в качестве руководства и не требуя заранее определенной целевой функции или предварительной информации о сообществах. В результате применения LPA формируется значение каждого критерия по определенным правилам, приведенным в [5]. Тогда по совокупности критериев для каждой разновидности мультиагентной архитектуры формируется итоговая ее оценка, вычисляемая также по определенным правилам. По наиболее высокой оценке делается заключение о преимуществе той или иной разновидности мультиагентной архитектуры.

В качестве примера рассмотрены пять разновидностей архитектур мультиагентных систем: циклическая, многослойная, «Дерево задач», «Структура-5», «Совместное предприятие». Граф критериев и характеристик представлен на рис. 1.



*Рис. 1. Граф критериев и характеристик*

С использованием алгоритма распространения меток проведен расчет итоговой оценки альтернативных архитектур. По полученной оценке оказалось, что наиболее предпочтительной архитектурой является «Структура-5», так как в наибольшей степени удовлетворяет всем заданным критериям.

Описанный подход позволяет качественно и количественно обосновать выбор разновидности архитектуры из их широкого многообразия. Это, в свою очередь, позволяет еще на стадии разработки АНПА определить наиболее подходящую разновидность мультиагентной архитектуры и, тем самым, сократить материальные и вычислительные затраты на разработку системы управления АНПА.

1. *Швецов, А.Н.* Агентно-ориентированные системы: от формальных моделей к промышленным приложениям [Электронный ресурс] / А.Н. Швецов. – URL: <http://www.ict.edu.ru/ft/005656/62333e1-st20.pdf>. (Дата обращения 14.05 2019).
2. Innocenti, Bianca A multi-agent architecture with distribution for an autonomous robot // Universitat de Girona 2009. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/7749/Tbi1de1.pdf;sequence=1>.
3. Mahyuddin M. N., Arshad M. R. Classes of Control Architectures for AUV: A brief survey. [Электронный ресурс]. – URL: [https://pdfs.semanticscholar.org/98ba/1616087ed4a9c4004975af13f158da100b4d.pdf?\\_ga=2.61708011.679009280.1557860521-491194771.1557860521](https://pdfs.semanticscholar.org/98ba/1616087ed4a9c4004975af13f158da100b4d.pdf?_ga=2.61708011.679009280.1557860521-491194771.1557860521).
4. Giorgini P., Kolp M., Mylopoulos J. Multi-agent architectures as organizational structures. [Электронный ресурс]. – URL: [https://www.academia.edu/2731942/Multi-agent\\_architectures\\_as\\_organizational\\_structures](https://www.academia.edu/2731942/Multi-agent_architectures_as_organizational_structures). (Дата обращения 21.04.2019).
5. *Giorgini, P.* Reasoning with goal models / P. Giorgini, J. Mylopoulos, E. Nicchiarelli, R. Sebastiani // In Proceedings of the 21st International Conference on Conceptual Modeling (ER 2002), Tampere, Finland, October 2002, DOI: 10.1007/3-540-45816-6\_22. [Электронный ресурс]. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/226665392\\_Reasoning\\_with\\_Goal\\_Models](https://www.researchgate.net/publication/226665392_Reasoning_with_Goal_Models). (Дата обращения 21.04.2019).
6. Non-functional requirement // Электронный ресурс. – URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Non-functional\\_requirement](https://en.wikipedia.org/wiki/Non-functional_requirement). (Дата обращения 21.04.2019).
7. The Label Propagation algorithm [Электронный ресурс]. – URL: <https://neo4j.com/docs/graph-algorithms/current/algorithms/label-propagation/index.html> (Дата обращения 21.04.2019).

## УПРАВЛЕНИЕ ПЛОСКОЙ МОДЕЛЬЮ СУДНА НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва,  
tot1983@inbox.ru*

### Введение

Уменьшение размеров геодезических приемников и существенное расширение группировки навигационных спутников сделало возможным установку геодезических мультитантенных систем на различные подвижные платформы небольшого размера, способные в автономном режиме проводить длительное время. Одной из таких экспериментальных платформ является судно на воздушной подушке (СВП) для мониторинга береговой линии, т.е. регулярное фотографирование берега с воды из заданных точек с нужной ориентацией и возможностью изменять траекторию движения в реальном времени. Размер данного аппарата позволяет установить мультитантенный GNSS-приемник, позволяющий получать позицию, скорость и ориентацию судна со скоростью 50 гц, без использования акселерометров и магнитометра. Для измерения угловой скорости платформа оснащена гироскопами. Для получения четких снимков, камера закреплена на стабилизируемом подвесе, причем затвор камеры синхронизирован с позицией и ориентацией, выдаваемой GNSS-приемником.

### Постановка задачи

Для описания плоской модели СВП, как правило, [1 – 3] используют систему дифференциальных уравнений, в которой угол, определяющий направление судна  $\theta$ , присутствует в явном виде, что накладывает дополнительные сложности на синтез закона управления, в том случае, когда угол переходит через  $2\pi$ . Чтобы этого избежать, будем использовать уравнение Пуассона для плоского случая. Пусть пара  $q = (x, y) \in R^2$  определяет положение СВП на плоскости, а его ориентация определяется матрицей ориентации  $R = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \in SO(2)$ , тогда движение судна описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\ddot{q} = -\frac{k_1}{m} \dot{q} + (F_1 + F_2)R e_1, \quad \dot{R} = R S_2 \omega, \quad \dot{\omega} = (F_1 - F_2) - k_2/J \omega, \quad (1)$$

где  $S_2 = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ ;  $e_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ ;  $e_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ ;  $m$  – масса;  $k_1, k_2$  – коэффициенты вязкого трения при поступательном и вращательном движении;  $J, \omega$  –

момент инерции и угловая скорость аппарата относительно вертикальной оси;  $F_1, F_2$  – сила тяги правого и левого пропеллеров, причем каждая из них ограничена сверху, т.е. выполняются неравенства  $0 \leq F_1, F_2 \leq F_{max}$ . Кроме того, в силу инерционности пропеллера, желаемая тяга силовой установкой выдается не мгновенно. Простейшая математическая модель, которая описывает разгон и торможение пропеллера, дается следующим дифференциальным уравнением [4]:

$$\dot{F}_i = -k_f(F_i - f_i), k_f = \begin{cases} k_{up}, & (F_i - f_i) < 0, \\ k_{dn}, & (F_i - f_i) \geq 0, \end{cases}$$

где  $k_{up}$  – коэффициент при разгоне;  $k_{dn}$  – коэффициент при торможении;  $f_i$  – управление, подаваемое на мотор. Важная особенность рассматриваемой модели проявляется, если построить область доступных управлений в координатах  $(T, Q)$ , где  $T = F_1 + F_2$ ,  $Q = F_1 - F_2$ . Это ромб, с вершиной в точке  $(0,0)$ . Таким образом, из-за отсутствия реверсного вращения пропеллера, нельзя получить отрицательную тягу, а значит, развернуться на месте.

Наиболее интересны 2 задачи управления для данной модели:

1. Задача следования вдоль допустимой траектории с существенно меняющейся кривизной (применяется при обходе препятствий).
2. Задача выхода в заданные точки с желаемой ориентацией или скоростью (применяется при фотографировании объектов).

### Основной результат

Известно, что (1) является плоской дифференциальной системой [3], а значит, для задания траектории достаточно только части переменных. С другой стороны, часть фазовых состояний систем будет недоступна. Для обоих решений задачи 1 и 2 используется 2-стадийный закон управления: сначала строится желаемая допустимая траектория, а затем синтезируется контролер, обеспечивающий движение по заданной траектории. В силу описанных выше особенностей, наложенных на управление, допустимость траектории сложной формы проверить можно только численно, например [1]. С другой стороны, по аналогии с колесным роботом, для данной модели (1), можно строить в реальном времени допустимые траектории типа: дуга-прямая-дуга или дуга-дуга. Причем, начальное положение и конечное положение аппарата будет гарантированно допустимым, если центр дуги лежит на прямой, перпендикулярной вектору скорости, соответственно в начальной и конечной точках, а сама дуга начинается (заканчивается) в начальной (конечной) точке. Таким образом, задача 2 сводится к задаче 1.

Для формулировки закона управления введем дополнительные переменные:  $r = Re_1$  – текущее направление тяги,  $r^* = T^*/||T^*||$ , – желаемое направление тяги, где  $T^* = \dot{q}^* + \frac{k_1}{m}(\ddot{q} + \dot{q}^*) - \mu^2 \ddot{q} - 2\mu \dot{q}$ .

Закон управления, обеспечивающий выход на заданную траекторию, имеет вид

$$T = (T^{*T}, r),$$

$$\omega_d = \left( \frac{\mu_1}{1+(r^{*T}, r) + \varepsilon_1} + \frac{\dot{\gamma}}{\gamma} \right) (r \times r^*) + (r^* \times r^*),$$

$$Q = \text{sign} \left( \dot{\omega}_d + \frac{k_2}{J\omega} - \mu_2(\omega - \omega_d) \right) \alpha(T),$$

где функция  $\alpha(T) = Q_{max} - \frac{m}{J} \left( T - \frac{T_{max}}{2} \right)$ ,  $Q_{max} = \frac{m}{2J} T_{max}$ ,  $T_{max} = \frac{2F_{max}}{m}$ , обеспечивает согласованное ограничение на управления [3],

$$\gamma = \sqrt{\varepsilon_2 + ||T||^2}, \varepsilon_1, \varepsilon_2 > 0.$$

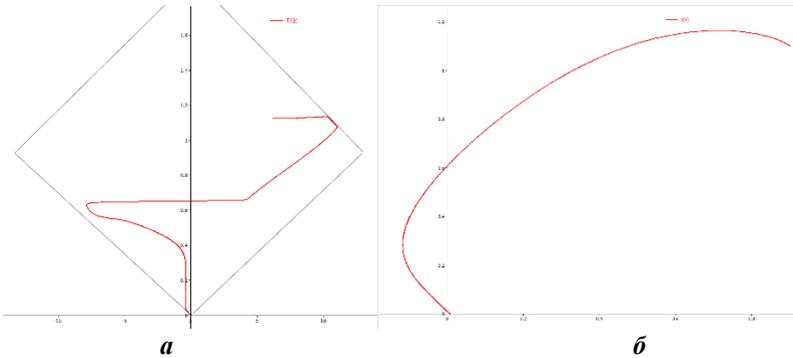


Рис.1. а) Управления  $Q(T)$ . б) Траектория движения СВП  $y(x)$

1. *Milam, M.B.* A new computational approach to real-time trajectory generation for constrained mechanical systems / M.B. Milam, K. Mushambi, R.M. Murray // Proc. of the 39th IEEE Conf. on Decision and Control. – 2000. – Vol. 1. – P. 845–851.
2. *Dunbar, W.B.* Model predictive control of coordinated multi-vehicle formations / W.B. Dunbar and R.M. Murray // In Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control. – 2002. – С. 1–15.
3. *Dunbar, W.B.* Nonlinear and cooperative control of multiple hovercraft with input constraints / W.B. Dunbar, R.O. Saber, and R.M. Murray // Proc. ECC. – 2003, Cambridge, UK. – P. 1917–1922.
4. *Samson, C.* Time sub-optimal nonlinear pi and pid controllers applied to longitudinal headway car control / C. Samson, M.-D. Hua // *Int. J. of Control.* – 2011. – № 10. – С. 1717–1728.

**ПОЛЕТ СТРОЕМ АВТОНОМНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ  
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ САМОЛЕТНОГО ТИПА  
НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ КОНСЕНСУСА  
И НЕЛИНЕЙНОГО УПРАВЛЕНИЯ\***

*Уфимский государственный авиационный  
технический университет, г. Уфа,  
tagir.muslimov@gmail.com*

В последние годы значительно возрос интерес к групповому управлению беспилотными летательными аппаратами (БПЛА), поскольку именно применение групп автономных БПЛА позволяет решать широкий класс задач, недоступных одиночным аппаратам, а также в целом повысить эффективность выполнения их функций.

Приведем классификацию групп БПЛА на основе типов взаимодействий между аппаратами согласно [1]:

- *Непосредственное физическое взаимодействие.* В качестве примера можно привести подъем и транспортирование грузов несколькими БПЛА. Поскольку количество аппаратов в таком случае обычно мало, могут использоваться как централизованные, так и децентрализованные системы управления.
- *Формации.* Аппараты не соединены между собой напрямую, но их относительные положения строго заданы для сохранения формы. Предотвращение столкновений между аппаратами может быть встроено в алгоритмы управления строем. Для данного подхода становится актуальной масштабируемость, и поэтому более предпочтительными становятся децентрализованные алгоритмы управления.
- *Рои аппаратов.* Система из множества БПЛА, алгоритмы взаимодействия между которыми обеспечивают коллективное поведение. Масштабируемость становится главной проблемой в данном подходе, поэтому использование децентрализованных алгоритмов становится обязательным условием.
- *Кооперация.* БПЛА из группы планируют свое движение в соответствии с индивидуальными задачами, которые должны быть распределены для выполнения миссии более высокого порядка в иерархии системы управления. В этом случае такие проблемы, как распределение задач, планирование высокого уровня, разби-

---

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-08-01299.

ение плана на подзадачи, разрешение конфликтов, необходимо решить для выполнения миссии высокого порядка. Соответственно, должны применяться и централизованные, и децентрализованные архитектуры систем управления.

Таким образом, актуальными задачами по-прежнему остаются формирование и поддержание строя БПЛА, особенно для БПЛА самолетного типа, поскольку они обладают неголономной динамикой и, кроме того, скорость их полета ограничена не только сверху, но и снизу (скорость сваливания). Вместе с тем существенны факторы высокой динамики событий и воздействия атмосферных возмущений. Вследствие этого на практике наиболее подходящими для управления как одиночными БПЛА самолетного типа, так и их группами являются такие подходы, в которых ставится задача следования неким образом заранее заданной протяженной траектории, а не выход в конкретную точку за конечное время.

Корни задачи полета строем БПЛА самолетного типа уходят в проблему автоматического полета строем пилотируемых самолетов, обычно истребителей. Данные вопросы рассматривались, например, еще в 60 – 80-е гг. XX в. в работах [2, 3]. В частности, в [2] анализируется строй самолетов вида «кильватер», при этом структура взаимодействия строя самолетов, для которого проводится моделирование, представляет собой схему «ведущий-ведомый» в виде односторонней направленной «открытой цепи» с отсутствием обратной связи от «ведомых» к впередиляющим самолетам. Соответственно, желаемая дистанция задается только на «ведущем» самолете, при этом команда управления от «ведущего» передается к последнему «ведомому» по цепочке через все предыдущие «ведомые». С учетом инерционности летательных аппаратов это приводит к возникновению колебаний по отношению к средней дистанции между самолетами, причем чем дальше «ведомый» самолет находится от «ведущего», тем более значительно будут проявляться данные колебания (на первом «ведомом» они практически не обнаруживаются), что в результате налагает значительные ограничения на масштабируемость системы.

Следовательно, для формирования строя БПЛА становится важным развитие методов управления на основе децентрализованной архитектуры взаимодействия с отсутствующих «ведущим» (аппаратом-лидером). Одним из направлений исследований в области децентрализованного управления является подход на основе консенсуса, изначально разработанный для линейных моделей объектов («агентов») [4]. Соответственно, данные законы управления работают лишь в области, достаточно близкой к положению равновесия, в случае их практического применения на реальных БПЛА с учетом интегрального насыщения.

В нашей работе мы проводим исследования в допущении, что угловое положение каждого аппарата стабилизировано с помощью

настроенного автопилота. Данное предположение применимо на практике, поскольку частота угловых движений БПЛА значительно выше частоты изменения параметров движения центра масс аппарата. Однако моделирование и проверка законов управления происходят на реалистичных нелинейных моделях БПЛА самолетного типа с шестью степенями свободы и двенадцатью состояниями в среде MATLAB/Simulink.

В общей сложности задача формирования и поддержания строя в нашем подходе решается с помощью совмещения синхронизации траекторий посредством алгоритмов следования пути и синтеза с помощью прямого метода Ляпунова асимптотически устойчивых в целом законов децентрализованного группового управления относительными дистанциями и интервалами в строю, учитывающих ограничения на входные команды в системе «автопилот–летательный аппарат». Архитектура взаимодействия при этом основана на консенсусе и может быть различной: «открытая цепь»; «замкнутая цепь»; комбинированные строи, в которых звенья БПЛА взаимодействуют по принципу «каждый с каждым», а эскадрильи выстраиваются в «открытую цепь» и т.п. В работе [5] показано применение алгоритмов на примере простейшего случая лишь двух аппаратов в группе.

Проведенное обширное моделирование в среде MATLAB/Simulink показывает работоспособность и эффективность децентрализованных алгоритмов получения и поддержания заданной геометрической формы строя на основе предложенного подхода. При этом, поскольку законы управления асимптотически устойчивы в целом, начальное положение каждого из БПЛА может находиться сколь угодно далеко от положения равновесия. В то же время конечная форма строя также может быть любой (с учетом реальных габаритов самих аппаратов), что в итоге обеспечивает значительные преимущества в практических применениях групп БПЛА.

1. *Maza, I.* Classification of multi-UAV architectures / I. Maza, A. Ollero, E. Casado // In: Handbook of Unmanned Aerial Vehicles. – Dordrecht; Heidelberg; New York; London: Springer, 2015. – P. 953–972.
2. *Боднер, В.А.* Теория автоматического управления полетом [Текст] / В.А. Боднер. – Москва: Наука, 1964. – С. 625–645.
3. *Тарасов, В.Г.* Межсамолетная навигация [Текст] / В.Г. Тарасов. – Москва: Машиностроение, 1980. – С. 149–183.
4. *Мунасыпов, Р.А.* Групповое управление беспилотными летательными аппаратами на основе метода пространства относительных состояний [Текст] / Р.А. Мунасыпов, Т.З. Муслимов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2018. – № 2. – С. 120–125.
5. *Muslimov, T.Z.* UAV formation flight using non-uniform vector field and fuzzy self-tuning PD-control / Р.А. Мунасыпов, Т.З. Муслимов // IEEE International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – 2018. – P. 1–6.

## **НЕЙРОСЕТЕВАЯ НАСТРОЙКА РЕГУЛЯТОРА СКОРОСТИ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ НА БАЗЕ SINAMICS DCM\***

*Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова  
НИТУ «МИСиС», г. Старый Оскол,  
79040882508@ya.ru*

### **Введение**

Электроприводы постоянного тока до сих пор широко используются в промышленности, несмотря на известные недостатки [1]. К их числу можно отнести наличие щеточно-коллекторного узла, низкий КПД и необходимость частого обслуживания. Однако простота управления и возможность создания высокомоментных приводов позволяет по-прежнему применять их, например, в металлургическом и горнодобывающем производствах. Зачастую это приводы, разработанные в 70 – 80-е гг. На многих заводах в настоящее время проводится их модернизация, однако она, как правило, затрагивает только систему управления, оставляя силовую часть таких приводов без изменений [1]. В свою очередь, наличие современных цифровых регуляторов дает возможность построения адаптивных систем управления для рассматриваемых электроприводов с целью компенсации их нелинейности и нестационарности.

Можно выделить два основных класса методов построения подобных систем: классические [2] и интеллектуальные [3]. В данной работе рассматривается применение одного из интеллектуальных методов (нейросетевого настройщика) [4] в системе управления промышленного электропривода. В отличие от других подходов, он не требует наличия модели объекта управления или явной эталонной модели, учитывает опыт инженера АСУТП и способен обучаться оперативно, выбирая шаг настройки автоматически.

Ранее [4] нейросетевой настройщик был реализован в среде Matlab и апробирован на модели электропривода. Задачей данной работы является его адаптация к системе управления электроприводами Sinamics DCM для возможности его последующего промышленного применения.

### **Система управления SINAMICS DCM**

Электропривод постоянного тока Sinamics DCM фирмы Siemens является одним из наиболее распространенных современных приводов. По принципу подчинённого регулирования в него интегрированы контур регулирования тока и внешний по отношению к нему контур регулирования скорости. Цифровая система управления позволяет линейно изменять па-

---

\* Исследование проведено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-47-310003 p\_a).

параметры  $K_p$  и  $T_n$  регулятора скорости в зависимости от величины, выбранной с помощью технологии Vinector – Connector. Это может быть внешний сигнал. В данном случае к Sinamics DCM через Profibus был подключен контроллер Simatic S7-300. В его память помещен настройщик, выход которого передается на Sinamics DCM в виде телеграммы.

### Нейросетевой настройщик параметров ПИ-регуляторов

В целом настройщики не требуют изменения структуры системы регулирования. Адаптация достигается с помощью изменения параметров используемых регуляторов. В данном случае речь идет о ПИ-регулятора скорости. Общая структура настройщика изображена на рис. 1.

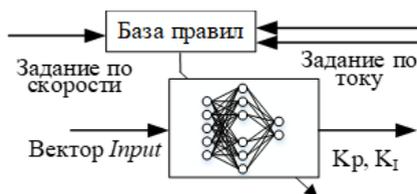


Рис. 1. Структурная схема настройщика ( $KI = Kp / Tn$ )

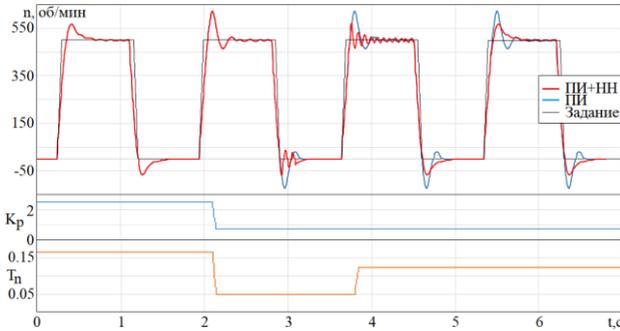
База правил необходима для определения момента времени, когда качество переходного процесса отклоняется от требуемого (оценивается перерегулирование, статическая ошибка, колебательность). Также она вычисляет скорости оперативного обучения для каждого нейрона выходного слоя сети, которая, в свою очередь, вычисляет на своих выходах значения параметров ПИ-регулятора скорости. Ее входы – это вектор *Input*, включающий значения задания по скорости, ее фактическое и задержанное значения и текущий выход настраиваемого регулятора. Устойчивость системы управления с настройщиком оценивается с помощью метода, представленного в [5].

### Результаты экспериментов

В качестве исследуемого электропривода в составе экспериментального стенда используется Sinamics DCM. На верхнем уровне автоматизации находится контроллер Simatic S7-314C 2 DP. Связь между контроллером, электроприводом и персональным компьютером построена с помощью сети Profibus DP. Для передачи данных управления используются SIEMENS Telegram. Электропривод Sinamics DCM инициализировал параметры регуляторов в ходе процесса ввода в эксплуатацию. Параметры регулятора контура тока ( $K_p = 0,43$ ;  $T_n = 0,019$  с) настроены с помощью измерения параметров якорной цепи (сопротивления и индуктивности), а параметры регулятора скорости ( $K_p = 2,51$ ;  $T_n = 0,166$ ) – при снятии кривой разгона. Перерегулирование в контуре скорости при такой настройке составило 13,5%. Это же значение было внесено в

базу правил нейросетевого настройщика в качестве оптимального. Статическая ошибка при этом составила не более 1%.

Эксперимент (рис. 2) производился следующим образом. В начальный момент времени подавалось задание по скорости, которое составляло 500 об/мин. Далее, после останова электропривода ( $t = 1,7$  с), маховик снимался с вала электродвигателя, тем самым достигалось изменение момента инерции примерно на 50 %. Далее электропривод вновь запускался (отсчет продолжается с момента 1,7 с, время на снятие маховика вырезано) со смесной сигнала задания 0 об/мин – 500 об/мин – 0 об/мин.



**Рис. 2. Результаты экспериментов с нейросетевым настройщиком**

Нейросетевой настройщик выявил изменение качества переходного процесса (для системы управления без адаптации параметров перерегулирование составило 24,5 %) и произвел перенастройку регулятора скорости. Это позволило вернуть перерегулирование к первоначальному значению к моменту времени 5,5 с.

1. Baoqin, X. Analysis and comparison of electric drive for the main motor of high power rolling mill / X. Baoqin, L. Tingjian, L. Caida // China Metallurgy. – 2009. – Vol. 19. – No. 7. – P. 38–41.
2. Александров, А.Г. Состояние и перспективы развития адаптивных ПИД-регуляторов в технических системах [Текст] / А.Г. Александров, М.В. Паленов // Автоматика и телемеханика. – 2014. – № 2. – С. 16–30.
3. Васильев, В.И. Интеллектуальные системы управления. Теория и практика [Текст] / В.И. Васильев, Б.Г. Ильясов. – Москва: Радиотехника. – 2009. – 392 с.
4. Еременко, Ю.И. Об использовании нейросетевого настройщика для адаптации ПИ регулятора скорости электропривода прокатной клети [Текст] / Ю.И. Еременко, А.И. Глущенко, В.А. Петров // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2017. – № 10 (18). – С. 685–692.
5. Глущенко, А.И. О методе определения скорости обучения нейронной сети для задачи оперативной настройки линейных регуляторов при управлении нелинейными объектами [Текст] / А.И. Глущенко // Управление большими системами. – 2018. – Вып. 72. – С. 52–107.

## **СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ НА ОСНОВЕ РЕЗЕРВУАРНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ С ХАОТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ В КАЧЕСТВЕ РЕЗЕРВУАРА\***

*Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси,  
г. Минск,  
vsychyov@robotics.by*

### **Введение**

Актуальной задачей робототехники является создание миниатюрных, энергоэффективных бортовых вычислительных устройств. Одним из новых подходов к решению данной задачи может стать применение резервуарных вычислений в системе управления роботом.

### **Обзор резервуарных методов вычисления**

Термином «резервуарные вычисления» изначально обозначался подход, при котором для решения задач классификации и аппроксимации используются некоторые типы необученных искусственных нейронных сетей (ИНС), в данном случае называемые «резервуар». Настройке, или обучению, подвергается только выходной слой, в качестве которого может быть применѳн классификатор на основе регрессионного анализа, или простой перцептрон. В итоге затраты на процесс настройки многократно сокращаются, так как основная работа выполняется за сѳет свойств, присущих ИНС изначально. В их числе – высокая размерность, нелинейность, кратковременная память. Известно также, что указанные свойства характерны не только для ИНС, но и для большого числа других нелинейных динамических систем (НДС). Таким образом, в последние годы в качестве резервуара рассматриваются не только ИНС, но и большое число механических, оптических, биологических, электронных НДС, в том числе генераторы с хаотическими режимами. Отмечается, что наилучшие свойства для применения НДС в качестве резервуара наблюдаются именно на границе с хаотическим режимом. Таким образом, среди методов машинного обучения именно резервуарные вычисления наиболее приспособлены для аппаратной реализации [1].

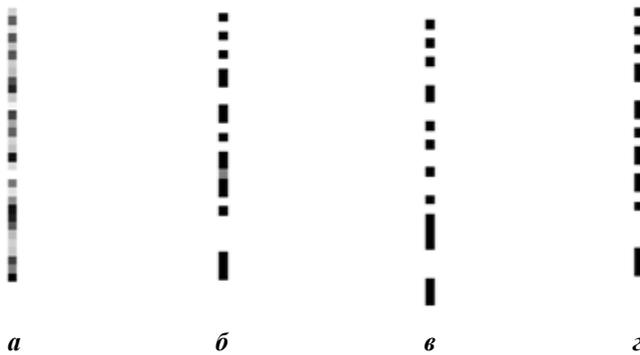
### **Система управления мобильным роботом**

В качестве резервуара может использоваться модель схемы Чжуа, полученная с применением метода матричной декомпозиции и исследо-

---

\* Работа выполнена при поддержке гранта БРФФИ №Ф18Р-229 и гранта № SFG 450 от 24.09.2018.

ванная в [2]. Было показано, что система дифференциальных уравнений, описывающих схему Чжуа, может быть полностью аппроксимирована линейным, квадратичным и кубическим матричными ядрами. Сигналы каждого из ядер несут большой объём информации о динамике системы. В зависимости от режима работы системы коэффициент корреляции между сигналами ядер может изменяться в диапазоне  $[-1; 1]$  и в то же время линейное изменение управляющих параметров приводит к нелинейному изменению коэффициента корреляции. На рис. 1 приводится иллюстрация, показывающая применение описанных свойств для бинаризации сенсорных данных на борту мобильного робота.

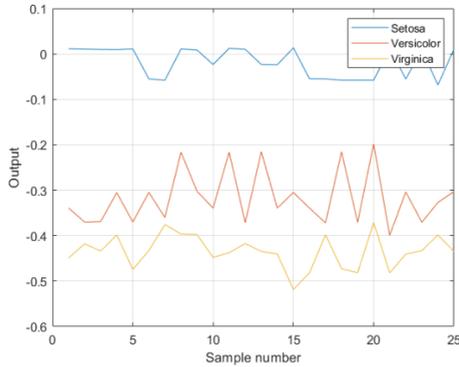


*Рис. 1. Вектор сенсорных данных: а – входной вектор; б – выходной вектор после второй итерации фильтрации; в – выходной вектор после третьей итерации фильтрации; г – выходной вектор после четвёртой итерации фильтрации*

Для выполнения бинаризации модель схемы Чжуа охвачена обратной связью. При поступлении на вход вектора данных, представляющего собой изображение в оттенках серого (рис. 1,а), в системе образуется предельный цикл. Уже после третьей итерации выходной сигнал системы представляет собой бинаризованный вариант входного вектора.

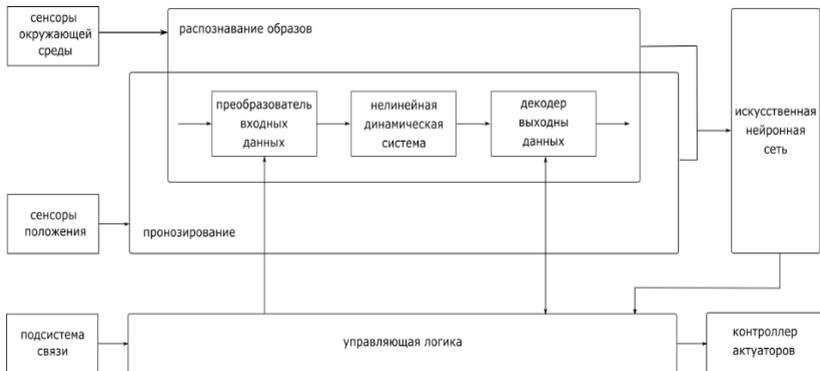
Отфильтрованный вектор поочерёдно отображается на выходе системы в прямом и инвертированном виде. На последующих итерациях наблюдается картина, аналогичная той, что показана на рис. 1,в и г.

Вторым исследованным вариантом применения модели схемы Чжуа в качестве резервуара было создание классификатора ирисов Фишера. На рис. 2 показаны графики выходных сигналов системы после настройки на первых двадцати пяти примерах цветов каждого сорта.



**Рис. 2. Выходные сигналы системы после настройки для распознавания ирисов Фишера**

На основе описанных выше принципов и результатов была разработана функциональная схема системы управления мобильным роботом (рис. 3), включающая одну НДС с мультиплексированием входов и выходов для решения двух основных задач управления мобильными роботами – распознавание образов и прогнозирование временных рядов, а также выходной классификатор, управляющее логическое устройство и контроллер актуаторов.



**Рис. 3. Функциональная схема системы управления роботом**

1. Tanaka, G. Recent advances in physical reservoir computing: a review / G. Tanaka, T. Yamane, J.B. Heroux [et al.] // Preprint submitted to Neural Networks. – 2018. – №4. – P. 1–62.
2. Крот, А.М. Анализ хаотических режимов функционирования схемы Чжуа с гладкой нелинейностью на основе метода матричной декомпозиции [Текст] / А. М. Крот, В. А. Сычёв // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 4. – С. 501–512. – <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-4-501-512>.

## **ЗАДАЧА УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ С КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКОЙ И ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯМИ**

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
г. Москва,  
paultoch@mail.ru*

В работе рассматривается управляемая система, динамика которой описывается при помощи совокупности линейных обыкновенных дифференциальных уравнений с управляющими параметрами и помехами (неопределенностями). Фазовое пространство разделено на части при помощи специальных гиперплоскостей переключений. В каждой из частей действует одна из систем дифференциальных уравнений. При переходе траектории системы через какую-либо из гиперплоскостей происходит мгновенная смена активной подсистемы – переключение.

На фазовой плоскости зафиксировано компактное целевое множество, которое может не быть выпуклым. Основной целью работы является построение множества разрешимости минимаксного типа, выпущенного из заданного целевого множества в обратном времени, на заданном конечном отрезке времени. Это множество в каждый фиксированный момент времени состоит из всех позиций системы, из которых можно попасть в целевое множество за счет выбора управления в позиционной форме, при любой, заранее неизвестной помехе из заданного класса допустимых помех. Как на управления, так и на помехи наложены «жесткие», поточечные ограничения с заданными ограничивающими множествами. Далее на основании построенных множеств разрешимости можно определить управление в форме обратной связи, решающее задачу перевода траектории системы в целевое множество за заданное время.

Для решения проблемы используется подход, основанный на применении вспомогательной функции цены и уравнений Гамильтона–Якоби–Беллмана для нее ([3]). Предлагается искать численные решения, соответствующие внешним оценкам искомых множеств разрешимости. Аппроксимирующая схема основывается на принципе сравнения [1, 2]. В каждой из областей фазового пространства аппроксимирующая функция цены является квадратичной. Ее значения могут быть найдены из систем дифференциальных уравнений Риккати. В целом же функция цены должна обладать свойством непрерывности. Последнее требование порождает так называемые «условия склейки» решений уравнений Риккати на гиперплоскостях переключений – системы линейных алгебраических уравнений.

Предложен новый численный метод для приближенного решения полученной совокупности систем дифференциальных уравнений Рикка-

ти, дополненных линейными алгебраическими уравнениями. Рассмотрен конкретный пример вычисления невыпуклых аппроксимаций множеств разрешимости.

1. Куржанский, А.Б. Принцип сравнения для уравнений типа Гамильтона–Якоби–Беллмана в теории управления [Текст] / А.Б. Куржанский // Труды Института математики и механики. – 2006. – Т. 12, №1. – С. 173–183.
2. Точилин, П.А. О построении невыпуклых аппроксимаций множеств достижимости кусочно-линейных систем [Текст] / П.А. Точилин // Дифференциальные уравнения. – 2015. – Т. 51, № 11. – С. 1503–1515.
3. Kurzhanski, A.B. On reachability under uncertainty / A.B. Kurzhanski, P. Varaiya // SIAM J. Control Optim. – 2002. – V. 41, №1. – P. 181–216.

*А.П. Федин, Я.В. Калинин, Е.А. Марчук*

## **АДАПТИВНЫЙ ПИД-ПОДОБНЫЙ НЕЧЁТКИЙ КОНТРОЛЛЕР СУГЕНО КАК УПРАВЛЯЮЩИЙ КОМПОНЕНТ СИСТЕМЫ ТОРМОЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ЭКИПАЖА\***

*Волгоградский государственный технический университет,  
г. Волгоград,  
marocci@bk.ru*

### **Введение**

Вопросы безопасного движения на транспорте в целом и в робототехнической отрасли, в частности, являются крайне важными и актуальными, так как с повышением средних скоростей движения возрастает необходимость обеспечивать надёжное и эффективное торможение в любых условиях и режимах эксплуатации. Особенно это важно для беспилотных экипажей и автомобилей, для которых высок психологический барьер передачи всей полноты управления компьютерной системе управления. Здесь особенно высоки риски, связанные со здоровьем и жизнью людей, поэтому требования, которые предъявляются или будут в ближайшем будущем предъявляться к таким системам управления, оказываются существенно выше, чем требования, предъявляемые к человеку-оператору, человеку-пилоту, человеку-водителю.

В настоящее время существуют различные способы реализации управления процессом торможения автомобиля или беспилотного экипажа. Распространенной является модель управления по величине отклонения коэффициента продольного проскальзывания от оптимального значения с учетом одного или нескольких параметров, таких как: ско-

---

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-48-340016).

рость изменения ошибки отклонения, ускорение колеса, скорость автомобиля и т.д. [4]. Введение дополнительного входного параметра помимо величины отклонения при создании адекватной модели обеспечивает улучшение качества модели. Хотя более предпочтительным в моделировании в качестве дополнительного параметра является учет изменения ускорений, позволяющий прогнозировать поведение системы, для упрощения модели в данном примере учитывается значение скорости автомобиля. При настройке модели помимо величины отклонения также учитывается значение управляющего воздействия.

### **Постановка задачи**

Поскольку процессы, описываемые математической моделью антиблокировочной системы торможения, имеют выраженный нелинейный характер, человеческое восприятие по отношению к ним может исключить адекватное понимание и прогнозирование. Настройка нечеткого регулятора экспертными методами возможна, но не всегда способна обеспечить хорошую точность. Исследуемая модель адаптивного нечеткого регулятора имеет преимущества, например, перед классическим ПИД-регулятором в том, что позволяет изменять значения коэффициентов регулятора в зависимости от значения входных данных [2]. Первичная настройка обычного ПИД-регулятора возможна методом Зиглера–Николса [3], в то время как дальнейшая настройка может осуществляться методом градиентного спуска, используемым Simulink Design Optimization по умолчанию. Однако, в силу своих характерных особенностей, классические ПИД-регуляторы не всегда могут обеспечить хорошее качество регулирования на всем диапазоне интервалов входных и требуемых выходных значений. Решение подобной задачи видится в использовании модели Сугено, позволяющей задавать несколько режимов работы регулятора посредством изменения коэффициентов П-, И-, Д-, адаптируясь к интервалам входных параметров. Модель Сугено может задавать в качестве выходных значений подстроечных коэффициентов как численные значения, так и функциональные зависимости. Главным качеством рассматриваемого адаптивного нечеткого регулятора Сугено ПИД-типа является возможность его настройки помимо экспертного способа программными средствами пакета Matlab [1], что повышает надежность и адекватность регулирования процесса.

Результат численного эксперимента подтверждает предположение об улучшении качества регулирования. Уменьшается время длительности переходных процессов на всем диапазоне управления, уменьшается задержка управляющего воздействия.

В сравнении с обычным ПИД-регулятором и обычным нечетким регулятором данная адаптивная модель обладает несомненным преимуществом.

Численный эксперимент проводился на основании следующих значений:

Начальная скорость  $V = 27$  м/с (100 км/ч) и 5,5 м/с (20 км/ч);

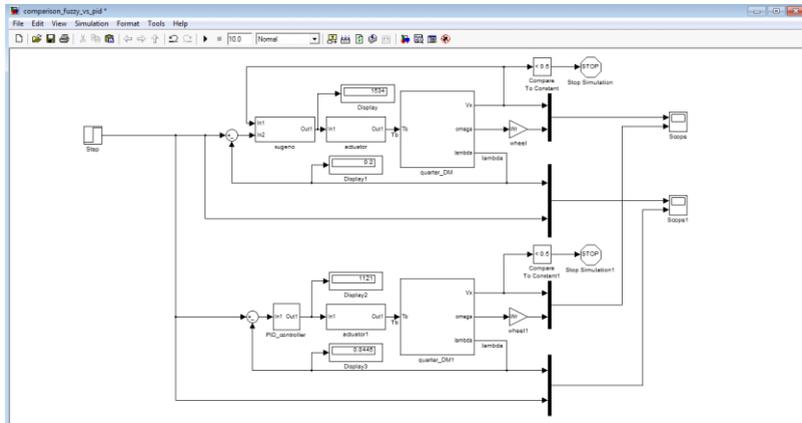
Момент инерции колеса  $J = 1$  кг·м<sup>2</sup>;

Радиус колеса  $W_r = 0,3$  м;

Масса на одно колесо  $m = 425$  кг;

Максимальный тормозной момент  $T_b = 2000$  Н.

Модель колеса Расежка.



**Рис. 1. Сравнительная модель управления с адаптивным нечетким регулятором ПИД-типа и классическим ПИД-регулятором**

Проведённые численные эксперименты на модели показали существенное снижение времени регулирования и меньшую величину перерегулирования, что говорит о перспективности данного направления совершенствования систем торможения автомобилей и беспилотных экипажей, возможности достичь более высокой надёжности управляемого процесса торможения при быстродайствии в реальном времени.

1. Штовба, С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB [Текст] / С. Д. Штовба. – Москва: Горячая линия – Телеком, 2007.
2. Демидова, Г.Л. Регуляторы на основе нечеткой логики в системах управления техническими объектами [Текст] / Г.Л. Демидова, Д.В. Лукичев. – Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2017.
3. Кузнецов, А.В. Синтез нечеткого регулятора при помощи пакета прикладных программ системы Matlab [Текст] / А.В. Кузнецов, Г.М. Макарянц. – Самара: Издательство Самарского государственного аэрокосмического университета, 2016.
4. Ayman, A. Aly. An Antilock-bracking systems (ABS) Control: A Technical Review / A. Aly Ayman et al // Intelligent control and Automation. – 2011. – 2. – P. 186–195.

## **ДВА МЕТОДА ЛОКАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ В СТАТИЧЕСКИХ СРЕДАХ С ПРЕПЯТСТВИЯМИ**

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МИРЭА – Российский технологический университет",  
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
г. Москва,  
filimon\_ab@mail.ru, nbfilimonov@mail.ru*

Одним из актуальных направлений исследований в современной робототехнике является проблематика *локальной навигации* мобильных роботов (МР), обеспечивающей перемещение робота к цели с обходом препятствий в процессе движения [1]. В докладе предлагаются два новых метода локальной навигации МР: модифицированный метод «жука» и метод «фарватера» на карте потенциальных полей.

### **Модифицированный метод «жука»**

В основе классических методов «жука» Bug1 и Bug2 [2] лежит наблюдение за поведением жука: встретив препятствие, он обходит его и затем продолжает путь в том же направлении.

Согласно методу Bug1, МР следует по границе препятствия и непрерывно измеряет расстояние от своего текущего положения до цели. Совершив полный оборот вокруг препятствия, он возвращается к точке, имеющей минимальное расстояние до цели, и далее совершает движение в направлении к целевой точке. Основным недостатком метода Bug1 является необходимость полного обхода препятствия. В методе Bug2 предполагается частичный обход препятствия: при обнаружении препятствия, МР так же, как и в алгоритме Bug1, двигается вдоль границы препятствия, но при пересечении линии первоначального курса изменяет траекторию и далее двигается по ней к цели.

Методы Bug имеют следующие ограничения: препятствия должны находиться на ненулевом расстоянии друг от друга (не соприкасаться); робот рассматривается как материальная точка, которая может двигаться между препятствиями независимо от ширины прохода между ними; границы препятствий должны быть такими замкнутыми кривыми, чтобы любая прямая, проходящая через точки кривой и точку цели, пересекала ее ограниченное число раз.

В основу предлагаемого авторами метода обхода препятствий МР положено следующее правило: в свободном пространстве МР движется к цели по прямой линии с исключением эффекта самопересечения его траектории движения, т.е. процесса заикливания движения.

Обозначим через  $\mathbf{x}$  вектор координат положения МР в конфигурационном пространстве. Линией визирования будем называть луч, соединяющий робот с целью, а точку траектории, в которой он изменяет направление движения, будем называть *точкой поворота*.

Предлагаемая схема обхода МР препятствий основана на следующих правилах:

1. Движение робота в свободном пространстве осуществляется по линии визирования цели.

2. Если робот подходит к препятствию в точке поворота  $\mathbf{x}^+$ , то он изменяет направление движения и начинает двигаться вдоль границы препятствия в одном из двух направлений (либо по часовой, либо против часовой стрелки).

3. Движение робота вдоль границы продолжается до момента достижения определенной точки  $\mathbf{x}^-$ , удовлетворяющей двум условиям: линия визирования цели направлена в свободное пространство и движение по ней не приведет к пересечению пройденного участка траектории.

4. Далее робот осуществляет прямолинейное движение по направлению к цели.

Ключевым в данной схеме движения МР является определение точки отхода от препятствия  $\mathbf{x}^-$ , т.е. возможности движения по линии визирования с гарантированным исключением эффекта самопересечения траектории.

Для учета ориентации траектории движения МР введем следующие обозначения: локальные области слева и справа от траектории будем обозначать соответственно знаками « $\leftarrow$ » и « $\rightarrow$ ». Без ограничения общности будем считать, что МР обходит препятствие против часовой стрелки, так что препятствие находится слева по ходу движения. В результате, двигаясь по линии визирования, МР может попасть на пройденный участок траектории лишь со стороны « $\rightarrow$ ». В этом случае линия визирования может пересекать пройденный участок траектории только со стороны « $\leftarrow$ ».

### **Метод «фарватера» в концепции виртуальных полей**

Метод виртуальных силовых полей применим в случае известной карты местности, однако имеет существенный недостаток – возникновение потенциальных ям, т.е. локальных ловушек для МР [3, 4].

Попытки построения стратегий управления МР, позволяющих обходить препятствия, преодолевать ловушки или выбираться из них, наталкиваются на затруднения принципиального характера и малопродуктивны. Тем не менее, концепция потенциальных полей может быть полезна для решения задач навигации и маршрутизации МР.

Создадим силовое поле посредством суперпозиции двух потенциальных полей – создаваемого целью притягивающего поля и создаваемого препятствиями отталкивающих полей. Поскольку последние действуют локально, то в результирующем поле имеются силовые линии, обходящие препятствия и потенциальные ямы.

*Силовой линией* для поля  $\mathbf{F}(\mathbf{x})$  называется кривая в рабочем пространстве  $\mathbf{r} = \mathbf{r}(s)$ , касательная к которой во всех точках кривой совпадает со значением поля:

$$\frac{d\mathbf{r}}{ds} = \mathbf{F}(\mathbf{r}(s)).$$

Среди семейства всех силовых линий выберем линию  $\mathbf{r}^*(s)$ , которая отвечает двум требованиям. Во-первых, она заканчивается в целевой точке, т.е. вектор напряженности поля во всех точках линии отличен от нуля:  $\|\mathbf{F}(\mathbf{r}(s))\| > 0$ . Во-вторых, она является ближайшей к начальному положению МР  $\mathbf{x}(0)$ .

Силовая линия  $\mathbf{r}^*(s)$  принимается в качестве заданного маршрута движения МР. Предлагаемый метод управления движением МР заключается в перемещении к данной силовой линии (возможно по наикратчайшему пути) и дальнейшем движении вдоль нее под действием силового поля. Данное решение задачи локальной навигации МР назовем *методом фарватера* на карте потенциальных полей по аналогии с понятием фарватера в морской навигации.

В общем случае, когда известна карта среды, но на пути движения МР возможны малоразмерные временные препятствия, можно объединить два предложенных метода: движение согласно методу фарватера и обход препятствия модифицированным методом «жука».

1. *Hoy, M. Algorithms for collision-free navigation of mobile robots in complex cluttered environments: a survey / M. Hoy, A.S. Matveev, A.V. Savkin // Robotics. – 2015. – Vol. 33. – P. 463–497.*
2. *Lumelsky, V. Path-Planning Strategies for a Point Mobile Automaton Moving Amidst Unknown Obstacles of Arbitrary Shape / V. Lumelsky, A. Stepanov // Algorithmica. – 1987. – Vol. 2. – P. 403–430.*
3. *Филимонов, А.Б. Методология искусственных потенциальных полей в задачах локальной навигации мобильных роботов [Текст] / А.Б. Филимонов, Н.Б. Филимонов // Интеллектуальные системы, управление и мехатроника - 2017: материалы III Всероссий. научно-техн. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов. – Севастополь: СевГУ, 2017. – С. 157–160.*
4. *Филимонов, А.Б. Некоторые аспекты применения метода потенциальных полей в задачах локальной навигации мобильных роботов / А.Б. Филимонов, Н.Б. Филимонов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XIX Междунар. конф. – Самара: ООО «Офорт, 2017. – С. 242–247.*

*М.В. Хисамутдинов, Я.С. Коровин, А.И. Каляев, Д.Я. Иванов*

**МЕТОД ОРГАНИЗАЦИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО  
ИНТЕРФЕЙСА ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ  
СИСТЕМОЙ СТЕРЕОЗРЕНИЯ РОБОТА  
НА ОСНОВЕ АЙТРЕКИНГА\***

*ООО «НИИ МВУС», г. Таганрог,  
korovin\_yakov@mail.ru*

Роботы и коалиции роботов находят все более широкое применение в различных отраслях, переходящих на методологию цифровой экономики. При этом проблема управления роботами и коалициями роботов является одним из сдерживающих факторов, стоящих на пути внедрения роботов и мультиробототехнических комплексов. Можно выделить два основных направления по решению этой проблемы. Первое – повышение автономности роботов за счет применения элементов искусственного интеллекта, мультиагентного и роевого взаимодействия. Второе направление – совершенствование механизмов взаимодействия человека-оператора и управляемого им робота.

В настоящее время элементами управления в интерфейсах человек-робот как правило являются различные комбинации рычагов/джойстиков, кнопок, педалей, сенсорных экранов. То есть человек-оператор использует свои руки (реже ноги) для воздействия на органы управления. Однако использование таких устройств ограничивает объем информации, передаваемой оператором роботу, а также увеличивает время реакции.

Предлагается в качестве органов управления роботом использовать не только тактильный контакт рук и ног оператора с органами управления, но и глаза человека-оператора за счет анализа направления взгляда оператора, анализа закрытия глаз и времени сосредоточения на отдельном объекте. В качестве основы отображения информации в настоящем проекте предлагается использовать режим совмещения стереоинформации, получаемой с системы стереозрения робота, с дополненной реальностью, что позволит повысить точность позиционирования роботизированной системы и ускорить процесс получения информации от нее.

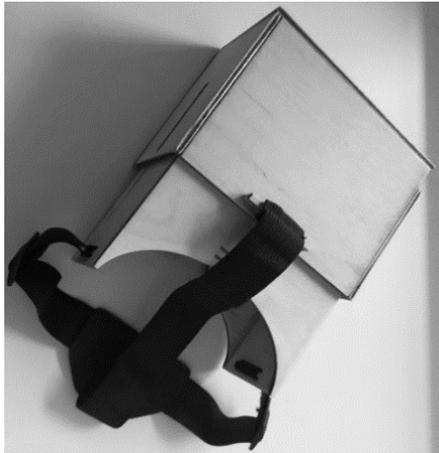
Современные системы дополненных интерфейсов, использующие отслеживание направления взгляда [1 – 3] («Eye gaze tracking», «айтрекинг»), основываются на применении сложных систем, состоящих из одной или нескольких камер, систем дополнительной подсветки и компенсации бликов, что приводит к значительной стоимости готовых устройств и тем самым ограничивает области применения.

---

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проекта №18-29-03225\_).

Для организации интеллектуального интерфейса дистанционного управления системой стереозрения робота посредством глаз оператора предлагается использовать очки, состоящие из специального корпуса, с устанавливаемым в него Android смартфоном.

Система состоит из корпуса, который крепится на голову пользователя, и смартфона, выполняющего роль основного вычислительного устройства. На рис. 1 показана конструкция устройства. Для установки смартфона в правой части корпуса предусмотрена специальная прорезь, предназначенная для смартфонов стандартной толщины. Поскольку в корпус могут быть установлены телефоны, имеющие диагональ более 4,5 дюймов, на дальней стенке корпуса предусмотрены фиксаторы, удерживающие смартфон.



***Рис. 1. Конструкция устройства***

Корпус имеет раздвижную конструкцию для корректировки расстояния между глазами оператора и экраном смартфона, что сделано для подстройки системы под зрение человека. Ремень используется для фиксации устройства на голове пользователя. Корпус устройства может быть напечатан на 3D-принтере, что вкупе с использованием смартфона на платформе Android позволит упростить процесс сборки подобных систем и расширить области их применения.

Основные этапы работы предложенного базового алгоритма функционирования интеллектуального интерфейса дистанционного управления с применением стереоизображений с дополненной реальностью и определения объектов интереса оператора – это выполнение следующих операций:

- инициализация данных;
- получение одиночного кадра с фронтальной камеры смартфона;

- определение области, содержащей в себе глаз;
- коррекция изображения в выбранной области;
- выделение контура глаза;
- определение центра зрачка;
- вычисление области интереса оператора.

Разработано программное обеспечение для тестирования и отладки предложенного алгоритма.

При детектировании области с изображением глаза, выполнение поиска зрачка на всем изображении, получаемом с фронтальной камеры, приведет к лишним затратам вычислительных ресурсов устройства. Достаточно найти на кадре область, на которой изображен глаз, выделить ее, скопировать в отдельный буфер, и уже в этом буфере производить поиск зрачка. Для решения этой задачи предлагается два способа.

Первый способ заключается в том, что пользователь в настройках системы выбирает расположение камеры (из трех вариантов: слева, справа, в центре), и в зависимости от выбранного расположения, вычисляются координаты искомой области на кадре с учетом разрешения кадра. Такое определение координат выполняется достаточно быстро и не требует дополнительных вычислительных ресурсов. Недостатком этого подхода является то, что размер области выбирается с запасом для подстройки под различные модели смартфонов и на следующих шагах работы алгоритма потребуется анализировать область большую, чем следовало, что негативно скажется на скорости работы системы в целом.

Второй способ предполагает использование обученной нейронной сети для поиска области глаза на кадре. Преимуществом такого подхода является возможность минимизации площади анализируемого изображения и работа с любыми входными изображениями вне зависимости от относительного расположения камеры и глаз пользователя. Недостатками же является необходимость сбора достаточно большой базы для обучения нейронной сети, выбор оптимальной модели сети и применения ее в процессе обработки кадра, что повышает время обработки одного кадра и на слабых устройствах может привести к невозможности проводить анализ в режиме реального времени. Именно поэтому предлагаемая система позволяет пользователю выбрать режим работы детектора в настройках приложения.

Для избавления от шумов в разработанном программном обеспечении применяется гауссовский фильтр с размером окна  $5 \times 5$  пикселей и сигма 0,5.

Для уменьшения площади поиска зрачка и снижения вероятности ошибочного определения необходимо выделить контур глаза на изображении. Для этого используются регрессионные деревья.

Следующая задача – определение центра зрачка. Координатами центра глаза является место пересечения градиентов изображения, т.е.

необходимо проанализировать векторное поле изображения, максимум которого будет ориентировочным центром глаза:

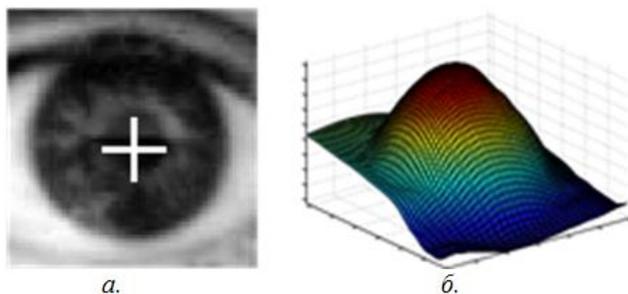
$$c^* = \operatorname{argmax}_c \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d_i^T g_i)^2 \right\}; \quad (1)$$

$$d_i = \frac{x_i - c}{\|x_i - c\|_2}, \quad \forall i: \|g_i\|_2 = 1, \quad (2)$$

где  $c$  – возможный центр зрачка,

$g_i$  – вектор градиента в точке  $x_i$ .

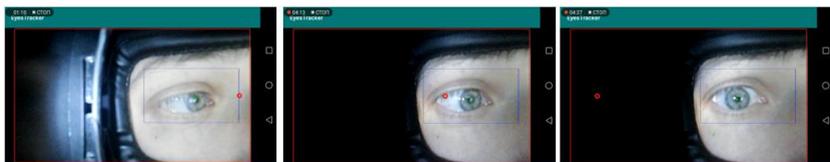
Векторы смещения  $d_i$  нормируются, чтобы получить равный вес для всех положений пикселей. Повышение устойчивости к линейным изменениям освещения и контраста осуществляется масштабированием векторов градиента до длины блока. Примерная оценка суммы точечных произведений для разных центров показана на рис. 3, где целевая функция определяет максимум в центре зрачка.



**Рис. 3. Примерная оценка суммы точечных произведений для разных центров: а – результат определения центра зрачка на изображении; б – трехмерное представление функции градиентов с максимумом в области, представляющей центр зрачка**

Для определения области интереса пользователя используются сохраненные данные калибровки, рассчитывается матрица преобразования координат зрачка на изображении, получаемом с камеры, в экранные координаты на смартфоне.

На рис. 4 показан тестовый режим работы приложения, в котором можно видеть изображение с фронтальной камеры, область глаза, точку, определяемую как центр зрачка, и точку, в которую смотрит пользователь.



**Рис. 4. Тестовый режим работы приложения**

Дальнейшие исследования по теме проекта будут направлены на разработку новых методов и алгоритмов определения объектов интереса посредством глаз оператора в интеллектуальном интерфейсе дистанционного управления; новых методов и алгоритмов применения стереоизображений с дополненной реальностью в интеллектуальном интерфейсе дистанционного управления; создание программно-аппаратной модели интеллектуального интерфейса дистанционного управления и проведение практических исследований.

Применение на практике полученных результатов позволит преодолеть ряд научных и технологических барьеров, сдерживающих прогресс в множестве различных направлений развития цифровой экономики, в частности дать толчок к развитию отечественных беспилотных авиационных систем, систем поиска и сопровождения объектов, мехатронных комплексов, систем исследования труднодоступных мест и т.п.

1. *Фроимсон, М.И.* Система определения направления взгляда пользователя в режиме реального времени [Текст] / М.И. Фроимсон и др. // Спецтехника и связь. – 2013. – №. 3.
2. *Малин, И.К.* Система отслеживания направления взгляда с использованием доступной видеоаппаратуры [Текст] / И.К. Малин, А.В. Крапивенко // Труды МАИ. – 2009. – №. 36. – С. 7–11.
3. *Малин, И.К.* Отслеживание направления взгляда в реальном времени без использования специальной видеоаппаратуры [Текст] / И.К. Малин // 23-я международная конференция по компьютерной графике и зрению: труды конференции. Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Дальневосточный федеральный университет. – 2013. – С. 294–297.

***В.Б. Шабанов, С.Г. Капустян***

## **УПРАВЛЕНИЕ ГРУППАМИ ХАОТИЧЕСКИХ МИКРОРОБОТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСПРЕДЕЛЁННОГО РЕЕСТРА\***

*ООО «НИИ МВУС», г. Таганрог,  
v.b.shabanov@gmail.com*

Тема применения групп мобильных роботов уже давно популярна в научном сообществе. Действительно, проблемы одиночных роботов, такие как ограниченный набор установленных бортовых и функциональных устройств, крайне ограниченный запас энергоресурсов, можно решить за счет коллектива различных микророботов.

---

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ проекты №19-07-00907 и №18-58-00051.

Объединение мобильных роботов в коалиции позволяет решать множество технически сложных задач, таких как исследование территорий зараженных радиоактивными отходами [1], поисковые операции [2], телекоммуникационные сети и др. Возникает задача объединения информации, получаемой членами коллектива и ее резервирования. Для решения этой проблемы был предложен метод передачи данных с использованием хаотического процессора для шифрования передаваемой информации и распределенного реестра для децентрализованного хранения.

### Архитектура децентрализованного хранения данных

Для создания архитектуры децентрализованного хранения данных предлагается использовать распределенный реестр, позволяющий хранить и добавлять актуальные данные всем участникам группы [3]. Это позволяет коллективу роботов принимать взвешенные решения на основе общеполученных данных, позволяя решать задачу управления группой роботов при решении общей задачи на основе роевого взаимодействия.

На рис. 1 показана блок-схема, обеспечивающая систематизированные данные роботов, основанная на технологии распределенного реестра. За основу взята технология, разработанная изначально для криптовалюты Bitcoin, блокчейн является одноранговой и вычислительной системой. Структура цепи блоков представляется в виде индекса, временной метки, хеша предыдущего блока и данных.



*Рис. 1. Архитектура цепочки хранимых данных коллектива роботов*

Хеш-указатель позволяет знать место хранения информации, запросить информацию в любое время и проверить на изменения. Также он выступает в роли защиты целостности цепи, при возможном изменении хеш-функции одного из блоков приводит к коллизии цепочки, вызванной утратой ссылки на предыдущие блоки. В случае появления коллизии приоритет выполнения остается за цепью с наибольшим количеством блоков.

Проблемы достижения консенсуса в коллективе разделяются на дискретную и постоянную проблему. Дискретная проблема может быть сформулирована как лучшая из  $n$ -количества проблем, где коллектив примет дальнейшее решение из набора  $n$ -вариантов [4]. При постоянной проблеме коллектив принимает решение из бесконечного множества непрерывных выборов [5].

### **Архитектура передачи данных**

Решение проблемы передачи данных между членами коллектива и распределенным реестром было возложено на динамические хаотические системы, позволяющие обеспечить защищенную связь между устройствами.

Выбор хаотических моделей для создания криптографической связи между устройствами обусловлен общностью криптографических моделей и хаотических свойств, так хаотические модели обладают особенностями, которые отлично подходят для организации следующего информационного обмена [6].

1. Ортогональность. Из-за нерегулярности хаотических сигналов их автокорреляционная функция имеет сильное затухание, что наилучшим образом указывает на применение в многоагентных системах в виду большого количества устройств, находящихся на одной частоте.
2. Криптостойкость. Сигналы не регулярны и имеют сложную структуру, один и тот же генератор может выдавать разные сигналы при незначительных изменениях. В виду этого спрогнозировать изменения сигнала в долгосрочной и среднесрочной перспективе не представляется возможным.
3. Широкополосность. Сигналы непериодичны и обладают широким спектром.

Предлагается использовать блочный алгоритм шифрования, характерной особенностью которого является использование прямого и обратного преобразования [7], при этом оба процесса преобразования аналогичны по своей сути. Шифруемая информация разбивается на блоки фиксированной длины, и происходит их последовательная обработка.

### **Результаты исследований**

Использующая распределенный реестр система позволяет устранить недостатки системы знаний, образующихся в коллективах роботов. Даже в случае территориальной разрозненности членов группы распределенный реестр не позволяет создать точки отказа из-за согласованности используемых протоколов и репликации данных среди пиров сети.

Помимо основной своей функции – децентрализации системы, распределенный реестр хранит данные с датчиков в защищённом виде, позволяя в дальнейшем произвести анализ передаваемых данных и отследить динамику изменений и обеспечивающие защиту от несанкционированного доступа к информационным ресурсам роботов группы.

Хаотические модели для создания защищенных каналов передачи данных давно нашли своих почитателей. Использование блочного алгоритма шифрования в предлагаемой системе позволяет создать не ресурсоёмкий защищенный канал связи между коллективами автоматов для синхронизации и передачи данных в распределенный реестр.

Применительно к коллективам роботов использование хаотических моделей и распределенного реестра позволяет создать децентрализованный коллектив с защищенной извне инфраструктурой.

1. *Bashyal, S.* Human swarm interaction for radiation source search and localization / S. Bashyal, G.K. Venayagamoorthy // Swarm Intelligence Symposium, 2008. SIS 2008. IEEE. – 2008. – P. 1–8.
2. *Davids, A.* Urban search and rescue robots: from tragedy to technology / A. Davids // IEEE Intell. Syst. IEEE, 2002. – Vol. 17, № 2. – P. 81–83.
3. *Strobel, V.* Blockchain technology for robot swarms: A shared knowledge and reputation management system for collective estimation / V. Strobel, M. Dorigo. 2018.
4. *Valentini, G.* Collective perception of environmental features in a robot swarm / G. Valentini et al. // International Conference on Swarm Intelligence. – 2016. – P. 65–76.
5. *Ferrante, E.* Self-organized flocking with a mobile robot swarm: a novel motion control method / E. Ferrante et al. // Adapt. Behav. Sage Publications Sage UK: London, England, 2012. – Vol. 20, № 6. – P. 460–477.
6. *Когай, Г.Д.* Методы и модели хаотических процессов в системах связи [Текст] / Г.Д. Когай, Т.Л. Тен // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 10.
7. *Сидоренко, А.В.* Шифрование данных на основе дискретных хаотических систем и отображений [Текст] / А.В. Сидоренко, К.С. Мулярчик // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. – 2013. – № 1 (71).

## РАЗДЕЛ 2

### ПРИМЕНЕНИЕ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

*Э.А. Абросимов, А.Д. Куличенко,  
А.Н. Можжев, Е.Ю. Смирнова*

#### **ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОРГАНИЗАЦИИ ГРУППОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ГИБРИДНЫХ ГРУПП МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ**

*Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский  
институт робототехники и технической кибернетики,  
г. Санкт-Петербург,  
abrosimov@rtc.ru, a.kulichenko@rtc.ru, eus@rtc.ru*

Использование роботов наиболее целесообразно в экстремальных условиях, где труд человека и его жизнедеятельность затруднены, невозможны или сопряжены с угрозой для жизни и здоровья. Преимущества группового применения роботов в задачах экстремальной робототехники очевидны. В общем случае это больший радиус действия, достигаемый за счет рассредоточения роботов по всей рабочей зоне; расширенный набор выполняемых функций за счет установки на каждого робота индивидуальных исполнительных устройств; уменьшение времени выполнения операций; экономия ресурсов отдельного робота, благодаря оптимальному планированию ресурсов группы; более высокая вероятность выполнения задания за счет возможности перераспределения целей между роботами группы.

Для ряда задач, решаемых в опасных, удаленных или труднодоступных зонах, групповое применение роботов дает дополнительные преимущества, а именно: минимизация дозой нагрузки на робота при работе в полях излучения; возможность организации ретрансляции при неустойчивой связи с центром управления; создание реалистичных цифровых моделей местности и объектов моделей обстановки в труднодоступных зонах средствами многокурсного зрения; формирование мобильной сети маяков различной физической природы (гидроакустических, световых, радио) для повышения надежности навигации в отсутствие связи с глобальными навигационными системами (ГНС).

Вместе с тем, объединение роботов в однородные группы по видам базирования ставит ряд проблем, связанных с ограничениями, прису-

щими каждому виду роботов. Так, с одной стороны, наилучшую возможность организации ретрансляции между членами группы при устойчивой связи и значительное увеличение дальности высокоскоростной связи обеспечивает использование беспилотных летательных аппаратов (БЛА) и безэкипажных катеров (БЭК). Эти же робототехнические средства оснащаются средствами технического зрения с большой зоной обзора и, как правило, находятся в зоне устойчивой связи с глобальными спутниковыми навигационными системами. С другой стороны, технологические инструменты, необходимые для выполнения манипуляционных, транспортных, эвакуационных и тому подобных операций, размещаются на наземных и подводных роботизированных платформах, которые должны доставить это оборудование и выполнить необходимые технологические операции в рабочей зоне, зачастую находящейся вне прямой радиовидимости или вне радиуса действия гидроакустической связи и проблемной с точки зрения локализации робота посредством ГНС (руины, завалы, подводная среда).

С учетом вышесказанного, логичным шагом является создание гибридных робототехнических групп [1], объединяющих в общем случае наземные робототехнические комплексы (РТК), беспилотные летательные аппараты (БЛА), бэзэкипажные катера (БЭК), автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА).

Рассмотрим пример группы роботов, выполняющих задачу поиска и изъятия источников радиационного излучения при ликвидации последствий техногенной аварии. Наземный РТК способен локализовать ИИИ с точностью, достаточной для его изъятия и помещения в контейнер при помощи манипулятора, однако задача локализации ИИИ одним наземным роботом принципиально не может быть решена с необходимой точностью без входа робота в зону всё более высоких уровней радиации. Повышение точности пеленгации ИИИ возможно за счет работы одновременно двух наземных РТК. БЛА, оснащенный средствами радиационного поиска, может вести разведку местности с высоты, не подвергаясь радиационной опасности. Использование БЛА со средствами видеосъемки дает возможность выбрать место развёртывания группы наземных роботов в относительно безопасной зоне, приблизительно определить зону нахождения ИИИ, оценить наличие препятствий в зоне работ, организовать надежную связь и наблюдение за ходом работ. Однако при проведении воздушной радиационной разведки велика погрешность локализации ИИИ, вызванная пространственным осреднением поля. Таким образом, наилучший результат может быть достигнут при использовании гибридной группы следующего минимального состава: два наземных РТК (легкий разведчик и тяжелый ликвидатор) и два БЛА, один из которых предназначен для радиационной разведки

местности, второй – для видеонаблюдения с проведением работ наземными РТК и организации связи с ними.

Другой пример: роботизированная группа для организации распределенной комплексированной навигационной системы, объединяющей ГНС и два функциональных дополнения: автономную систему ближней радионавигации и систему обсервации по визуальным ориентирам. Навигационная аппаратура потребителя и составные части указанных функциональных дополнений будут размещаться на роботах из состава группы, при этом за счет сетевой связи между членами группы будет обеспечена постоянная взаимная корреляция навигационных данных.

Аналогичные примеры можно привести для подводной среды, где остро стоит проблема выполнения сложных технологических операций на морских объектах при жестких ограничениях на пропускную способность каналов гидроакустической связи даже средней дальности (сотни метров) и проблемах применения кабельной связи, ограничивающей маневренность вблизи подводных конструкций.

Приведенные примеры показывают, что гибридная группа роботов принципиально способна решать нетривиальные комплексные задачи в динамически изменяющейся обстановке. Практическое воплощение подобных сценариев с элементами самоорганизации требует соответствующих методов организации группового взаимодействия, базирующихся на семантических связях между данными, получаемыми группировкой. При этом для принятия решений и согласованных действий используются не массивы разнородных данных, а принцип коллективной ситуационной осведомленности. Система управления в этом случае может проектироваться на основе онтологии [2]. Соответствующая онтологическая модель обеспечит стандартизированные термины и семантические знания для принятия коллективных оперативных решений. В докладе будет представлен подход к построению и использованию такой модели для гибридной группы роботов.

1. *Половко, С.А.* Перспективы применения гибридных групп мобильных роботов специального назначения [Текст] / С.А. Половко, А.В. Попов // Экстремальная робототехника. – 2018. – Т.1, № 1. – С. 25–33.
2. *Зубарева, М.Г.* Методологии проектирования мультиагентных систем [Электронный ресурс] / М.Г. Зубарева, А.А. Цветков, А.Л. Хамуш, Д.К. Шорох, А.В. Шуклин, С.В. Юрсков // Технические науки в России и за рубежом: материалы VI Междунар. науч. конф. (г. Москва, ноябрь 2016 г.). – Москва: Буки-Веди, 2016. – С. 3-8. – URL <https://moluch.ru/conf/tech/archive/228/11320/> (дата обращения: 15.05.2019).

**УПРАВЛЯЕМОЕ ДВИЖЕНИЕ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ  
С ШАГАЮЩИМИ И «ШАГАЮЩЕПОДОБНЫМИ»  
ДВИЖИТЕЛЯМИ\***

*Волгоградский государственный технический университет,  
г. Волгоград,  
Центр технологий компонентов робототехники и мехатроники,  
г. Иннополис,  
dtm@vstu.ru*

Одно из направлений, развивающееся в мобильной робототехнике, состоит в использовании в качестве движителей не только традиционных колесных и гусеничных движителей для наземных роботов [1, 2], но и движителей других типов. Проводятся исследования и уже применяются шагающие движители [3, 4, 5] для различных робототехнических комплексов. С точки зрения реализации тягового усилия их основная особенность состоит в дискретности взаимодействия с опорной поверхностью, что накладывает особенности на проведение тягодинамического расчета [6], учете сил сопротивления движению [7] и в целом к особенности управления движением.

Движители, дискретно взаимодействующие с опорной поверхностью или с телами, взаимодействие с которыми позволяет развивать тяговое усилие и обеспечивать устойчивость мобильного робота, можно определить как «шагающеподобные». К таким движителям относятся, в частности, заклинивающе-поворотные движители, которые уже применяются для лесозаготовок [8]. Их особенность состоит в том, что движение обеспечивается за счет плотного контакта с неподвижными негладкими телами, например, цилиндрическими стержнями, последующего притягивания, отталкивания или поворота относительно этих тел, а затем и переноса захватного устройства к новому телу. Такие роботы в своем составе содержат большее число приводов по отношению к учитываемым степеням свободы. Поэтому одна из основных проблем состоит в согласованной работе приводами, обеспечивающими оптимальность по тому или иному критерию [9, 10]. Проблема согласованной работы приводами характерна и для подводных робототехнических систем с якорно-тросовыми движителями [11]. Основное преимущество таких движителей при транспортировке грузов под водой перед колесными, гусеничными, шагающими и другими, опирающимися на грунт, состоит в практически ничем неограниченной профильной проходимо-

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 18-71-10069.

сти и простоте конструктивного исполнения, а перед плавающими – в отсутствии необходимости строгого обеспечения мореходных свойств. Устойчивость обеспечивается управлением достаточно массивными грузами-якорями. Для таких робототехнических систем, состоящих из роботов-понтонных, основная задача – разработка алгоритмов управления движением грузов-якорей, выбора их «походки», обеспечивающей оптимальность по тому или иному критерию, который может состоять и из нескольких показателей. Как правило, и в этих случаях количество приводов превышает число учитываемых степеней свободы. Методы решения таких задач [12] должны быть адаптированы к расчетам роботов-понтонных с якорно-тросовыми движителями.

Роботы с тросовыми движителями могут быть использованы и для перемещения по вертикальным и близким к вертикальным поверхностям [13]. Их отличие от движителей другого типа, применяющихся для этих целей [14, 15, 16], состоит в конструктивной простоте и простоте системы управления. Это обусловлено естественным прижатием движителей к поверхности перемещения за счет специальной установки на работе дополнительных грузов.

В отдельных случаях количество управляемых приводов может быть меньше числа учитываемых степеней свободы механической системы. Однако это не приводит к невозможности реализации программного движения по всем обобщенным координатам. Так происходит за счет специфического взаимодействия отдельных тел, входящих в рассматриваемую механическую систему, с окружающей средой. Такое явление имеет место для дождевальных машин кругового действия с изменяемой конфигурацией [17]. Изменение конфигурации необходимо для обработки полей некруглой формы, а достигается это за счет обеспечения для опорной тележки возможности совершать вращательное движение относительно вертикальной оси, жестко связанной с фермой дождевальной машины. Управление скоростью опорной тележки заставляет ее занимать необходимое положение за счет эффекта самоориентации самостоятельно.

Рассмотренные типы движителей, шагающие, поворотнорасклинвающие, якорно-тросовые, тросовые, предполагают их использование в качестве независимых управляемых механических систем для выполнения общей задачи – перемещения твердого тела или системы твердых тел.

1. *Ющенко, А.С.* Эргатические мехатронные системы [Текст] / А.С. Ющенко // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2006. – № 3. – С. 12–24.
2. *Юревич, Е.И.* Фундаментальные задачи робототехники [Текст] / Е.И. Юревич // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2011. – № 2. – С. 2–5.
3. *Павловский, В.Е.* О разработках шагающих машин [Текст] / В.Е. Павловский // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2013. – № 101. – С. 1–32.

4. *Брискин, Е.С.* The investigation of walking machines with movers on the basis of cycle mechanisms of walking / E.S. Briskin and etc. // 2009 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation – 2009. – С. 3631–3636.
5. *Брискин, Е.С.* Концепция проектирования, динамика и управление движением шагающих машин. Ч. 3. Алгоритмы управления движением шагающих машин серии «Восьминог» и экспериментальные исследования [Текст] / Е.С. Брискин [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2005. – № 7. – С. 13–18.
6. *Брискин, Е.С.* Тяговая динамика шагающих машин с ортогональными движителями [Текст] / Е.С. Брискин, В.М. Соболев // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1990. – № 3. – С. 28–34.
7. *Игнатъев, М.Б.* Алгоритмы управления роботами-манипуляторами [Текст] / М.Б. Игнатъев, Ф.М. Кулаков, А.М. Покровский. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград: Машиностроение, 1977. – 247 с.
8. *Parker, R.* Robotics in forestry / Richard Parker, Peter W. Clinton, Karen Bayne // New Zealand Journal of Forestry. – February 2016. – № 60(4). – P. 8–14.
9. *Брискин, Е.С.* Об энергетически эффективных походках шагающих роботов [Текст] / Е.С. Брискин, Я.В. Калинин // Экстремальная робототехника. – 2017. – Т. 1, № 1. – С. 146–150.
10. *Барсов, В.С.* Исследование алгоритмов управления приводами робота с поворотнo-заклинивающими движителями [Текст] / В.С. Барсов, Е.С. Брискин, Н.Г. Шаронов // XXX МИКМУС. – 2019. – С. 432–435.
11. *Брискин, Е.С.* Управление движением подводного мобильного робота с якорно-тросовыми движителями [Текст] / Е.С. Брискин [и др.] // Робототехника и техническая кибернетика. – 2018. – № 2 (19). – С. 39–45.
12. *Брискин, Е.С.* Об управлении движением механических систем с избыточным числом управляющих воздействий [Текст] / Е.С. Брискин, Н.Г. Шаронов // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2019. – № 3. – С. 48–54.
13. *Шаронов, Н.Г.* О перемещении роботов по вертикальной шероховатой поверхности с помощью тросовых движителей [Текст] / Н.Г. Шаронов, М.И. Ефимов // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2019. – № 3 (226). – С. 51–54.
14. *Градецкий, В.Г.* Управляемое движение мобильных роботов по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям [Текст] / В.Г. Градецкий, В.Б. Вешников, С.В. Калиниченко, Л.Н. Кравчук; Рос. акад. наук. Ин-т проблем механики. – Москва: Наука, 2001. – 359 с.
15. *Градецкий, В.Г.* Механика миниатюрных роботов [Текст] / В.Г. Градецкий, Л.Ф. Фомин, В.Г. Чащухин, М.М. Князьков // Рос. акад. наук, Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского. – Москва: Наука, 2010. – 270 с.
16. *Silva, Manuel F.* A Survey of Technologies for Climbing Robots Adhesion to Surfaces / Manuel F. Silva, José A. Tenreiro Machado, József K. Tar // IEEE International Conference on Computational Cybernetics. – 2008. – P. 127–132.
17. *Лепетухин, К.Ю.* Об оптимальном управлении взаимным расположением секций дождевальнoй машины кругового действия при обработке некруглых полей [Текст] / К.Ю. Лепетухин, А.В. Малолетов, Е.С. Брискин // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2017. – Т. 18, № 2. – С. 103–107.

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТРАТЕГИЙ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМИ РОБОТАМИ\*

Южный федеральный университет, г. Таганрог,  
aasklyarov@sfedu.ru

### Введение

Очевидно, что для решения масштабных задач, в частности зондирование и исследование больших по площади поверхностей, выполнение тушения пожара, необходимо задействовать большое количество автономных мобильных роботов. Задача управления в таком случае преобразуется в задачу группового управления. Существует множество подходов к организации группового управления мобильными роботами. Из основных методов можно выделить метод оптимизации коллективного поведения [1], метод искусственных потенциальных полей [2, 3], эвристические методы [4, 5], основанные на распознавании ситуации и выработки соответствующих действий, и методы на основе применения нечеткой логики [6, 7].

### Математическая модель группы роботов

В качестве мобильных роботов группы (МРГ) в данной работе рассматриваются мобильные гусеничные роботы. Основной проблемой, возникающей при создании групповой стратегии управления, является осуществление устойчивого передвижения группы роботов в заданную точку пространства [8].

Математическая модель движения группы роботов будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{x}^k &= V^k \cdot \cos \psi^k; \dot{y}^k = V^k \cdot \sin \psi^k; \\ \dot{V}^k &= \frac{u_1^k - R_t}{m}; \\ \dot{\psi}^k &= \omega^k; \dot{\omega}^k = \frac{-Bu_2^k}{2I_z} - \frac{M_r}{I_z}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $x^k, y^k$  – координаты центра масс  $k$ -го робота группы;  $V^k$  – линейная скорость  $k$ -го робота;  $\psi^k$  – угол поворота  $k$ -го робота,  $\omega_{\psi}^k$  – угловая скорость  $k$ -го робота;  $u_1^k, u_2^k$  – каналы управления  $k$ -м МРГ;  $m$  – масса робота;  $R_t$  – сопротивление внешней среды единое для каждого робота;  $B$  –

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-07-00645 А).

расстояние между центральными линиями гусениц робота;  $I_z$  – момент инерции робота;  $M_r$  – момент сопротивления повороту.

### Синтез стратегий группового управления

Для реализации группового управления мобильными роботами в данной работе предлагается использовать принципы и методы синергетической теории управления (СТУ) [9, 10]. Поэтому в качестве основной задачи управления выберем асимптотически устойчивое передвижение группы роботов в заданную позицию.

В СТУ совокупность критериев управления системы принято выражать в виде соответствующей системы инвариантов. Следуя централизованному подходу группового управления в качестве первых инвариантов системы необходимо выбрать перемещение центра масс первого ( $k = 1$ ) или ведущего МРГ в точку с заданными координатами  $x^*$ ,  $y^*$ . Таким образом, подмножество целей для ведущего МРГ будет иметь следующий вид:

$$\Sigma_1^1 = \{x^1 = x^*, y^1 = y^*\}. \quad (2)$$

В свою очередь ведомые МРГ ( $k = 2, 3, \dots, n$ , где  $n$  – количество МРГ) должны выполнять задачу следящей системы, поэтому подмножества целей управления ведомых МРГ будут иметь следующий вид:

$$\Sigma_1^k = \{x^k = x^1 + \Delta_x^k, y^k = y^1 + \Delta_y^k\}, \quad (3)$$

где  $\Delta_x^k, \Delta_y^k$  – коэффициенты смещения ведомых МРГ относительно ведущего;  $k$  – номер ведомого МРГ.

Для осуществления синтеза методом АКАР [9] выразим подмножества целей управления ведущего МРГ (2) через первую макропеременную

$$\Psi_1^1 = \omega^1 + k_1^1(\theta^1 - \theta_0^1), \quad (4)$$

где  $k_1^1$  – положительная константа. Согласно методу синергетического синтеза законов управления, исходная задача разбивается на несколько иерархически связанных подзадач, в данном случае на задачу стабилизации угла поворота робота. Макропеременная (4) при этом должна удовлетворять решению  $\Psi = 0$  системы основных функциональных уравнений (ОФУ):

$$\dot{\Psi}_1^1 + \lambda_1^1 \Psi_1^1 = 0, \quad (5)$$

где  $\lambda_1^1$  – положительная константа.

Из данной системы уравнений (5) определяется «внешний» закон управления ведущего МРГ  $u_2^1$ . Далее, для непосредственного решения задачи перемещения робота в пространстве необходимо для декомпозированной модели

$$\dot{x}^1 = V^1 \cdot \cos \theta_0^1;$$

$$\dot{y}^1 = V^1 \cdot \sin \theta_0^1;$$

$$\dot{V}^1 = \frac{u_1^1 - R_t}{m},$$

ввести вторую макропеременную  $\Psi_2^1 = V^1 - V_{\max}^1 \tanh(\varphi^1)$ , где  $\varphi^1$  – «внутренний» закон управления;  $V_{\max}^1$  – максимально допустимая скорость ведущего МРГ. Решением ОФУ  $\dot{\Psi}_2^1 + \lambda_2^1 \Psi_2^1 = 0$ , является «внешний» закон управления  $u_1^1$ . Для поиска оставшихся неизвестных системы  $(\theta_0^1, \varphi^1)$  для декомпозированной системы

$$\dot{x}^1 = \varphi^1 \cdot \cos \theta_0^1;$$

$$\dot{y}^1 = \varphi^1 \cdot \sin \theta_0^1,$$

введем следующую совокупность макропеременных:

$$\Psi_3^1 = x^1 - x^*;$$

$$\Psi_4^1 = y^1 - y^*,$$

результатом решения ОФУ:

$$\dot{\Psi}_3^1 + \lambda_3^1 \Psi_3^1 = 0;$$

$$\dot{\Psi}_4^1 + \lambda_4^1 \Psi_4^1 = 0,$$

которых будут являться выражения для оставшихся неизвестных системы  $(\theta_0^1, \varphi^1)$ .

Аналогичным способом, для осуществления слежения за ведущим МРГ, выразим подмножество целей управления ведомых МРГ (3) через следующие совокупности макропеременных:

$$\Psi_1^k = \omega^k + k_1^k (\theta^k - \theta_0^k);$$

$$\Psi_2^k = V^k - V_{\max}^k \tanh(\varphi^k),$$

$$\Psi_3^k = x^k - x^1 - \Delta_x^k;$$

$$\Psi_4^k = y^k - y^1 - \Delta_y^k,$$

(6)

где  $V_{\max}^k$  – максимально допустимая скорость движения ведомых МРГ;  $k_1^k$  – положительные константы.

Согласно методу АКАР [9, 10], система макропеременных (6) должна удовлетворять решению  $\Psi_i^k = 0$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) системы функциональных уравнений:

$$\dot{\Psi}_i^k + \lambda_i^k \Psi_i^k = 0, \text{ при } i = \overline{1, 4}. \quad (7)$$

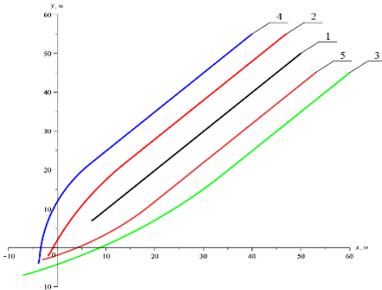
Решением системы функциональных уравнений (7) являются «внешние» законы управления ведомых МРГ  $u_1^k, u_2^k$ , а также вспомогательные переменные  $(\theta_0^k, \phi^k)$ . В итоге поведение группы мобильных роботов на пересечении инвариантных многообразий  $\Psi_i^1 = 0$  и  $\Psi_i^k = 0$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) будет описываться следующей системой:

$$\begin{aligned} \dot{x}^1 &= \lambda_3^1 (-x^1 + x^*); & \dot{x}^k &= \lambda_3^k (-x^k + x^1 + \Delta x_k); \\ \dot{y}^1 &= \lambda_4^1 (-y^1 + y^*); & \dot{y}^k &= \lambda_4^k (-y^k + y^1 + \Delta y_k); \end{aligned}$$

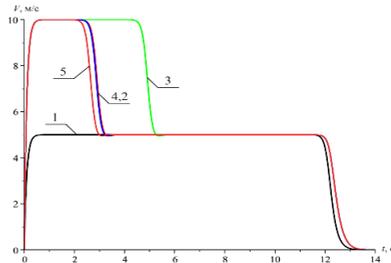
Таким образом, с учетом математической модели мобильного робота (1) и «внешних» управлений ведущего МРГ  $u_1^1, u_2^1$  и ведомых МРГ  $u_1^k, u_2^k$ , можно получить стратегии группового управления.

Проведем компьютерное исследование замкнутой системы. Предположим, что задачу группового построения в пространстве выполняют один ведущий и четыре ведомых ( $k = 5$ ) робота. Ограничим скорость перемещения ведущего порогом в  $V_0^1 = 5$  м/с. Зададим целевые координаты ведущего:  $x^* = 50$  м,  $y^* = 50$  м. Зададим ограничение скорости ведомых порогом в  $V_0^k = 10$  м/с. Предположим, что начальные условия векторов линейной и угловой скоростей МРГ являются нулевыми ( $V^k(0) = 0, \omega^k(0) = 0$ ), масса робота  $m = 1$  кг, расстояние между центральными линиями гусениц 20 см, а сопротивление внешней среды является заранее известным.

В качестве начальных значений положения роботов возьмём следующие значения:  $x^1(0) = 7, y^1(0) = 7; x^2(0) = -2, y^2(0) = -2; x^3(0) = -7, y^3(0) = -7; x^4(0) = -4, y^4(0) = -4; x^5(0) = -3, y^5(0) = -3$ .



**Рис. 1. Траектория движения группы мобильных роботов**



**Рис. 2. Изменение вектора линейной скорости мобильных роботов группы**

На рис. 1 – 2 представлены переходные процессы изменения координат полученной замкнутой системы. Обозначения на рисунках: 1 – ведущий МРГ; 2, 3, 4, 5 – ведомые МРГ.

## Заключение

Таким образом, в статье представлен следующий научный результат – разработана процедура аналитического синтеза стратегии группового управления мобильными роботами с использованием полных нелинейных моделей движения. Указанная стратегия управления обеспечивает асимптотическую устойчивость замкнутых систем и четкое исполнение заданных инвариантов. Использование нелинейных составляющих при синтезе законов группового управления позволяет точно выдерживать требуемое смещение ведомых роботов относительно положения ведущего.

1. *Каляев, И.А.* Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов [Текст] / И.А. Каляев, А.Р. Гайдук, С.Г. Капустян. – Москва: Физматлит, 2009. – 278 с.
2. *Рыжова, Т.П.* Управление коллективом мобильных роботов [Текст] / Т.П. Рыжова // Экстремальная робототехника: труды международной научно-технической конференции. – 2011. – С. 281–287.
3. *Bennet, Derek J.*, Distributed control of multi-robot systems using bifurcating potential fields / Derek J. Bennet, Colin R. McInnes // *Robotics and Autonomous Systems*. – 2010. – № 58. – P. 256–264.
4. *Fierro, R.* A Framework and Architecture for Multi-Robot Coordination / R. Fierro, A. Das, J. Spletzer, J. Esposito, V. Kumar, J. Ostrowski et al. // *Intern. J. of Robotics Research*. – 2002. – Vol. 21, № 10–11. – P. 977–995.
5. *Nicolescu, M.* Experience-based representation construction: learning from human and robot teachers / M. Nicolescu, M. Mataric // *Proc. of the IEEE/RJS Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems*. – 2001. – Vol. 2. – P. 740–745.
6. *Bazoula, A.* Formation Control of Multi-Robots via Fuzzy Logic Technique / A. Bazoula, M. Djouadi, H. Maaref // *Intern. J. of Computers, Communications & Control*. – 2008. – Vol.3. – P. 179–184.
7. *Benbouabdallah, K.* A Fuzzy Logic Behavior Controller for a Mobile Robot Path Planning in Multi-obstacles Environment / K. Benbouabdallah, Z. Qi-dan // *Research J. of Applied Sciences, Engineering and Technology*. – 2013. – Vol. 5(14). – P. 3835–3842.
8. *Скляр, А.А.* Синтез нелинейного закона управления мобильной робототехнической платформой на колесах Илона [Текст] / А.А. Скляр, Т.Е. Похилина // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2017. – № 3 (188). – С. 121–130.
9. *Колесников, А.А.* Синергетические методы управления сложными системами: механические и электромеханические системы [Текст] / А.А. Колесников, Г.Е. Веселов, А.Н. Попов, А.С. Мушенко и др. – Москва: Ком-Книга, 2006. – 304 с.
10. *Веселов Г.Е.* Прикладная теория синергетического синтеза иерархических систем управления [Текст] / Г.Е. Веселов // *Известия ТРТУ. Тематический выпуск. Прикладная синергетика и системный синтез*. – 2006. – №5. – С. 66–76.

## **ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПРОЕКТЫ ПО СОЗДАНИЮ РОБОТИЗИРОВАННЫХ МОБИЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

*Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, г. Москва,  
fic51@mail.ru*

### **Введение**

Высокие производственные издержки и низкая производительность труда, с которыми сталкивается сельское хозяйство, являются главной проблемой отрасли. Поэтому цифровизация и роботизация сельскохозяйственного производства, как способ повышения ее эффективности, является актуальным [1, 2].

С целью технико-технологического обеспечения сельскохозяйственного производства рассматривается возможность внедрения роботизированных машинных технологий, создание интеллектуальных роботизированных средств агропромышленного производства из-за сокращения населения в сельской местности и возрастающего значения продовольственной безопасности страны [3, 4].

Включение роботов в технологический цикл производства продукции в растениеводстве позволит перейти на высокоинтенсивные технологии в сельскохозяйственном производстве и в полной мере реализовать технологию точного земледелия.

### **Основная часть**

Традиционно, все последние 100 лет развития сельхозмашиностроения основными компонентами их силовых передач и приводов являлись привода механические, гидравлические и пневматические. В связи с бурным развитием электротехнической, электронной и кабельной промышленности, а также аппаратного обеспечения информационных технологий, появился явно выраженный мировой тренд в сельскохозяйственном машиностроении – применение высокоэффективных автоматизированных и роботизированных электроприводов.

С 2019 года ФНАЦ ВИМ планирует разработки роботизированной базовой мобильной платформы (рис. 1,а и 1,б) на частотно управляемом электроприводе мощностью 50 – 60 кВт в двух конструктивных исполнениях (рис. 2):

- с применением системы «Дизель-Генератор» и суперконденсаторов (рис. 2,а);
- применением высокоэффективных автономных аккумуляторных батарей (рис. 2,б).

Ширина колеи и длина мобильного энергосредства (МЭС) будут иметь возможность регулироваться механически. Привод ВОМ – электрический. Управлять движением МЭС планируется как джойстиком из кабины, так и с переносного пульта вне ее.

Также имеется возможность изменения колеи МЭС, управление осуществляется дистанционно. МЭС используется для осуществления операции обработки химикатами растений. Имеется возможность управления штангой с форсунками и изменения в широком диапазоне высот, что позволяет использовать данное шасси на разных сельскохозяйственных культурах.



**Рис. 1. Перспективные проекты МЭС разработки ВИМ:**  
**а – многофункциональное МЭС тягового класса 0,9;**  
**б – беспилотное самоходное гусеничное шасси**



**Рис. 2. Концептуальные варианты применения автоматизированных электроприводов**

Применение автоматизированного силового электропривода позволяет повышать энергоэффективность (высокое КПД), экологическую безопасность и маневренность машины, отказаться от сложных кинематических схем трансмиссий, снижать уровень вибрации и шума, обеспечивать бесступенчатое регулирование скорости агрегата, а также в некоторых вариантах отказаться от ДВС с низким КПД. Такую модернизацию невозможно организовать без разработки алгоритма управления энергетическими и эксплуатационными процессами роботизированного

мобильного агрегата. Следовательно, одним из основных вопросов при разработке программно-аппаратного обеспечения роботизированных МЭС с/х назначения является выбор эффективной элементной базы: датчиков, сенсоров, элементов систем управления, исполнительных устройств и электронных блоков, необходимых для осуществления управления энергетическими и эксплуатационными процессами и т.д.

### **Заключение**

Мобильный роботизированный агрегат с/х назначения является автономным механизированным средством повышенной опасности. Поэтому требования к движению агрегата, самодиагностике энергетических, технологических и эксплуатационных параметров очень высокие.

Структура беспилотного робота, выполняющего основные технологические операции в сельскохозяйственном производстве, должна быть единой и строиться по аграрно-модульному принципу на унифицированных аппаратных и программных средствах.

В настоящее время не существует одной какой-либо системы, надежно осуществляющей позиционирование и вождение сельскохозяйственного агрегата в различных условиях эксплуатации, что значительно усложняет программное обеспечение и снижает надежность и безопасность роботизированной технологии.

При большом разнообразии технологических процессов в сельскохозяйственном производстве методология решения задач автономного роботизированного агрегата заключается в таком описании данных и алгоритмов, которые можно применять к различным техпроцессам, не меняя их структуры.

1. *Годжаев, З.А.* Беспилотное мобильное энергосредство сельскохозяйственного назначения [Текст] / З.А. Годжаев // Тракторы и Сельхозмашины. – 2016. – № 10. – С. 41–44.
2. *Годжаев, З.А.* Современные конструкторско-технологические методы создания и испытаний мобильных транспортных средств [Текст] / З.А. Годжаев, В.В. Шеховцов // Известия Волгоградского государственного технического университета Серия «Наземные транспортные системы». – 2011. – Вып. 4, № 12 (85). – С. 5–8.
3. *Кузьмин, В.А.* Искусственная нейронная сеть для обоснования параметров ходовых систем тракторов [Текст] / В.А. Кузьмин, Р.С. Федоткин, В.А. Крючков // Сельскохозяйственные Машины И Технологии. – 2017. – № 4. – С. 24–30.
4. *Senkevich, S.E.* Use of an Elastic-Damping Mechanism in the Tractor Transmission of a Small Class of Traction (14 kN): Theoretical and Experimental Substantiation / S.E. Senkevich, N.V. Sergeev, E.K. Vasilev, Z.A. Godzhaev, & V. Babayev // Advanced Agro-Engineering Technologies for Rural Business Development. – IGI Global, 2019. – С. 149–179.

## **РАЗРАБОТКА МЕТОДА ИДЕНТИФИКАЦИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МНОГОСТЕПЕННЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ\***

*Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН,  
Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток,  
undim@dvo.ru, gubankov.as@dvfu.ru*

### **Введение**

В настоящее время предложено множество методов синтеза и аппаратных решений для высокоточных систем управления приводами многостепенных манипуляторов (ММ), и они успешно используются в серийной технике.

При этом традиционный метод программирования ММ заключается в задании базовых точек траекторий движения рабочих инструментов (РИ) с помощью их ручного вывода в требуемые точки рабочей зоны с учетом реального расположения обрабатываемых деталей и дополнительного оборудования. В этом случае в автоматическом режиме точность выхода РИ ММ в базовые точки траектории определяется точностью вывода углов поворота приводов ММ с помощью их следящих систем управления в желаемые значения, зафиксированные в процессе его программирования. Однако реальная точность позиционирования РИ ММ в абсолютной системе координат (АСК) определяется в основном точностью кинематической модели ММ, так как его контроллер определяет положение РИ с использованием только этой модели и показаний датчиков углов поворота его приводов. Поэтому в случае отличия геометрических параметров модели ММ, используемой контроллером, от их реальных значений расхождения между рассчитанным и реальным положением РИ могут достигать нескольких миллиметров. Это является недопустимым в случае автоматического формирования траекторий РИ ММ на основе информации, полученной из САД-моделей или от внешних систем технического зрения (лазерных или оптических сканеров), так как не позволит точно выполнять технологические операции [1].

Для уточнения параметров математических моделей ММ традиционно используются методики, основой которых являются внешние измерительные устройства [2, 3]. Раньше это были различные устройства отслеживания линейных перемещений РИ манипулятора, ультразвуковые и инфракрасные измерительные системы, теодолиты и стереоскопическая триангуляция. В настоящее время это высокоточные оптиче-

---

\* Работа поддержана Минобрнауки (Госзадание №2.11216.2018/11.12).

ские сканеры, лазерные трекары, контрольно-измерительные машины. Помимо неудобства использования на практике предлагаемых алгоритмов идентификации, основанных на статистическо-вероятностном подходе и требующих знания некоторых сложно определяемых параметров, например, матриц ковариации, эти методики обладают существенным недостатком – чрезмерной дороговизной используемого измерительного оборудования. Это оборудование часто недоступно на производстве или организации системному интегратору. В результате возникает задача разработки упрощенной процедуры идентификации параметров кинематической модели ММ, не требующей использования дорогостоящего специализированного оборудования. Для замены данных от внешних высокоточных сенсоров, измеряющих положение РИ ММ, может быть использована процедура, аналогичная способу определения рабочей точки инструмента в типовых ММ. То есть будут использованы данные от их датчиков углов поворота приводов отдельных степеней подвижности при выходе РИ ММ в одну и ту же точку пространства с разной ориентацией инструмента. На основе этой информации будет разработан метод идентификации параметров кинематической модели ММ.

### Метод идентификации геометрических параметров ММ

Исходными данными для оценки геометрических параметров ММ являются  $n$  серий измерений векторов  $Q$  обобщенных координат (углов поворота приводов) ММ. Каждая  $i$ -я серия измерений состоит из  $m_i$  векторов  $Q$ , которые соответствуют положению ММ при выводе с разной ориентацией рабочей точки инструмента в одну и ту же точку пространства  $X^i$ , координаты которой неизвестны. Как правило, таким инструментом является закрепленный на фланце остроконечный шуп.

Каждому вектору  $Q_j^i, i = (\overline{1, n}), j = (\overline{1, m_i})$  можно поставить в соответствие вектор  $\tilde{X}_{t,j}^i$  координат рабочей точки инструмента  $X_{t,j}^i$  в АСК. Для этого нужно решить прямую задачу кинематики ММ, используя номинальные геометрические параметры, взятые, например, из технической документации. Координаты рассчитанных точек  $\tilde{X}_{t,j}^i$  будут отличаться от координат  $X_{t,j}^i$  реального положения рабочей точки инструмента в силу отличия используемых параметров ММ от их реальных значений. Однако так как РИ в каждой серии измерений выводится в одну и ту же точку  $X^i$  с неизвестными координатами, то и реальные координаты рабочей точки в одной серии измерений будут совпадать. Этот факт можно использовать для идентификации параметров ММ.

Оценку матрицы  $\hat{\Phi}$  параметров манипулятора можно осуществить, подбирая указанные параметры так, чтобы координаты  $\hat{X}_{t,j}^i$ , вычисленные по модели с использованием  $\hat{\Phi}$ , для отдельной серии измерений

сблизились на минимальное расстояние. То есть оценку качества идентификации параметров манипулятора можно производить по следующему критерию:

$$J(\mathbf{Q}, \hat{\Phi}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i-1} \sum_{k=j+1}^{m_i} (\hat{X}_{t,j}^i - \hat{X}_{t,k}^i)^2. \quad (1)$$

Выражение (1) не содержит реальных координат точек  $X^i$ , поэтому для оценки параметров ММ не требуется использование высокоточных измерительных систем.

Далее с помощью метода Левенберга-Марквардта выполняется настройка геометрических параметров модели так, чтобы уменьшить расстояния между положениями инструмента, рассчитанными на основе математической модели этого ММ с использованием сохраненных данных об углах поворота приводов.

Результаты численных экспериментов показали, что идентифицированные значения параметров ММ позволяют вычислять положение РИ с точностью до 0,016 мм в случае, если измерения проведены без погрешностей, и с точностью до 0,16 мм, если измерения проведены с погрешностями. Такой точности достаточно для выполнения большинства основных технологических операций. При использовании номинальных параметров ММ точность определения положения инструмента резко падает, и ошибка может достигать 2,4 мм, что является недопустимым при выполнении ответственных технологических операций.

### Заключение

В работе предложен метод идентификации геометрических параметров ММ, не требующий использования внешних высокоточных измерительных систем. В результате выполнения предложенной процедуры можно уточнить эти параметры и тем самым, как показали результаты исследований, существенно увеличить точность движения ММ в АСК.

1. *Филаретов, В.Ф.* Управление манипуляторами при выполнении различных технологических операций [Текст] / В.Ф. Филаретов, А.В. Зуев, А.С. Губанков. – Москва: Наука, 2018. – 232 с.
2. *Kolyubin, S.* Robot Kinematics Identification: KUKA LWR4+ Redundant Manipulator Example / S. Kolyubin, P. Paramonov, A. Shiriaev // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conference Series. – 2015. – Vol. 659, 012011. – P. 1–12.
3. *Klimchik, A.* Design of calibration experiments for identification of manipulator elastostatic parameters / A. Klimchik, A. Pashkevich, Y. Wu, S. Caro, V. Furet // J. of Mechanics Engineering and Automation. – 2012. – Vol. 2. – P. 531–542.

## **СИНТЕЗ СИСТЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАДАЧ В КОЛЛЕКТИВЕ РОБОТОВ С УЧЕТОМ ОБЩНОСТИ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ\***

<sup>1</sup>*Уфимский государственный авиационный технический университет,*  
<sup>2</sup>*Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, г. Уфа,*  
*ovd@uimech.org*

Требование по повышению автономности мобильных робототехнических систем (РТС) накладывает существенные ограничения на их массогабаритные, динамические и базовые функциональные характеристики. Свойственные современным мобильным РТС высокие энергетические затраты и малая емкость бортовых источников питания считаются основной причиной, сдерживающей их массовое применение при явной эффективности. Одним из вариантов повышения автономности при групповом применении мобильных роботов может стать оптимальное распределение задач, поставленных перед группой, выполняемое с учетом начального заряда батареи питания, энергопотребления каждого робота и интегральной энергетической стоимости выполнения отдельных заданий. Синтез быстрых и эффективных алгоритмов распределения задач в гетерогенных группах роботов является сложной комбинаторной проблемой, тем не менее известны примеры достаточно эффективного решения близких по постановке задач с использованием эволюционных подходов на основе генетических алгоритмов (ГА) [1].

В настоящей работе рассматривается алгоритм оптимального распределения задач в гетерогенной группе мобильных роботов, основными критериями которого являются общий расход энергии коллектива и величины удельных затрат на выполнение отдельных работ. Предлагаемый алгоритм позволяет также эффективно решить многокритериальную оптимизационную задачу с учетом временных затрат (время, затраченное роботом на движение от исходного положения до места выполнения задачи) и интегрального критерия эффективности роботов, учитывающего энергетику и функциональную насыщенность каждого агента коллектива.

### **Постановка и методика решения задачи**

Имеется рабочее поле размером  $N \times M$ , на котором находятся  $n$  роботов и  $N_3$  заданий, известны координаты роботов  $(x_i, y_i, i \in [1, n])$  и ко-

---

\* Работа поддержана грантом РФФИ № 16-29-04165-офи\_м и Программой Президиума РАН № 1.29П.

ординаты мест, где необходимо выполнить поставленные задания ( $x_j^*, y_j^*, j \in [1, m]$ ). Основная цель, поставленная перед коллективом роботов, – выполнение всех заданий в доступном рабочем пространстве

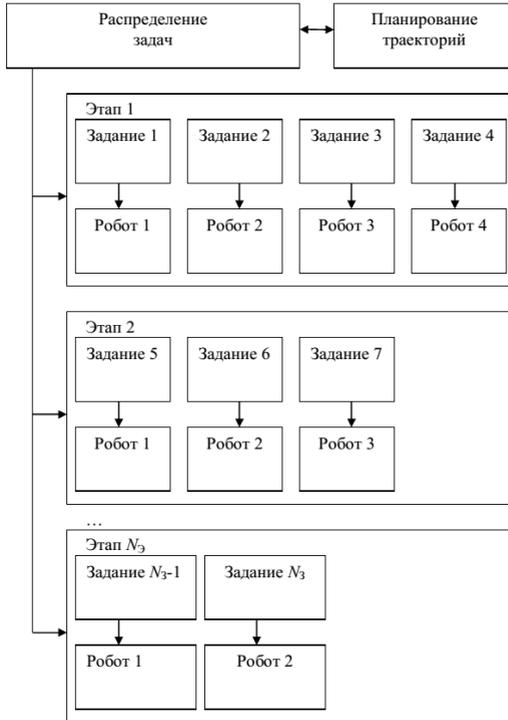


Рис. 1. Распределение заданий

при минимизации количества НЭ этапов и затрат энергии (рис. 1).

Ячейкам рабочего пространства назначен идентификатор входящих в него заданий (вектор  $V_j$ ). Каждый робот коллектива имеет идентификатор класса ( $F_i$ ). Класс робота определяет группу заданий, которые он может выполнить, а также затраты энергии при работе в различных режимах. Было выделено три режима (состояние робота): сон (ожидание задания), перемещение и выполнение задания, каждому из которых соответствует своя величина энергопотребления (для  $i$ -го робота соответственно  $W_i^{SL}, W_i^{MV}, W_i^{WR}$ ).

Каждый робот обладает начальным уровнем заряда ( $P_i^R$ ). Задания также разбиты на несколько классов по оценкам величины энергозатрат робота на выполнение данного типа задач –  $W_j^{WR}$ . Роботу распределяется задание только тогда, когда у него достаточно энергии на успешное выполнение. Суммарные затраты энергии на выполнение сгенерированного плана для  $i$ -го этапа ищутся как

$$W_{\Sigma} = \sum_{k \in N_{SL}} W_k^{SL} + \sum_{m \in N_W} (W_m^{MV} + W_m^{WR}),$$

где  $N_{SL}$  – множество роботов, не участвующих в выполнении заданий;  $N_W$  – множество роботов, задействованных в выполнении заданий. Энергозатраты  $i$ -го робота на перемещение ( $W_i^{MV}$ ) из начального поло-

жения в пункт выполнения  $j$ -го задания считаются пропорциональными пройденному расстоянию:

$$W_{ij}^{MV} = k_i^{MV} \cdot S_{ij},$$

где  $k_i^{MV}$  – удельный расход работа на перемещение;  $S_{ij}$  – протяженность траектории  $i$ -го робота при перемещении в ячейку  $j$ -го задания, информация из системы планирования траекторий (см. рис. 1).

Условием прекращения работы алгоритма является обнуление количества невыполненных заданий  $N_{out}$ . Поэтому для синтезируемой системы распределения заданий использованы следующие критерии оценки полученного решения:

- 1) общее энергопотребление:  $\phi_1(\bar{z}) = W_{\Sigma}(\bar{z}) \rightarrow \min_{\bar{z} \in Z}$ ;
- 2) число невыполненных заданий:  $\phi_2(\bar{z}) = N_{out}(\bar{z}) \rightarrow \min_{\bar{z} \in Z}$ ,

где  $\bar{z}$  – вектор номеров задач, каждый элемент которого  $z_i$ ,  $i = \overline{1, n}$  определяет задачу для  $i$ -го робота на следующий шаг.

Синтез алгоритма распределения заданий с учетом описанных выше начальных условий, введенных ограничений и принятых критериев оценки проводился с использованием ГА, что позволило получить решения близкие к оптимальному по Парето за приемлемое время. В процессе синтеза был получен ГА с проведением сортировки по доминированию и с элитарным отбором (NSGA-II) [2, 3], с введенными целочисленными ограничениями [4].

ГА реализован в виде скрипта в *MATLAB*, позволяющего оценить в ходе экспериментов тактику распределения роботов при произвольном числе заданий и меняющемся количестве роботов. Проведены эксперименты по сокращению расходов энергии за счет уменьшения числа роботов, выполняющих задачи, а также отработана методика форсирования выполнения заданий за счет повышения затрат энергии.

1. *Даринцев, О.В.* Система планирования движения группы мобильных микроботов на основе генетических алгоритмов [Текст] / О.В. Даринцев, А.Б. Мигранов // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2007. – № 3. – С. 163–173.
2. *Лотов, А.В.* Многокритериальные задачи принятия решений [Текст] / А.В. Лотов. – Москва: МАКС Пресс, 2008. – 197 с.
3. *Goldberg, D.* Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning / D. Goldberg. – Massachusetts: Addison-Wesley, 1989.
4. *Панченко, Т.В.* Генетические алгоритмы [Текст]: учебно-методическое пособие/ Т.В. Панченко; под ред. Ю.Ю. Тарасевича. – Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет», 2007. – 87 с.

**ПРОБЛЕМЫ ГРУППОВОГО ПРИМЕНЕНИЯ  
РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ВОЕННОГО  
НАЗНАЧЕНИЯ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ**

<sup>1</sup>*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлунского РАН,*

<sup>2</sup>*Национальный центр развития технологий и базовых элементов  
робототехники Фонда перспективных исследований,*

<sup>3</sup>*АО «Бортовые аэронавигационные системы», г. Москва,  
ermolov@ipmnet.ru, hspb1@yandex.ru, KHripunov@ians.aero*

В настоящее время особая роль в обеспечении национальной безопасности и обороны государства отводится военной робототехнике. Темпы развития военной робототехники определяют уровень технологического превосходства средств вооруженной борьбы и облик перспективных роботизированных армий.

В силу прогнозируемого характера войн будущего, как противоборства группировок боевых роботов, важнейшим направлением в области роботизации вооруженных сил является отработка технологий группового применения однотипных, разнотипных робототехнических комплексов военного назначения (РТК ВН), а также обеспечения совместных действий с обычными (экипажными) средствами вооруженной борьбы [1].

Групповое применение РТК ВН подразумевает совместные согласованные действия нескольких РТК ВН, направленные на решение общей задачи и реализацию целевого назначения группы [2], [4].

Главным преимуществом группового применения является возможность достижения синергетического эффекта, состоящего в существенном увеличении боевого потенциала группы по сравнению с отдельно взятыми боевыми единицами [3].

Несмотря на очевидные достоинства группового применения, оно пока не нашло широкого внедрения в практику военной робототехники.

Причиной такого положения является ряд проблемных факторов, прямо или косвенно сдерживающих распространение группового применения РТК ВН. Данные факторы можно условно разделить на проблемные факторы методического характера и проблемные факторы технического характера.

К числу основных проблемных факторов методического характера относятся следующие:

- нечеткость понятийного аппарата «групповое применение РТК ВН»;
- частичная определенность перечня задач группового применения РТК ВН;

- низкий уровень проработки тактики и сценариев группового применения РТК ВН;
- несовершенство подходов по обоснованию выбора метода управления группой РТК ВН;
- недостаточный уровень алгоритмического обеспечения группового применения РТК ВН;
- отсутствие требований к обеспечению группового применения РТК ВН;
- непроработанность нормативных документов по групповому применению РТК ВН;
- несформированность методического обеспечения системы испытаний группового применения РТК ВН.

Проблемные факторы технического характера включают:

- низкий уровень автономности РТК ВН;
- отсутствие средств обеспечения безопасности при групповом применении РТК ВН;
- отсутствие унифицированных интерфейсов и протоколов обмена данными для обеспечения группового применения РТК ВН;
- низкая скрытность, защищенность и пропускная способность каналов связи и управления РТК ВН;
- недостаточная проработка программно-аппаратных средств для организации группового применения РТК ВН;
- отсутствие интеллектуальных человекомашинных интерфейсов управления групповым применением РТК ВН;
- низкая техническая оснащенность экспериментально-испытательной базы для проведения проверок и испытаний группового применения РТК ВН.

В качестве основных направлений развития технологий РТК ВН в обеспечение их группового применения предлагаются следующие:

- повышение уровня автономности РТК ВН;
- развитие средств обеспечения безопасности группового применения РТК ВН;
- унификация и стандартизация РТК ВН;
- увеличение скрытности и устойчивости каналов связи и управления РТК ВН;
- уточнение понятийного аппарата и тактики группового применения РТК ВН;
- развитие интеллектуальных человекомашинных интерфейсов управления групповым применением РТК ВН;
- разработка методического обеспечения и создание технических средств для экспериментально-испытательной базы проведения проверок и испытаний группового применения РТК ВН.

Часть исследований поддержана программой Президиума РАН "Актуальные проблемы роботизированных систем".

1. *Попов, И.М.* Война будущего: Концептуальные основы и практические выводы [Текст] / И.М. Попов, М.М. Хамзатов // Очерки стратегической мысли. – 2-е изд., испр. – Москва: Кучково поле, 2017.
2. *Хрипунов, С.П.* Методический подход к синтезу интеллектуальной информационно-управляющей системы группового применения робототехнических комплексов военного назначения [Текст] / С.П. Хрипунов, С.В. Васильев, И.В. Благодаряшев // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2017. – Т. 15, № 2.
3. *Буравлев, А.И.* Модель оценки эффективности боевых систем [Текст] / А.И. Буравлев, И.П. Русанов // Военная мысль. – 2009. – № 5.
4. *Ermolov, I.L.* Emerging issues of robots to be used in groups / I.L. Ermolov // Studies in systems, decision and control. – New York: New York, 2019. – Vol. 174.

**Ю.Ф. Жильникова, В.В. Тютиков**

### АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ СИНТЕЗА СЕЛЕКТИВНО-ИНВАРИАНТНЫХ СИСТЕМ\*

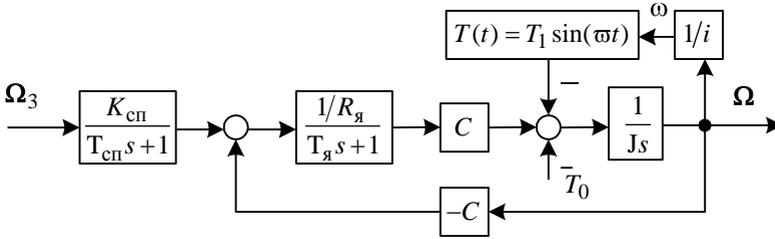
*Ивановский государственный энергетический университет,  
г. Иваново,  
tvv@ispu.ru*

В последнее время возобновился интерес к синтезу селективно-инвариантных систем [1, 2]. Это связано в первую очередь с применением индивидуальных приводных устройств, упрощением или исключением кинематических передач между электродвигателем и рабочим органом, повышением требований к качеству управления технологическими объектами, а также с развитием аналитических методов синтеза и возросшими возможностями микропроцессорных средств управления.

В настоящем исследовании сравниваются два подхода к синтезу линейных систем управления электромеханическим объектом (рис. 1) [1, 2] селективно-инвариантных к комбинированному возмущающему воздействию вида  $T(t) = T_0 + T_1 \sin(\omega t)$ , где  $T_0$  – постоянная составляющая, а  $T_1$  и  $\omega$  – амплитуда и частота гармонической составляющей возмущающего воздействия. Подходы интересны тем, что при их использовании не требуется измерять возмущающие воздействия, однако необходимым условием является наличие информации о его модели.

---

\* Работа выполнена в рамках проектной части государственного задания Минобрнауки.



**Рис. 1. Объект управления**

На рис. 1:  $K_{сп}$ ,  $T_{сп}$  – коэффициент усиления и постоянная времени силового преобразователя;  $R_я$ ,  $T_я$ ,  $C$ ,  $J$ ,  $\Omega_3$ ,  $\Omega$  – сопротивление и постоянная времени якорной цепи, конструктивная постоянная и момент инерции, заданная и реальная частоты вращения ротора электродвигателя;  $i$  – передаточное отношение редуктора.

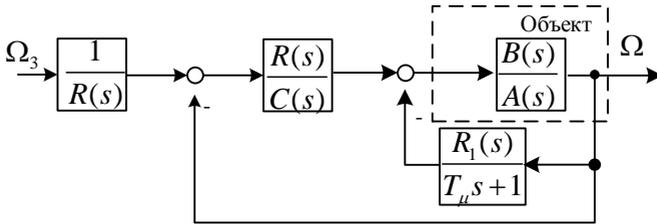
Задача в обоих случаях решается методом аналитического синтеза систем с управлением по выходу при использовании принципа внутренней модели возмущения. Это позволяет установить условия разрешимости задачи синтеза селективно-инвариантных систем управления и обеспечить грубость свойства селективной инвариантности к вариациям параметров синтезируемой системы и возмущающего воздействия.

Особенностью подхода к синтезу селективно-инвариантных систем, изложенного в [1], является последовательный расчет основного  $H(s) = R(s)/C(s)$  (внешнего, обеспечивающего технические требования к САУ) и вспомогательного  $H_1(s) = R_1(s)$  (внутреннего) полиномиальных регуляторов (рис. 2), где  $C(s)$ ,  $R(s)$ ,  $R_1(s)$  – полиномы соответствующих степеней. Значение параметра, определяющего быстродействие внутреннего контура управления, является результатом синтеза внешнего регулятора. Техническая реализуемость дифференцирующего регулятора  $H_1(s)$  обеспечивалась добавлением в знаменатель передаточной функции малой постоянной времени  $T_\mu$ .

Подход, изложенный в [2], предполагает реализацию управляющего устройства в виде одного динамического блока.

Математическая модель возмущения (внутренняя модель) при решении задачи синтеза, согласно теории  $K(p)$ -изображений В. С. Кулебакина, принималась в виде  $H(s) = s^2 + \omega^2$ , где  $s$  – комплексная переменная Лапласа;  $\omega$  – частота вращения рабочего органа электромехани-

ческой системы. При синтезе управляющего устройства не учитывалась малая постоянная времени  $T_{\text{СП}}$  силового преобразователя.



**Рис. 2. Структура селективно-инвариантной САУ**

В ходе анализа результатов оценивалась сложность процедуры синтеза селективно-инвариантных систем, качество компенсации постоянных и гармонических возмущений, чувствительность к вариациям параметров объекта управления и возмущающих воздействий, к помехе в канале измерения.

1. Копылова, Л.Г. Компенсация гармонических возмущений момента нагрузки в следящих электро-механических системах и элементы структурной оптимизации регуляторов [Текст] / Л.Г. Копылова, С.В. Тарарыкин // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 6. – С. 44–51.
2. Гайдук, А. Р. Синтез селективно инвариантных систем управления [Текст] / А. Р. Гайдук // Вестник ИГЭУ. – 2017. – Вып. 1. – С. 46–54.

**А.А. Зеленский, Т.Х. Абдуллин, Ю.В. Илюхин, М.А. Харьков**

## СОЗДАНИЕ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ РОБОТОВ И МНОГОКООРДИНАТНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

*Московский государственный технологический  
университет «СТАНКИН», г. Москва,  
everestultimate@yandex.ru*

При создании систем управления движением промышленных роботов и многокоординатных технологических машин, например пятикоординатных станков, в основном используется кинематическое управление, основанное на решении обратной задачи кинематики (ОЗК) и позволяющее по желаемым координатам рабочего органа или инструмента определить желаемые обобщённые координаты звеньев механизма робота или иной технологической машины. Требования к современ-

ным системам управления, которые должны работать в реальном времени, становятся всё более жёсткими. Для достижения высокой динамической точности и быстродействия робота длительность такта не должна превышать 100 – 500 мкс [1], а в некоторых случаях быть меньше 50 – 100 мкс. Вычислители традиционной структуры во многих случаях уже не могут обеспечить выполнение этих требований из-за большого объёма вычислений. Главная проблема при решении ОЗК состоит в необходимости расчета большого количества прямых и обратных тригонометрических функций, выполнении множества арифметических операций извлечения квадратного корня, умножения, деления и т.д. Поэтому поиск рациональных структурных решений и компонентов для создания систем управления является одной из наиболее важных задач, возникающих при построении современных систем управления роботами и многокоординатных станков.

Для решения поставленной задачи предложено и реализовано несколько вариантов построения высокопроизводительных вычислителей систем управления на основе программируемых логических интегральных микросхем (ПЛИС), высокая эффективность которых была подтверждена в работах [2 – 4]. Теоретический анализ и проведённые эксперименты показали, что основой для построения быстродействующих систем управления на основе ПЛИС является применение софт-процессоров. Реализация ядра системы управления на софт-процессоре в составе ПЛИС существенно расширяет её возможности и позволяет создавать дополнительные специализированные модули, например, модули обеспечения безопасности робототехнического и станочного оборудования и защиты оператора [5].

Исследования показали, что для эффективного решения ОЗК необходимо применять софт-процессор совместно со сложно-функциональными аппаратными блоками (СФ-блоками), обеспечивающими распределение вычислительных процессов в системе. Установлено, что высокой эффективностью обладает решение, основанное на применении софт-процессора, специального аппаратного блока FPN2 и включении в систему аппаратных СФ-блоков вычисления арктангенса, синуса и косинуса. Предложенный подход позволил выполнить расчет ОЗК для трехзвенного шарнирного манипулятора за десятки микросекунд. Время решения ОЗК для пятикоординатного станка составило 19,28 мкс при использовании 3 2245 логических элементов.

Максимальная производительность вычислений достигается при подключении софт-процессора к специализированному вычислителю, состоящему из множества СФ-блоков. Но такой вариант построения системы требует использования наибольших ресурсов ПЛИС. Результаты экспериментов показали, что минимальное время, затрачиваемое на решение

ОЗК, равно 6,1 мкс при использовании 69 090 логических элементов. Достичь столь высокой производительности с применением традиционных типов вычислителей не представляется возможным из-за присущих им ограничений принципиального характера. Поэтому вычислители для решения ОЗК на основе ПЛИС можно рассматривать как перспективные средства для построения современных систем управления движением роботов и многокоординатных технологических машин, обладающих исполнительными механизмами со сложными кинематическими схемами.

1. *Martinov, G.M.* Construction of a Specialized CNC System for Thread Grinding Machines / G. M. Martinov, I. A. Kovalev, A. Al Khoury // 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), 9–16 Sept. 2018., Sochi: EEEE.
2. *Munoz, D.M.* FPGA Implementation for Direct Kinematics of a Spherical Robot Manipulator / D.M. Munoz, D.F. Sanchez, J.M. Motta, C. H. Llanos // International Conference on Reconfigurable Computing and FPGAs. – 2009. – Vol. 1. – P. 416–421.
3. *Kung, Y.S.* Design of Inverse Kinematics IP for a Six-Axis Articulated Manipulator / Y.S. Kung, M.K. Wu, B. T. H. Linh, T.H. Jung, S.H. Lee, W.C. Chen // CACS International Automatic Control Conference (CACS), 2–4 Dec. 2013. – P. 300–305.
4. *Wu, M.K.* Fixed-Point Computation of Robot Kinematics in FPGA / Y.S. Kung, Y.H. Huang, T.H. Jung // International Conference on Advanced Robotics and Intelligent Systems (ARIS), 6–8 June 2014. – P. 35–40.
5. *Зеленский, А.А.* Система безопасности станочного оборудования и защиты оператора на основе распределенной системы управления [Текст] / А.А. Зеленский, М.А. Харьков // Вестник МГТУ «Станкин». – 2018. – № 3 (46). – С. 25–29.

*П.А. Кацков, И.А. Носков, К.С. Яковлев, А.В. Петров*

## АВТОМАТИЧЕСКОЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЕ МОБИЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ НА ОСНОВЕ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ\*

*Рыбинский государственный авиационный технический университет  
имени П.А. Соловьева, г. Рыбинск,  
ФИЦ «Информатика и управление» РАН, г. Москва,  
yakovlev@isa.ru*

### Задача

В работе рассматривается задача автоматического движения колесной мобильной платформы вдоль произвольной линии на основе системы технического зрения, состоящей из одной видеокамеры и одноплатного встраиваемого компьютера Raspberry Pi, широко применяющегося в робототехнике для решения различных навигационных задач

---

\* Работа была выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-37-20032).

(см. [1]). Для решения этой задачи предлагается использовать аппарат искусственных нейронных сетей, в частности сверточных нейронных сетей, которые в последнее время демонстрируют результаты высокого уровня для решения широкого класса задач, связанных с обработкой изображений, таких как, например, классификация [2], семантическая сегментация [3], генерация изображений [4] и др. Помимо нейронной сети для решения рассматриваемой задачи используются классические алгоритмы компьютерного зрения, такие как фильтр Канны, размытие (blur) и другое.



*Рис. 1. Мобильная платформа (слева), полигон (справа)*

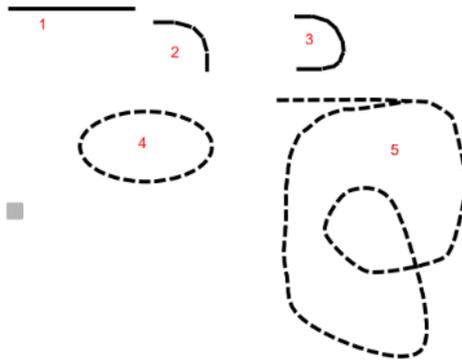
Робототехническая платформа (см. рис. 1 слева) имеет 6 колес с электромоторами и оборудована микрокомпьютером Raspberry Pi 3, камерой с разрешением 5 Мр, платой управления моторами на базе Arduino. Arduino получает команды от Raspberry Pi по UART. Камера установлена на платформе с помощью напечатанного на 3D-принтере крепления. В ходе исследования также была создана программная модель, на которой проводились предварительные эксперименты.

### **Метод**

Используемый маломощный вычислитель – Raspberry Pi – накладывает существенные ограничения на методы решения задачи, в частности, на нём невозможно в режиме реального времени обрабатывать поступающий видеопоток с помощью многослойных нейросетей, содержащий большое число связей. Поэтому предлагается перейти к дискретизированному варианту задачи. С определенным временным шагом текущее изображение с видеокамеры, закрепленной на роботе, подаётся на вход нейросети. По этому входу решается задача классификации, т.е. в соответствии изображению ставится класс команды, которую необходимо подать на низкоуровневый контролер движения: «поворот влево на 15 градусов», «поворот вправо на 15 градусов», «движение вперед», «движение назад». Для решения задачи была выбрана сверточная

нейронная сеть со следующей структурой: свертка  $32 \times 5 \times 5$ , пулинг  $2 \times 2$ , свертка  $64 \times 5 \times 5$ , пулинг  $2 \times 2$ , полносвязный слой с выходом 1024, последний полносвязный слой с выходом 4.

Для предварительного обучения нейросети была разработана программная модель платформы, задача которой состояла в движении вдоль синтетической линии (пример линий приведен на рис. 2). Для обучения использовались пары, «изображение – направление движения», полученные в результате проезда программной модели платформы по различным линиям в режиме ручного управления (т.е. оператор подавал команды программной модели, модель отработывала движение, команды и изображения с камеры при этом сохранялись). Всего для обучения использовалось 1 275 примеров. После обучения нейросеть показала весьма высокую точность классификации. Заметим, что этот факт не гарантирует следования по траектории с высокой точностью, так как управляющие команды подаются с определенным шагом дискретизации. В модельных экспериментах этот шаг был 10 кадров/с. Среднеквадратичное отклонение пройденной траектории от эталонной составило (в среднем) 9,6 % от длины траектории. Наиболее сложной для прохождения оказалась траектория № 3 (см. рис. 2). Это связано с тем, что платформа стремится не съезжать с линии и предсказывает ее положение в следующий момент времени. Если поворот имеет малый радиус, то платформа начинает срезать углы, чтобы держать линию в поле видимости.



*Рис. 2. Примеры траекторий для отработки*

### **Апробация на мобильной платформе**

Для обучения нейросети на реальных изображениях с помощью имеющейся мобильной платформы был собран обучающий набор данных, состоящий из 2 000 примеров ([https://github.com/ichega/robotplatform\\_dataset](https://github.com/ichega/robotplatform_dataset)). Итоговое тестирование проводилось на линии, изображенной на рис. 1

(справа). По ней платформа проехала 10 кругов по часовой, съехав 3 раза с линии, и 10 кругов против часовой, съехав 5 раз.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о потенциальной применимости предложенного подхода для решения задачи следования колесной мобильной платформы по линии.

1. *Андрейчук, А.А.* Оценка быстродействия некоторых алгоритмов планирования траектории на широко используемой в робототехнике платформе Raspberry PI [Текст] / А.А. Андрейчук, А.В. Боковой, К.С. Яковлев // Экстремальная робототехника (ЭР-2016): труды Международной научно-технической конференции. – Санкт-Петербург: ООО «АП4Принт», 2016. – 480 с. – С. 184–189.
2. *Солдатова, О.П.* Применение сверточной нейронной сети для распознавания рукописных цифр [Текст] / О.П. Солдатова, А.А. Гаршин // Компьютерная оптика. – 2010. – № 2 (34).
3. *Друки, А.А.* Семантическая сегментация данных дистанционного зондирования Земли при помощи нейросетевых алгоритмов [Текст] / А.А. Друки, В.Г. Спицын, Ю.А. Болотова, А.А. Башлыков // Известия ТПУ. – 2018. – № 1.
4. *Isola, P.* Image-to-image translation with conditional adversarial networks / P. Isola, J. Y. Zhu, T. Zhou, A.A. Efros // In Proceedings of the 2017 IEEE conference on computer vision and pattern recognition. – P. 1125–1134.

*А.В. Малолетов<sup>1,2</sup>, М.Ю. Фадеев<sup>1</sup>, А.С. Климчик<sup>1</sup>*

## **ДИНАМИКА ДВИЖЕНИЯ И МЕТОДЫ КОМПЕНСАЦИИ ОШИБОК ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ НЕПОЛНОПРИВОДНОГО ТРОСОВОГО РОБОТА\***

<sup>1</sup>*Университет Иннополис, г. Иннополис,*

<sup>2</sup>*Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград,  
{a.maloletov, m.fadeev, a.klimchik}@innopolis.ru*

### **Введение**

Тросовый робот является одним из разновидностей манипуляторов параллельной структуры, звеньями которого служат гибкие тросы [1]. Тросы управляются благодаря работе лебёдок, а к свободным концам тросов прикрепляется мобильная платформа, на которой может быть смонтировано различное оборудование.

Если тросов меньше, чем степеней свободы платформы, робот относится к виду неполноприводных. Для неполноприводных тросовых роботов характерны провисание тросов и высокая чувствительность положения мобильной платформы к силам натяжения тросов, которые сложным нелинейным образом зависят от углов поворота лебёдок, па-

---

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-08-01234.

раметров тросов, их взаимного влияния друг на друга, массы и других параметров мобильной платформы. Поскольку точность манипулятора является одной из ключевых его характеристик, разработка методов компенсации ошибок позиционирования является актуальной задачей.

В отличие от полноприводных тросовых роботов неполноприводные системы ограничены в своих возможностях по ориентации мобильной платформы, однако их достоинством, как правило, является отсутствие тросов в нижней части рабочей зоны, что позволяет более гибко задавать траектории движения мобильной платформы при выполнении работ, не заботясь о столкновении тросов с препятствиями. Это определяет практическую значимость неполноприводных тросовых роботов для таких задач, как строительство, транспортировка грузов и других.

### Математические модели

Простейшая геометрическая модель [2, 3] достаточно хорошо описывает полноприводные тросовые системы или небольшие по размерам неполноприводные роботы с небольшим соотношением веса платформы к собственному весу тросов.

Более точная модель учитывает провисание тросов. Как известно [4] в общем случае положение троса, закреплённого на двух концах, определяется решением в граничных условиях системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dT}{ds} + P &= 0 \\ \left(\frac{dx}{ds}\right)^2 + \left(\frac{dy}{ds}\right)^2 + \left(\frac{dz}{ds}\right)^2 &= 1 \end{aligned} \quad (1)$$

где  $T$  – вектор силы натяжения троса;  $s$  – дуговая координата;  $P$  – вектор распределённой нагрузки по длине троса;  $x, y, z$  – декартовы координаты точек цепной линии троса в абсолютной системе отсчёта.

Уравнения (1) записываются для каждого троса. Один из концов каждого троса робота прикреплен к подвижной платформе, положение которой в общем случае неизвестно. Порядок системы (1) для  $N$  тросов равен  $7N$ . Таким образом, для интегрирования этой системы требуется  $7N$  граничных условий, из которых  $3N$  представляют собой условия контакта троса с поверхностью направляющего ролика,  $3N - K$  есть условия принадлежности конечных точек тросов одному твёрдому телу – мобильной платформе, а оставшиеся  $K$  условий – это условия кинестатического равновесия мобильной платформы. Величина  $K$  определяется схемой присоединения тросов к мобильной платформе. Например, в случае соединения всех тросов в одной точке  $K = 3$ , а уравнения кинестатики имеют вид:

$$\sum_i T_{Ai} \frac{dr_i}{ds_i} + G + \Phi = 0 \quad (2)$$

где  $T_{Ai}$  – вектор силы натяжения  $i$  троса в точке крепления его к мобильной платформе;  $r_i$  – радиус-векторы конечных точек тросов в абсолютной системе координат – векторы для всех тросов в каждый момент времени равны друг другу;  $G$  – главный вектор внешней нагрузки на мобильную платформу;  $\Phi$  – главный вектор сил инерции.

Обратная задача кинематики представляет собой определение таких длин тросов, которые при фиксированных значениях координат конечных точек обеспечивают выполнение уравнений статики. Прямая задача кинематики формально решается путём интегрирования уравнений (1) в граничных условиях, включая (2). Однако для данной формы условий (2) прямая задача может быть представлена как поиск таких координат радиус-векторов  $r_i$ , которые обеспечивают выполнение уравнений статики. Для отдельных частных случаев существуют аналитические решения, но в общем случае процесс решения выполняется в результате итерационного процесса, на каждом шаге которого уравнения интегрируются численно.

### **Компенсация ошибок позиционирования**

При движении реального тросового робота остаются неучтённые факторы, влияющие на точность позиционирования мобильной платформы, которые можно компенсировать методом вычитания ошибок положения платформы. Суть метода заключается в том, что на этапе калибровки измеряются отклонения реального положения платформы от её желаемого положения с некоторым шагом во всём объёме рабочей области робота. В исследовании для этой цели использовался лазер-трекер FARO, позволяющий в автоматическом режиме измерять положение с высокой точностью. В промежуточных точках ошибка линейно аппроксимировалась. На этапе управления роботом полученная ошибка вычиталась из желаемого положения мобильной платформы.

Важно отметить, что тросовый робот представляет собой существенно нелинейную систему, поэтому такой простой метод может показать удовлетворительное качество компенсации только в том случае, если динамическая модель робота уже была достаточно точная.

### **Выводы**

Разработанная методика решения прямой и обратной задачи управления тросовым роботом обладает универсальностью, позволяя учитывать нагрузки различной природы, действующие как на мобильную платформу, так и на тросы. При этом обеспечивается приемлемое быстродействие, позволяющее использовать методику в системе управления роботом. А за счёт дополнительной компенсации ошибок из-за неучтённых факторов удаётся повысить точность позиционирования мобильной платформы аппарата.

1. Cable-driven parallel robots: Springer // Edited by Gosselin C., Cardou P., Bruckmann T., Pott A., 2018. – 416 p. – DOI 10.1007/978-3-319-61431-1.
2. Малолетов, А.В. Учет конструкций направляющих роликов и механизмов намотки при управлении движением тросового робота [Текст] / А.В. Малолетов, А.С. Климчик, К.В. Костенко // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2018. – № 13 (223). – С. 113–119.
3. Фадеев, М.Ю. Управление параллельным четырехтросовым роботом с помощью обратной кинематической модели [Текст] / М.Ю. Фадеев, А.В. Малолетов // XXX Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС-2018): сборник трудов конференции. – 2019. – С. 696–699.
4. Меркин, Д.Р. Введение в механику гибкой нити [Текст] / Д.Р. Меркин. – Москва: Наука, 1980. – 240 с.

*А.И. Машошин, С.Ф. Сергеев*

### **ПРОБЛЕМА ИНТЕЛЛЕКТНОГО СИМБИОЗА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ РЕШЕНИЯ КОМАНДИРОМ ПОДВОДНОЙ ЛОДКИ\***

*АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор»,  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
г. Санкт-Петербург,  
aimashoshin@mail.ru, ssfpost@mail.ru*

В работе [1] обоснована необходимость включения в интегрированную систему боевого управления подводной лодки (ИСБУ ПЛ) системы поддержки принятия решений (СППР) командиром ПЛ при выработке плана боевого управления (БУ) в сложившейся тактической обстановке, приведены основные положения алгоритма функционирования СППР.

В наиболее сложном случае – при боевом столкновении с противником в военное время – сущность этого алгоритма состоит в имитационном моделировании вариантов развития текущего тактического эпизода (ТЭ). Рассматриваются типовые варианты поведения противника в разных типовых вариантах БУ с вычислением для каждой комбинации вариантов значения одного либо нескольких показателей эффективности и выбором вариантов, обеспечивающих высокое значение показателей эффективности при любом развитии ТЭ.

Каждый вариант плана БУ содержит:

- прогноз поведения противника, включающий прогноз маневрирования его мобильных сил, и прогноз использования этими силами противолодочного оружия и средств самообороны и противодействия;

---

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 19-08-00324).

- план маневрирования своей ПЛ;
- план комплексного использования средств самообороны и противодействия.

Поскольку каждый выбранный вариант представляет собой сложный динамический процесс, описываемый большим объемом данных, возникает проблема адекватного представления вариантов командиру ПЛ, чтобы он за короткое время сумел их осмыслить и выбрать наиболее подходящий вариант для исполнения. Учитывая, что развитие ТЭ зависит от труднопредсказуемого поведения противника, принятое решение по мере развития ТЭ нуждается в периодической корректировке. Возникает рекурсивно повторяющийся цикл «автоматизированная выработка вариантов плана БУ – представление их командиру ПЛ», для эффективной реализации которого требуется интеллектуальное объединение командира ПЛ и системы автоматизированной выработки вариантов плана БУ. Похожие проблемы имеют место в большинстве сложных эргатических систем, функционирующих в экстремальных условиях [2].

Целью настоящей работы является анализ путей решения проблемы интеллектуального симбиоза применительно к ИСБУ ПЛ.

Рассматриваемая проблема относится к области инженерной психологии и связана с исследованием процессов интеграции психофизиологических характеристик лица, принимающего решения (ЛПР) со сложными системами и средами с искусственным интеллектом, в том числе действующими в экстремальных условиях активного противодействия противника. Возникающие объединения различных форм интеллекта, воплощенного в рабочую среду с интеллектом человека-оператора (интеллектуальные симбионты), обладают разной эффективностью по отношению к решению целевой задачи [3].

Для создания у оператора стабильной концептуальной модели, свидетельствующей о возникновении интеллектуального симбионта, используют полимодальные каналы представления информации. При их интеграции в единый образ в сознании оператора возникает понятное ему мультимодальное представление о рабочей среде, формирующее интегральную характеристику среды, – *иммерсивность*, определяющую свойства среды погружать субъекта в некоторый мир, предоставляющий возможность эффективного интерактивного взаимодействия с контентом среды. Оно сопровождается чувством присутствия (Presence) [4]. При этом достигается согласованная работа всех вовлеченных в синтез оперативного образа органов чувств человека, его когнитивной и исполнительной систем, обеспечивается их эффективное взаимодействие. Системы моделирования, создающие искусственную среду управления, имитирующие свойства среды физического мира, позволяют расширить возможности человека по принятию решений. Появляется широкий класс индуцированных

виртуальных мультимодальных интерфейсов [5]. В данном направлении при проектировании ПЛ в настоящее время испытывается недостаток информации методического и инженерно-психологического плана.

Для решения проблемы эффективного симбиоза лица, принимающего решение в технической системе, и системы оперативного информирования, целесообразно, в первую очередь, проанализировать циклически повторяющиеся диалоги машины с ЛПР, отличающиеся жёстким ограничением по времени и большим объемом и разноплановостью представляемой информации. При этом осуществляется поиск процедур редукции сложного содержания в простые и наглядные модели принятия решения. В данных моделях реализуются планы управления, учитывающие историю и опыт ЛПР, полученные ранее в процессе обучения и деятельности.

Необходимо провести экспериментальные исследования по оценке эффективности процессов интеллектуального симбиоза в условиях ситуационной неопределенности, сопровождающей боевую деятельность экипажа ПЛ. Следует учитывать возможности ЛПР по объему и времени восприятия автоматически выработанных вариантов плана БУ с учетом возможных вариантов дальнейшего развития обстановки.

### **Заключение**

На базе полученных результатов целесообразно выработать рекомендации по использованию симбиотических методов интеграции интеллекта машины и человека в системе поддержки принятия решений командиром ПЛ при выработке плана БУ в сложившейся тактической обстановке, а также в аналогичных сложных информационно-управляющих системах, функционирующих в экстремальных условиях.

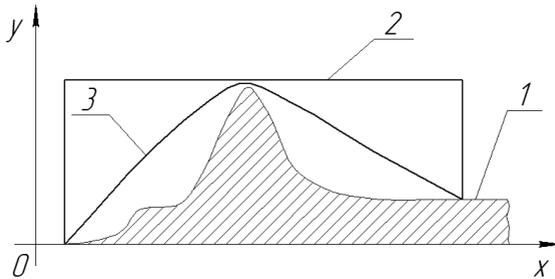
В работе на базе современных достижений инженерной психологии приведены пути решения этой проблемы.

1. *Кирьянов, А.В.* Алгоритм выработки плана боевого управления подводной лодкой в сложившейся тактической обстановке [Текст] / А.В. Кирьянов, Г.В. Конюхов, А.И. Машошин // Морская радиоэлектроника. – 2017. – № 4 (62). – С. 8–13.
2. *Сергеев, С.Ф.* Человеческий фактор в самолётах 6-го поколения: проблемы техносимбиоза [Текст] / С.Ф. Сергеев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2018. – Т. 19, №12. – С. 806–811.
3. *Сергеев, С.Ф.* Интеллектуальные симбионты в эргатических системах [Текст] / С.Ф. Сергеев // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – № 2 (84). – С. 149–154.
4. *Сергеев, С.Ф.* Обучающие и профессиональные иммерсивные среды [Текст] / С.Ф. Сергеев. – Москва: Народное образование, 2009. – 432 с.
5. *Сергеев, С.Ф.* Эргономические проблемы проектирования интерфейса на базе индуцированных виртуальных сред [Текст] / С.Ф. Сергеев // Мир Авионики. – 2006. – № 3. – С. 62–67.

## ОБ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНЫХ РЕЖИМАХ ДВИЖЕНИЯ ШАГАЮЩЕГО РОБОТА ПРИ ПЕРЕМЕЩЕНИИ С ПРЕОДОЛЕНИЕМ ПРЕПЯТСТВИЙ\*

*Волгоградский государственный технический университет,  
г. Волгоград, mariatiminen@yandex.ru*

Мобильные роботы с шагающими движителями обладают возможностью бесконтактного преодоления препятствий, что является одной из характерных особенностей таких машин [1]. Вид траектории переноса шагающего движителя, представленный на рис. 1, объясняется необходимостью организовывать взаимодействие стоп движителей с опорной поверхностью без горизонтального проскальзывания по ней в отсутствие информации о ее профиле. Но при наличии такой информации об опорной поверхности можно изменить закон переноса стопы. По сочетаниям данных показателей могут быть определены границы Парето-оптимальных режимов движения для показателей качества.



**Рис. 1. Траектория переноса стопы движителя:**

**1 – абсолютная траектория по Н.В. Умнову;**

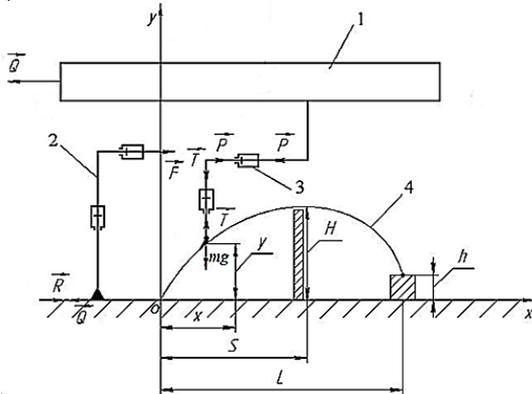
**2 – возможная траектория; 3 – профиль опорной поверхности**

Известны методы управления переносом стоп при преодолении запрещённых зон за счет изменения походки для шагающих машин с цикловыми движителями [2]. С точки зрения энергоэффективности для роботов с такими движителями рассмотрены задачи оптимального управления их переносом из одного положения в другое. Определено, что критериям минимума тепловых потерь в приводных двигателях является выгодным отказ от равномерного движения корпуса робота [3] и

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №19-48-340018).

использование корпуса в качестве рекуператора энергии. Для шагающих роботов с ортогональными движителями решена задача оптимального взаимодействия стопы движителя с опорной поверхностью в результате её переноса в новое положение [4].

Рассматривается поступательное, с постоянной скоростью, движение корпуса робота с ортогональными шагающими движителями, типа «Ортоног» (рис. 2). Профиль опорной поверхности, характеризуемый расстоянием  $S$  от стопы, вступающей в фазу переноса до препятствия в форме выступа высотой  $H$ , расстоянием  $L$  до места её постановки на высоте  $h$  от начального уровня (рис. 3), считается известным по данным информационно-измерительной системы робота. Ставится задача определения законов переноса стопы из начального положения в конечное, обеспечивающих минимум комплексного критерия оптимальности  $I$ , формируемого из линейной аддитивной свертки безразмерных частных показателей  $I_j$ .



**Рис. 2. Расчетная схема**

Дифференциальные уравнения движения стопы в горизонтальном и вертикальном направлении и уравнение, описывающее равномерное поступательное движение корпуса робота, для определения частных безразмерных показателей  $I_j$ , имеют вид:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = P \\ m\ddot{y} = T - mg \\ 0 = Q - F - P, \end{cases} \quad (1)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $Q$  – сила сопротивления движению робота;  $F$ ,  $P$  – силы, развиваемые приводами курсового движения, соответственно поддерживающие движение корпуса и обеспечивающие горизонтальный перенос стопы в новое положение;  $T$  – сила, развиваемая приводом вертикального перемещения стопы.

Среди частных показателей рассматривается безразмерный уровень тепловых потерь в двигателях

$$I_1 = \frac{2}{FL} \left( \alpha \int_0^{\tau} Q^2 dt + \alpha \int_0^{\tau} P^2 dt + \beta \int_0^{\tau} T^2 dt \right), \quad (2)$$

а также безразмерные среднеквадратичные ускорения стопы при переносе  $I_2, I_3$

$$I_2 = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \dot{x}^2 dt = \frac{1}{g} \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \dot{x}^2 dt}, I_3 = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \dot{y}^2 dt = \frac{1}{g} \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \dot{y}^2 dt}, \quad (3)$$

где  $\tau$  – время переноса стопы, с;  $L$  – длина шага, м;  $\alpha, \beta$  – известные характеристики двигателя.

Ставится задача определения таких законов движения  $x(t)$  и  $y(t)$ , которые позволят обеспечить как преодоление препятствий и безударное взаимодействие переносимой стопы с опорной поверхностью, так и минимум комплексного критерия качества

$$I = k_1 I_1 + k_2 I_2 + k_3 I_3, \quad (4)$$

где  $k_1, k_2, k_3$  – субъективно введенные весовые коэффициенты.

Разработана математическая модель, позволяющая проводить достаточно большой комплекс исследований, определять влияние физико-механических свойств грунта, внешних геометрических характеристик опорной поверхности и параметров, характеризующих движение робота, на показатели качества. Сформулирован интегральный показатель, характеризующий качество законов переноса стопы с точки зрения минимума непроизводительных тепловых потерь в приводных двигателях. Определены параметры движения шагающего робота «Ортоног» при преодолении препятствия для обеспечения оптимального значения комплексного критерия.

1. *Охоцимский, Д.Е.* Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата [Текст] / Д.Е. Охоцимский, Ю.Ф. Голубев. – Москва: Наука, 1984. – 312 с.
2. *Брискин, Е.С.* Об управлении походкой шагающей машины «Восьминог» [Текст] / Е.С. Брискин // Механика. Автоматизация. Управление. – 2008. – № 5. – С. 6–10.
3. *Брискин, Е.С.* Об энергетически эффективных алгоритмах движения шагающих машин с цикловыми движителями [Текст] / Е.С. Брискин, Я.В. Калинин // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2011. – № 2. – С. 170–176.
4. *Брискин, Е.С.* Об управлении адаптацией ортогональных шагающих движителей к опорной поверхности [Текст] / Е.С. Брискин, Я.В. Калинин, А.В. Малолетов, В.А. Серов, С.А. Устинов // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2017. – № 3 (май-июнь). – С. 184–190.

## **ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТРУДА ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОЛЛАБОРАТИВНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ**

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет), г. Москва,  
alisa.mokaeva@bmstu.ru*

### **Введение**

Современные тенденции развития производства требуют все большего применения робототехнических комплексов. При этом множество сложных этапов жизненного цикла производимой продукции не могут обойтись без участия человека, например, трудоемкие операции по сборке и контролю изделий, реорганизации и наладке производственных участков и прочее.

Ключевым решением данной проблемы является появление коллаборативных робототехнических систем – систем, содержащих автоматические устройства, допускающих выполнение работ совместно с человеком. Использование коллаборативных роботов (коботов) [1] на производстве на данный момент реализуется в следующих сценариях: кобот assisteрует человеку при подготовке деталей и инструментов [2, 3] либо человек выполняет функции оператора [4]. Однако в обоих случаях потенциал участников производственного процесса раскрыт не полностью.

На основе данной предпосылки разрабатывается концепция, в которой человек и кобот рассматриваются как равноправные участники производственного процесса, выполняющие операции одновременно в едином рабочем пространстве. На данном этапе была разработана первичная концепция роботизации сборки корпусных конструкций летательных аппаратов. (ЛА), сформирована методика оценки производительности труда с помощью имитационного моделирования при различных сценариях взаимодействия, сделаны промежуточные выводы о рациональности данной концепции и определены направления дальнейших исследований.

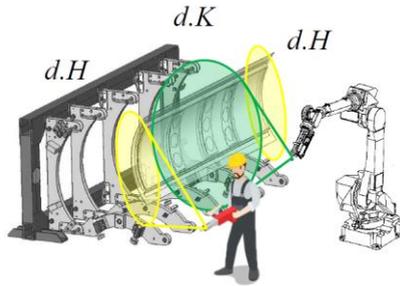
### **Концепция роботизации сборки корпусных конструкций ЛА**

В рамках работы рассматривается концепция роботизации производства на примере процесса сборки фюзеляжа летательного аппарата. Суть данного решения заключается в совместной работе человека и кобота в рамках одного технологического процесса – сверлильно-клепальные работы (СКР).

Время, затрачиваемое на выполнение сборочных операций, составляет порядка 50 – 75 % цикла изготовления ЛА, а их трудоемкость –

30 – 40 % трудоемкости изготовления ЛА [5]. Основной способ соединения силовых узлов конструкции планера (лонжеронов, нервюр и шпангоутов) – заклёпочные соединения. На долю СКР приходится 30 – 45 % трудоёмкости сборочных работ. Трудоёмкость сверления составляет 30 %, зенкования – 13 %, вставка заклёпок – 4 %, расклёпывание заклёпок – 53 %. Специфика производства, сложность конструкции ЛА, многообразие условий подхода к зоне клёпки обуславливают применение ручных дрелей и клепальных молотков, использование которых не позволяет достигнуть высокой производительности труда, не гарантирует стабильности качества соединений и вредно воздействует на организм человека, вызывая такие профессиональные заболевания, как вибрационная болезнь и профессиональная тугоухость.

В рамках рассматриваемой концепции роботизации СКР для выполнения операции будет использоваться один кобот, который оснащается специальным инструментом.



**Рис. 1. Пример совместной работы человека и кобота:  $d.H$  – рабочее пространство человека;  $d.K$  – рабочее пространство кобота**

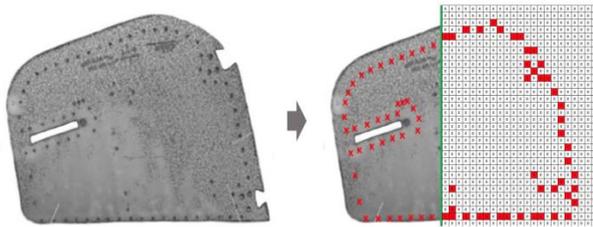
### **Методика оценки производительности труда**

В контексте данной работы производительность труда понимается как эффективность конкретного труда, которая измеряется величиной времени, затрачиваемого на единицу продукта труда [6].

Рассмотрим функциональность процесса СКР с точек зрения человека и кобота. При описании сущности «Человек» -  $H$  основным фактором сложности выполнения работы  $Diff$  является ее монотонность или количество операций  $q$ . Однако при этом  $H$  обладает высокой мобильностью, что делает вклад достижимости  $d$  в  $Diff$  относительно малым и постоянным. Обратная ситуация наблюдается у сущности «Кобот» -  $K$ , связанная с ограничением рабочей зоны кобота, в то время как монотонность выполняемой работы не сказывается на его производительности. Основная гипотеза заключается в том, что их сочетание позволит

снизить суммарное время на выполнение операции: большая часть однообразных технологических операций выполняется роботом, человек, при этом, задействован при выполнении операций в недоступной для робота рабочей зоне.

Для сравнения затрат времени при различных сценариях взаимодействия человека и робота используется следующая методика. На основе изображения панели обшивки была построена матрица, элементы которой характеризуют значения функции сложности выполнения заклепочного соединения  $Diff$  от расстояния отверстия до края детали и дистанции между отверстиями.



**Рис. 2. Получение матричной модели детали**

Далее в алгоритмическом цикле реализуются вектор-функции взаимовлияющих в рамках цикла сущностей «Человек» -  $H$  и «Робот» -  $K$ , характеризующиеся уникальным набором параметров, таких как рабочая зона, мобильность, запас клепок, утомляемость и др. Вектор-функции последовательно изменяют значения элементов матрицы, когда все элементы матрицы обнулены, цикл прерывается. При моделировании рассматривались следующие сценарии: только робот; только человек; робот и человек в разном соотношении. Количество циклов напрямую отражает относительный вклад вектор-функций в обнуление матрицы.

Первые результаты моделирования показали, что количество циклов на выполнение клепальных соединений при выборе оптимального соотношения вклада вектор-функций сокращается не менее чем в 1,5 раза при использовании совместной работы робота и человека.

### **Заключение**

В ходе работы была предложена концепция роботизации сборки корпусных конструкций летательных аппаратов. Была сформирована методика имитационного моделирования для оценки производительности труда совместной работы робота и человека. Подтверждено, что сочетание робота и человека позволяет снизить суммарное время на выполнение СКР. В дальнейшем планируется рассмотреть для представле-

ния матрицы модели детали клеточные автоматы и сформировать правила динамического деления совместной рабочей зоны.

1. *Colgate, J., Peshkin M.* US Patent No. 5952796: Cobots // Patent, September. – 1999.
2. *Maurtua, I.* Human–robot collaboration in industrial applications: Safety, interaction and trust [Электронный ресурс] / I. Maurtua, A. Ibaruren, J. Kildal, L. Susperregi, B. Sierra // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2017. – Т. 14. – №. 4. – С. 1–10.
3. *Cherubini, A.* Collaborative manufacturing with physical human–robot interaction [Электронный ресурс] / A. Cherubini, R. Passama, A. Crosnier, A. Lasnier, P. Fraise // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2016. – Т. 40. – С. 1–13.
4. *Drouot, A.* A transformable manufacturing concept for low-volume aerospace assembly [Электронный ресурс] / A. Drouot, L. Irving, D. Sanderson, A. Smith, S. Ratchev // IFAC-PapersOnLine. – 2017. – Т. 50, №. 1. – С. 5712–5717.
5. *Вашуков, Ю.А.* Технология и оборудование сборочных процессов [Электронный ресурс] / Ю.А. Вашуков, О.В. Ломовской, А.А. Шаров. – Самара, 2011. – Режим доступа: <https://docplayer.ru/31668726-Yu-a-vashukov-o-v-lomovskoy-a-a-sharov.html>, свободный (дата обращения: 15.02.2019).
6. *Азрилиян, А.Н.* Большой экономический словарь: 25 000 терминов [Текст] / А.Н. Азрилиян, О.М. Азриелян, Е.В. Калашникова. – Москва: Институт новой экономики, 2004. – 1472 с.

*А.Д. Никитин, В.А. Горбачев*

## **СРЕДСТВА И АЛГОРИТМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ВИЗУАЛЬНОГО ОСМОТРА ВОЗДУШНОГО СУДНА С ПОМОЩЬЮ ДРОНОВ**

*Государственный научно-исследовательский институт  
авиационных систем, г. Москва,  
vadim.gorbachev@gosniias.ru*

Техническая эксплуатация воздушного судна (ВС) предусматривает регулярное проведение визуального осмотра поверхности крыльев и фюзеляжа для получения сведений о наличии следов от удара молнии или других повреждений поверхности ВС. Осмотр такого рода требует привлечения большого количества специалистов и тяжелой техники и связан со значительными временными и финансовыми потерями авиационных компаний. Автоматизация процесса с помощью программируемых беспилотников позволит существенно сократить время осмотра ВС.

В работе решается две задачи: автоматизация обнаружения повреждений на основе анализа видеозаписей ВС с дрона и автоматизация управления полётом дрона. Обе задачи решаются за счёт применения современных машинно-обучаемых (нейросетевых) детекторов объектов. В качестве базового алгоритма используется метод YOLOv3 [1]. Описана адаптация алгоритма де-

тектирования под решаемую задачу. Отдельное внимание уделено описанию процесса подготовки обучающих данных, который имеет решающее значение для точности обученных детекторов. Так как ручная подготовка обучающих данных ресурсозатратна, то предложены алгоритмы автоматизации создания обучающих данных. Исследовано влияние использования синтетических, реальных и полусинтетических данных.

В рамках задачи автоматизации управления полётом дрона предложена система и алгоритм позиционирования дрона на основе данных от визуальных сенсоров в условиях отсутствия данных от спутников навигации. Такая система необходима в условиях визуального осмотра в закрытых ангарах. Система основана на получении и обработке в реальном масштабе времени данных от массива видеокамер, на которых производится детектирование дрона. По данным детекции производится определение трёхмерных координат дрона. Координаты передаются в систему управления дроном для корректировки его траектории.

Алгоритмы протестированы коллекции на синтезированных и реальных данных.

1. *Redmon, J. YoloV3: An incremental improvement // J. Redmon and A. Farhadi./ arXiv preprint arXiv:1804.02767, 2018.*

*В.П. Носков, И.О. Киселев*

## **ТЕКСТУРИРОВАННЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ ОБЪЕКТЫ В ПОСТРОЕНИИ СЕМАНТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ И НАВИГАЦИИ АВТОНОМНЫХ РОБОТОВ\***

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет), г. Москва,  
noskov\_mstu@mail.ru, kiselev201@rambler.ru*

Подавляющее число операций с использованием робототехники проводится в индустриально-городских средах и в зданиях, которые характеризуются наличием экранированных зон, ограничивающих применение традиционных средств навигации и дистанционного управления. Наиболее востребованными здесь становятся автономные системы управления. Центральными задачами, решение которых обеспечивает автономное управление, являются задачи формирования модели среды и определение координат по данным бортовых СТЗ. Наиболее перспективными являются 3D-лазерные сенсоры, формирующие геометрию среды в виде облака точек. Однако использование такой модели требует больших вы-

---

\* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №16-29-04178 офи\_м.

числительных ресурсов. Поэтому целесообразно переходить к более компактному описанию, например, к совокупности геометрических линейных примитивов (плоскостей, линий, углов) [1], из которых и состоят в основном индустриально-городские среды (стены, потолки, дороги ...).

Известные алгоритмы [1] не позволяют выделять линейные объекты из облака точек в реальном времени на современных бортовых вычислителях. Однако учет структурированности исходных данных, формируемых 3D-лазерными сенсорами, позволяет предложить алгоритмы, лишенные данного недостатка [2]. Сканирование пространства внешней среды выполняется подмножествами лучей, лежащих в одной плоскости, которые пересекаются с линейными объектами внешней среды по прямым линиям-отрезкам (рис. 1,а). Это позволяет предложить эффективный метод двухэтапного выделения плоских объектов, основанный сначала на поиске подмножеств точек, принадлежащих линиям-отрезкам, лежащим в плоскостях сканирования, с последующим поиском подмножеств линий-отрезков, принадлежащих одному плоскому объекту. Предлагаемый метод позволяет на первом этапе декомпозировать трехмерное пространство исходного объемного облака точек на его двумерные (плоские) подпространства и свести задачу поиска плоских объектов в трехмерном пространстве к задаче поиска линий-отрезков в двумерных подпространствах (плоскостях сканирования), что существенно снижает объем вычислений вследствие понижения размерностей объектов поиска и пространства поиска. Второй этап также не связан с большим объемом вычислений, так как для поиска плоских объектов используется не исходное облако точек, а выделенные на первом этапе линии-отрезки, число которых несоизмеримо меньше числа точек в облаке.



**Рис. 1. Результаты работы двухэтапного алгоритма**  
**а – выделенные отрезки в скане, б – выделенные плоские объекты**

На рис. 1 приведен результат работы программно-аппаратных средств, реализующих двухэтапный алгоритм с использованием для выделения линий-отрезков двумерного преобразования Хафа. Как показали экспериментальные исследования, двухэтапный алгоритм по сравнению с одноэтапным алгоритмом, использующим трехмерное преобра-

зование Хафа, работает на два порядка быстрее. Данная оценка справедлива и для других известных алгоритмов (RANSAC, локальных нормалей, разрезания графов [2]).

Для решения полной навигационной задачи (определение трех линейных и трех угловых координат объекта управления) необходимо в процессе движения в последовательности дальнометрических изображений выделять и идентифицировать не менее трех взаимно не параллельных плоских объектов [1, 2]. Однако возможны случаи, когда выделяется и идентифицируется меньше трех плоских объектов: два или даже один (например, в средах, подвергшихся разрушениям). В этих случаях использование комплексированной СТЗ, состоящей из взаимно-юстированных 3D-лазерного сенсора и видеокамеры с общей зоной обзора [3], позволяет решить навигационную задачу за счет учета текстуры выделяемых плоских объектов. При выделении только одного плоского объекта использование его текстуры позволяет свести решение навигационной задачи к трехмерной задаче оптимизации, а при выделении 2-х плоских объектов – к одномерной. В основу таких алгоритмов могут быть положены операции приведения соответствующих друг другу плоских объектов, выделенных в предыдущем и новом видеодальнометрических изображениях, к одной плоскости и наилучшего совмещения их текстур, видимых из предыдущего и нового положения сенсора.

На рис. 2,а в системе координат сенсора показаны соответствующие друг другу плоские объекты  $P_I$  и  $p_I$ , выделенные в предыдущем и новом положениях. На рис. 2,б показаны эти же плоские объекты, приведенные к одной плоскости с совмещением их текстур. Совмещение текстур происходит при глобальном минимуме функционала разности текстур:

$$\Delta E(\mu, \eta, \lambda) = \frac{\sum_i \sum_j (e_{ij} - E_{mn})^2 * c_{ij}(\mu, \eta, \lambda)}{\sum_i \sum_j c_{ij}(\mu, \eta, \lambda)}, \quad (1)$$

где  $\mu$ ,  $\eta$  и  $\lambda$  – соответственно два линейных смещения и вращение плоского объекта  $p_I$  относительно  $P_I$  в плоскости приведения;

$e_{ij}$  – яркость пиксела из текстуры плоскости  $p_I$ ;

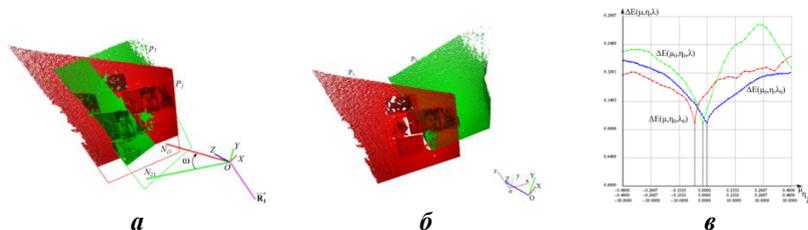
$E_{mn}$  – яркость соответствующего пиксела из текстуры плоскости  $P_I$ , индексы которого вычисляются по формуле (2);

$c_{ij}(\mu, \eta, \lambda) \in \{0, 1\}$  – число, принимающее значение 1, если для пиксела  $e_{ij}$  существует пиксел  $E_{mn}$ , и принимающее значение 0 в противном случае.

$$\begin{vmatrix} m * v \\ n * v \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \mu \\ \eta \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \cos(\lambda) & \sin(\lambda) \\ -\sin(\lambda) & \cos(\lambda) \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} i * v \\ j * v \end{vmatrix}, \quad (2)$$

где  $v$  – линейный размер пиксела.

На рис. 2,в приведены одномерные сечения функционала (1) в точке решения  $\langle \mu_0, \eta_0, \lambda_0 \rangle$  для рассматриваемого примера. Найденные значения  $\langle \mu_0, \eta_0, \lambda_0 \rangle$  однозначно определяют перемещение сенсора (см. рис. 2,б).



**Рис. 2. Результат работы алгоритма и программно-аппаратных средств**

При выделении 2-х плоских объектов функционал (1) будет зависеть только от  $\mu$  – координаты, связанной с линией пересечения этих плоских объектов, а в формуле (2) произойдут следующие упрощения:  $\eta = \lambda = 0$ ,  $n = j$ .

1. *Казьмин, В.Н.* Выделение геометрических и семантических объектов в дальнометрических изображениях для навигации роботов и реконструкции внешней среды [Текст] / В.Н. Казьмин, В.П. Носков // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 10 (171). – С. 71–83.
2. *Носков, В.П.* Трехмерный вариант метода Хафа в реконструкции внешней среды и навигации [Текст] / В.П. Носков, И.О. Киселёв // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2018. – № 8 (19). – С. 552–560.
3. *Носков, В.П.* Формирование объединенной модели внешней среды на основе информации видеокамеры и дальномера [Текст] / В.П. Носков и др. // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2007. – № 8. – С. 2–5.

**М.Н. Плавинский, А.С. Проценюк,  
Е.Ю. Смирнова, С.А. Половко, С.С. Кавтрев**

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПУТЕЙ СОЗДАНИЯ ГИПЕРИЗБЫТОЧНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

*Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики,  
г. Санкт-Петербург,  
plavinsky@rtc.ru, s.kavtrev@rtc.ru*

Обслуживание, инспекция технического состояния оборудования, мониторинг обстановки и другие аналогичные операции на промышленных объектах морского базирования связаны с большими трудозатратами в среде повышенной опасности. Наиболее сложными и опасными являются подводно-технические работы на морских добывающих платформах и транспортирующих морских трубопроводах. Актуальность работ обусловлена, в первую очередь, постоянно растущим объемом освоения ресурсов океана.

Современные технологии строительства делают возможным возведение таких масштабных инженерных объектов, как мосты через морские проливы, дамбы, острова-платформы и т.п. Подобные объекты требуют регулярного осмотра подводной части конструкций и своевременного выполнения сервисных операций. Перспективным путем повышения эффективности и безопасности работ является использование робототехнических комплексов смешанного базирования, включая подводные роботы.

При этом применение традиционных подводных телеуправляемых и автономных необитаемых подводных аппаратов (ТНПА, АНПА) для выполнения работ на инженерных и промышленных объектах существенно ограничено их недостаточной маневренностью в зоне подводных конструкций. В силу того, что подводный робот представляет собой сложную техническую систему, которая функционирует в условиях слабо детерминированной внешней среды с непредсказуемой динамикой, для него должны быть обеспечены не только известные виды избыточности: конструктивная, структурная, информационная. Стремление к повышению уровня интеллектуализации МНПС ставит проблему кибернетической избыточности и гиперизбыточности, т.е. такого увеличения размерности векторов, наблюдения и управления, которое неизбежно сделает востребованными в МНПС такие технологии искусственного интеллекта, как нейронные сети, экспертные системы и им подобные. С учетом необходимости обеспечить безопасное перемещение и работу МНПС в сложно-структурированном окружении должна быть предусмотрена кинематическая избыточность МНПС в целом или его составных частей (манипуляторов) [1, 2].

Таким образом, существует потребность в создании многофункционального необитаемого подводного средства (МНПС), обладающего кинематической и кибернетической избыточностью и возможности синтезировать управление этим аппаратом с учётом безопасности маневрирования и манипулирования.

Наращивание функциональных возможностей МНПС невозможно без повышения уровня интеллектуализации бортовой системы управления. Здесь под интеллектом мы будем понимать познавательную способность, включая:

- обработку информации о внешней среде с построением ее моделей;
- использование данной информации для планирования поведения в условиях заведомой неполноты информации и непредсказуемо изменяющейся внешней обстановки [3].

МНПС должно обеспечивать выполнение следующих основных функций:

- обзорно-поисковая съемка дна и выделение объектов для детального исследования, в том числе аварийных участков трубопроводов;
- автоматический поиск и исследование подводных объектов (в том числе протяженных);

- взятие проб воды и грунта;
- измерение параметров среды (давление, температура, электропроводность, скорость звука и т.п.);
- автоматическая стыковка с манифольдами и другими объектами подводной инфраструктуры;
- осмотр подводных конструкций, внешней поверхности бурового оборудования и трубопроводных трасс;
- локальная очистка поверхностей от наростов и отложений;
- такелажные, монтажные работы.

Приведенный перечень требует, чтобы в составе МНПС были предусмотрены разнообразные исполнительные органы (двигатели, манипуляторы), сенсоры и информационно-управляющая система, способная обеспечить согласованную работу всех подсистем.

Архитектура построения МНПС предполагает модульное исполнение, позволяющее осуществлять реконфигурацию аппарата, с возможностью функционирования МНПС как в телеуправляемом, так и в автономном режиме.

МНПС будет представлять собой аппарат с элементами искусственного интеллекта, обеспечивающими безопасную навигацию в реальных условиях, гибкий алгоритм выполнения заданной миссии, а также обнаружение и классификацию подводных объектов посредством комплексированной системы технического зрения.

В докладе будет проведена:

- детализация технологических операций МНПС в рамках задач осмотра, сервисного обслуживания и обеспечения работы оборудования на подводных объектах;
- описание сценариев работы, обеспечивающих гибкость поведения аппарата в изменяющихся условиях;
- проработка конструктивных решений базовых модулей аппарата и общей модульной конструкции с учетом анализа состава реальных технологических операций.

1. *Алексеев, А.В.* Манипуляционно-технологический комплекс обитаемого подводного аппарата [Электронный ресурс] / А.В. Алексеев, А.Л. Оленин, Г.В. Смирнов, А.Н. Фендриков // Вестник СГАУ. – 2012. – № 2 (33). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/manipulyatsionno-tehnologicheskii-kompleks-obitaemogo-podvodnogo-apparata>.
2. *Иванов, А.А.* Модульный гиперизбыточный манипулятор: архитектура, алгоритмы управления, реализация [Текст]: научное издание / А.А. Иванов [и др.] // Робототехн. и техн. кибернет. – 2014. – № 2. – С. 55–60.
3. *Юревич, Е.И.* Основы Робототехники [Текст] / Е.И. Юревич. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2018. – 304 с.

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НА ОСНОВЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПОДХОДА**

*ФГБУ «3 ЦНИИ» Минобороны России, г. Москва,  
rudianov\_1980@mail.ru*

Роботизация наземной военной техники и вооружения идет по следующим направлениям [1 – 3]:

- создание унифицированных комплектов (модулей) аппаратуры дистанционного управления для установки на штатные образцы ВВТ с целью их безэкипажного применения при выполнении боевых, специальных и обеспечивающих задач;
- разработка перспективных робототехнических комплексов (РТК) на оригинальной базе для выполнения боевых, разведывательных и обеспечивающих задач с использованием имеющихся и вновь создаваемых аппаратных и программных модулей.

Блочно-модульное конструирование РТК предусматривает создание изделий на основе модулей и блоков. Модуль – составная часть РТК, состоящая преимущественно из унифицированных или стандартных элементов различного функционального назначения. Примером внедрения подобного подхода является разработка многофункционального гусеничного бронированного РТК тяжелого класса на базе специальной пожарной машины (ГБРК СПМ), проходящего в настоящее время процедуру принятия на снабжение.

Задачами ГБРК СПМ являются обеспечение в экипажном и дистанционно-управляемом режимах тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ на арсеналах, базах и складах хранения ракет и боеприпасов. Основными модулями навесного оборудования, обеспечивающими решение указанных задач являются:

- модули аппаратуры передачи данных;
- модули системы технического зрения;
- модули системы управления движением;
- модули аппаратуры программного управления, обеспечивающие автоматическое движение машины по заданному оператором маршруту с выдерживанием требуемых параметров движения и автоматическое движение машины по ранее пройденному маршруту;
- модули управления пожарно-техническим вооружением;
- модули автоматизированных рабочих мест пункта дистанционного управления и переносного пульта управления.

На основе анализа всей совокупности задач для робототехнических комплексов в [2] предлагается обосновать несколько линеек основополагающих и необходимых составных частей, таких как:

- типовые транспортные базы РТК;
- модули, обеспечивающие дистанционное управление РТК;
- модули, обеспечивающие доставку (разгрузку) полезной нагрузки РТК;
- разведывательные модули РТК различного назначения;
- ряд боевых модулей РТК с соответствующими прицельными модулями;
- модули транспортирования ракет и боеприпасов к машинам огневой поддержки и зенитно-ракетным;
- модули перевозки и подвоза тарно-штучных грузов (боеприпасы к стрелковому оружию, ПТРК и др.);
- модули подвоза горючего;
- модули подвоза продовольствия и т.п.

Перспективными направлениями применения принципа модульного построения РТК называются исследования в области реконфигурируемости, подразумевающей создание РТК с мехатронно-модульным строением и функционально-модульным построением роботов. Эти методы дают возможность объединять (сопрягать аппаратно и программно) различные по функциональному предназначению модули в единой конструкции, обеспечивая их совместную работу под управлением общего программно-алгоритмического обеспечения для выполнения целевой функции робота.

Агрегатно-модульный принцип построения РТК является наиболее рациональным в настоящее время и положен в основу обоснования ТТХ боевых и обеспечивающих наземных РТК при формировании программных документов в области вооружения.

При этом, рассматривая пути развития роботизированного вооружения, необходимо учитывать важные обстоятельства.

Ориентация только на модульный принцип создания технологических машин в определенном смысле сковывает развитие новых технических решений. В ряде случаев слепое следование идее агрегатирования с использованием лишь унифицированных деталей и модулей может привести к созданию конструкций неоптимальных по массе, размерам, потребляемой мощности, надежности, стоимости, трудоемкости производства и испытаний. Принцип модульности может оказаться невыгодным, прежде всего, для потребителя.

При разработке боевых и обеспечивающих наземных РТК необходимо придерживаться стандартов и требований, предъявляемых к вооружению и военной технике. В определенных случаях они являются

значительно завышенными, а иногда и не определяющими для функционирования РТК. В разных случаях это может касаться требований по бронезащите, мобильности, проходимости, надежности и другим, в том числе и к точностным характеристикам вооружения.

Опыт боевых действий последних лет, в том числе с применением боевых РТК, показывает, что существует ряд задач, важных с точки зрения предотвращения потерь личного состава, а также большой частоты применения, при этом использование универсальных многофункциональных боевых и инженерных РТК удовлетворяет их решению не в полной мере.

При выборе модулей вооружения для боевых РТК разработчик ориентируется на существующие и перспективные образцы оружия, а облик традиционного оружия в полной мере учитывает характеристики человека, который его применяет. Это относится в случае стрелкового вооружения к весам, габаритам, эргономическим характеристикам, прицельному комплексу, а в случае боеприпасов – к массогабаритным характеристикам, для обеспечения заряжания без механизированных устройств или необходимости использования в ограниченных объемах боевых машин.

Поэтому наряду с развитием многофункциональных боевых и обеспечивающих РТК на основе агрегатных и программно-аппаратных модулей необходимо рассматривать вопросы разработки специализированных РТК, ориентированных на выполнение одной задачи, как правило, боевой, и обладающих повышенным по сравнению с универсальными РТК потенциалом для ее выполнения и разработки вооружения специально для РТК на основе рационального использования преимуществ робота и снижения психофизиологических ограничений, свойственных человеку. Целесообразно [4] в ряде случаев ориентироваться на разработку специализированных РТК, ориентированных на выполнение определенных действий и требующих использования в некоторых случаях нештатного вооружения, ориентированного на применение только в составе РТК.

1. *Попов, С.А.* Создание и применение робототехники в вооруженных силах Российской Федерации [Текст] / С.А. Попов // Роботизация Вооруженных сил Российской Федерации: труды II-й Военно-научной конференции. – 2017. – 537 с.
2. *Рудианов, Н.А.* Обоснование семейства боевых и обеспечивающих роботов для боя в городе [Текст] / Н.А. Рудианов, И.Б. Шеремет, А.В. Рябов, В.С. Хрущев // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 3. – С. 37–41.
3. *Рудианов, Н.А.* О необходимости разработки концепции построения и применения автономных робототехнических комплексов военного назначения [Текст] / Н.А. Рудианов, И.Б. Шеремет, А.В. Рябов, В.С. Хрущев // Экстремальная робототехника: труды Международной научно-технической конференции. – Санкт-Петербург: ЦНИИ РТК, 2016. – С. 35–39.
4. *Рудианов, Н.А.* Функциональный подход к проектированию специализированных робототехнических комплексов [Текст] / Н.А. Рудианов, В.С. Хрущев // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 1 (203). – С. 18–28.

## **МОНИТОРИНГ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА\***

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва,  
petertf@gmail.com*

### **Введение**

В России более половины поголовья крупного рогатого скота находится в собственности фермерских хозяйств и населения [1]. Для среднего по масштабам хозяйства (от 30 до 300 голов скота) пастбищное животноводство – это быстрый выход на товарное производство при минимуме капитальных затрат и рабочей силы. Вместе с тем деятельность таких хозяйств сопряжена с многочисленными рисками, ограничена малыми оборотами и недостатком ресурсов для развития.

Современное пастбищное животноводство построено на использовании индустриальных схем интенсивного травяного откорма [2 – 4], которые основаны на ротации пастбищных участков для того, чтобы максимально использовать потенциал каждого участка в производстве биомассы. Внедрение индустриальной схемы затруднено отсутствием ряда необходимых для принятия решений оценок и рекомендаций, в частности:

- оценки объема и качества биомассы на пастбищных участках;
- оценки динамики потребления биомассы животными;
- рекомендаций по вводу и выводу пастбищных участков из оборота.

Автором предлагается решение для задачи оценки состояния почвы с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и технологий искусственного интеллекта для получения высокоточных пространственных данных по составу, объему и степени распределения по участкам кормовых, сорных, ядовитых растений, а также растений-индикаторов, характеризующих состояние почвенного покрова.

### **Решение для мониторинга сельскохозяйственных объектов с применением БПЛА**

Комплекс технологических решений, применяемых для автоматизации индустриальной схемы управления пастбищными хозяйствами, позволит решить следующие задачи, в частности:

---

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

- системы автоматизированного мониторинга пастбищ с использованием беспилотных летательных аппаратов;
- инструментов оценки объема биомассы на основании мультиспектральных снимков;
- решения для оценки качества биомассы (распознавание видового состава по снимкам высокого разрешения) с применением технологий искусственного интеллекта;
- решения для оценки объемов потребления биомассы (распознавание положения и анализ динамики перемещения животных) с применением технологий искусственного интеллекта;
- инструментов обработки, анализа и представления, накопленных данных в виде высокоточных карт зонирования пастбищных участков.

На выходе системы предполагается оценивать следующие характеристики:

- объём биомассы на пастбищном участке;
- качество биомассы на пастбищном участке.

Преимуществами описанного подхода являются:

- применение БПЛА для съемки пастбищ, обеспечивающее высокое разрешение снимков, которое позволяет выполнять расчеты характеристик с достаточной точностью, а также выполнять распознавание состава растений, выявлять сорняки и ядовитые травы;
- применение нейросетей для анализа полученных изображений и расчета объёма и определение качества биомассы на пастбищном участке;
- специализация на решении задач животноводства. Большинство агростартапов в России специализируется на растениеводстве.

Для получения оценок на вход системы, в первом приближении, подаются следующие основные данные:

- координаты, контуры (форма), топография и рельеф пастбища;
- виды растений на пастбище;
- плотность произрастания растений на пастбище;
- состояние растений на пастбище.

Источником данных служит фото и видеосъемка с БПЛА (с обработкой), грубой – ручной ввод с разметкой по элементарным участкам пастбища.

С целью повышения качества формируемых оценок, дополнительно, система имеет возможность обработки расширенного набора данных:

- тип грунта на пастбище;
- тип почвы и её физико-механические свойства;
- гидрография, уровень подземных вод в плане пастбища;
- локальные погодные данные, в том числе в нижней границе приземного слоя;

- полив;
- внесение удобрений.

Более того, возможен тонкий анализ качества биомассы на пастбище при наличии следующих данных:

- химический состав почвы (биохимия, бактериология);
- химический состав растений.

Источники данных разбиваются на следующие группы по динамике обновления информации:

- карты, схемы, – например, контуры, топография и рельеф пастбища – являются стационарными на интересующих периодах времени;
- таблицы, – например, химический состав почвы – периодически обновляются посредством проведения регулярных проб и анализов;
- регулярная фото- и видеосъемка в различных диапазонах и с различным пространственным разрешением, – например состояние растений на пастбище, появление новых локальных естественных образований на поверхности пастбища;
- оперативный мониторинг – данные о локальной погоде, локальной гидрографии и т.п.

## **Выводы**

Предлагаемый подход за счет применения современных БПЛА и средств автоматизации и обработки информации может значительно упростить мониторинг сельскохозяйственных угодий и облегчить технологические процессы производства. Применение БПЛА является универсальным и эффективным средством для получения данных о состоянии воды, почвы, атмосферы.

1. Всероссийская сельскохозяйственная перепись, 2016 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://burstat.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat\\_ts/burstat/resources/d515b280440bd78aa2aba3fa17e1e317/part+6.pdf](http://burstat.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_ts/burstat/resources/d515b280440bd78aa2aba3fa17e1e317/part+6.pdf), свободный (дата обращения: 01.05.2019).
2. *Шуварин, М.В.* Интенсивно-пастбищная технология содержания [Текст] / М.В. Шуварин // Вестник НГИЭИ Herald NGIEI. – 2013. – № 10. – С. 88–94.
3. *Дьяков, М.В.* Мясная продуктивность молодняка крупного рогатого скота в условиях интенсивного выращивания и откорма [Текст] / М.В. Дьяков, С.Ю. Харлап, Н.Д. Виноградова // Известия СПбГАУ. – 2018. – №3 (52).
4. *Горлова, А.Д.* Мясная продуктивность ягнят асканийской тонкорунной породы при интенсивном откорме до 6,5-месячного возраста [Текст] / А.Д. Горлова, Н.Ф. Попов, В.С. Яковчук // Сборник научных трудов ВНИИОК. – 2007. – № 2–2.

## **РОБОТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИЙ НА ПОДВОДНЫХ НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ**

*АО «ФНПЦ «Титан-Баррикады», г. Волгоград,  
cdb@cdbtitan.ru*

### **Введение**

Освоение подводных нефтяных и газовых месторождений для нашей страны имеет стратегическое значение. За последнее десятилетия добыча нефти и газа на шельфе как во всем мире, так и в России значительно увеличилась, при этом неуклонно растет опасность возникновения аварийной ситуации при освоении месторождений и добыче нефти и газа.

Особо тяжелыми – катастрофическими – являются аварии, сопровождаемые неуправляемым фонтанированием пластового флюида, помимо значительных экономических потерь, наносящие серьезный и зачастую невосполнимый урон окружающей среде. Так, при крупнейшей в истории аварии на плавучей буровой платформе Deerpwater Horizon компании BP (20 апреля 2010 г.) в море под давлением 600 атм. в течение 152 дней выливалось от 3 до 8 тыс. тонн нефти ежедневно, в результате чего образовалось нефтяное пятно площадью 75 тыс. км<sup>2</sup> и было загрязнено 1770 км побережья. Суммарные затраты на устранение последствий аварии составили более 60 млрд долларов США.

Проведение аварийно-спасательных работ на российских подводных месторождениях затруднено наличием ледового покрова, тяжелыми метеорологическими и гидрологическими условиями, удаленностью или практически полным отсутствием технических баз и другой необходимой инфраструктуры. При этом природа русского севера отличается высокой ранимостью и длительным периодом восстановления.

Поэтому особенно актуальной является задача исследования и разработки технологий и технических комплексов для ликвидации аварий на подводных месторождениях, в том числе в катастрофических ситуациях [1, 2].

### **Анализ существующих способов глушения подводных скважин**

Существующие способы глушения подводных аварийных скважин связаны с выполнением работ с поверхности моря. При этом на устье скважины со специального судна с использованием кранового

оборудования опускается специальная заглушка (превентор) с последующим бурением новой (разгрузочной или пломбировочной) скважины. Основным недостатком технологии является невозможность выполнения работ в условиях сильного волнения моря и в ледовых условиях. Также нерешенной является проблема резки обсадных труб скважины и демонтажа металлоконструкций подводного устьевого оборудования.

### **Технологии глушения скважины с использованием подводного роботехнического комплекса**

В условиях российского шельфа, ввиду затрудненности выполнения работ с поверхности моря, более предпочтительной представляется технология, базирующаяся на установке превентора с передвигающейся по морскому дну подводной роботизированной платформы (ПРП).

Такая платформа может быть выполнена с применением шагающих ортогональных движителей и помимо транспортировки и установки превентора способна выполнять резку обсадных труб и металлоконструкций скважины с использованием манипулятора, оснащенного соответствующим инструментом. Применение ортогонального движителя обеспечивает необходимую проходимость и маневренность платформы при работе на подводном месторождении, точность позиционирования на устье скважины и установку превентора без использования крана или манипулятора [3, 4].

Глушение аварийной скважины осуществляется в следующей последовательности: выдвижение судна обеспечения с ПРП к месту аварии; погружение в районе аварии (возможна доставка с использованием подводных лодок или через ближайшую полынью); опускание ПРП на грунт и выдвижение к точке выброса; позиционирование относительно подводной фонтанной аппаратуры скважины; захват основания скважины и срезание обсадных труб; установка превентора на фонтанирующую скважину; непосредственно глушение превентором, проведение необходимых буровых работ в навигационный период.

В соответствии с вышеизложенным может быть предложен следующий состав роботехнического комплекса.

#### 1. Основное оборудование.

1.1. Превентор на базе мехатронных модулей.

1.2. Роботизированная шагающая платформа.

1.3. Телеуправляемый необитаемый подводный аппарат.

#### 2. Вспомогательное оборудование.

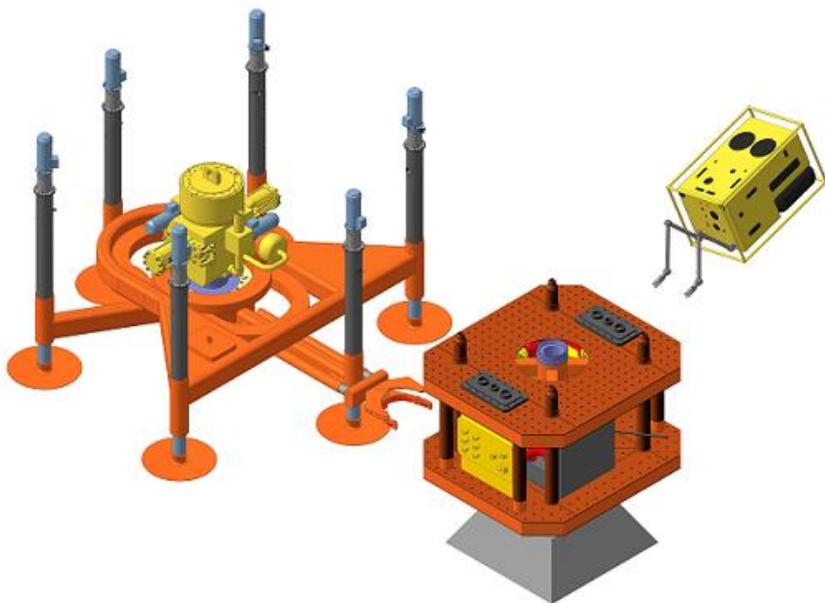
2.1. Автономные необитаемые подводные аппараты для проведения разведки, освещения обстановки.

2.2. Судно обеспечения, в том числе выполняющее функции транспортирования основного оборудования.

3. Оборудование технических баз, включая комплексный стенд для моделирования и отработки сценариев устранения аварии.

При необходимости в состав комплекса также могут быть включены технические средства для распыления диспергентов, сбора нефтепродуктов с поверхности моря и прибрежной зоны.

На рис. 1 представлено основное оборудование роботехнического комплекса при проведении работ на месторождении.



***Рис. 1. Оборудование роботехнического комплекса для устранения последствий аварий на подводном месторождении***

Основными направлениями научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию такого роботизированного комплекса являются следующие:

1. Моделирование процессов фонтанирования пластового флюида и его влияния на функционирование технических систем комплекса.

2. Исследование и разработка мехатронных модулей на базе линейных приводов подводного исполнения.

3. Создание систем управления и информационно-измерительных систем элементов комплекса.

4. Исследование и разработка средств коммуникаций, обеспечивающих функционирование элементов комплекса в единой информационной среде.

### **Заключение**

Основными преимуществами предложенного робототехнического комплекса являются:

- возможность работы в условиях ледового покрова и значительного волнения моря;
- высокая скорость доставки комплекса к месту аварии;
- возможность продолжения добычи после глушения скважины;
- возможность использования для проведения технологических операций по обустройству подводных месторождений полезных ископаемых.

1. *Шурыгин, В.А.* Концепция обустройства и обеспечения эксплуатации месторождений углеводородов на морском шельфе с использованием роботизированных шагающих платформ [Текст] / В.А. Шурыгин, В.А. Серов, И.В. Ковшов // Труды Международной конференции и выставки по судостроению и разработке высокотехнологичного оборудования для освоения континентального шельфа Offshore Marintec Russia – 2016 и 16-го Петербургского международного энергетического форума (4–7 октября 2016 года, Санкт-Петербург). – Санкт-Петербург: ХИМИЗДАТ, 2016. – С. 113–120.
2. *Серов, В.А.* Задачи технологических роботизированных шагающих платформ при освоении подводных (подлёдных) месторождений полезных ископаемых [Текст] / В.А. Серов, И.В. Ковшов, С.А. Устинов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 9 (194). – С. 181–191.
3. *Брискин, Е.С.* Сравнительный анализ колесных, гусеничных и шагающих машин [Текст] / Е.С. Брискин, В.В. Чернышев, А.В. Малолетов, Н.Г. Шаронов // Робототехника и техническая кибернетика. – 2013. – № 1 (1). – С. 6–14.
4. *Брискин, Е.С.* Об управлении адаптацией ортогональных шагающих движителей к опорной поверхности [Текст] / Е.С. Брискин, Я.В. Калинин, А.В. Малолетов, В.А. Серов, С.А. Устинов // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2017. – № 3. – С. 184–190.

## **МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОГО ФОРМИРОВАНИЯ ПРОГРАММНОЙ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ГРУППЫ РОБОТОВ, ДВИЖУЩИХСЯ В СТРОЮ \***

*Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН,  
г. Владивосток,  
undim@iacp.dvo.ru, filaret@iacp.dvo.ru*

В настоящее время основным направлением развития мобильной робототехники является использование групп роботов для совместного выполнения операций. При этом одним из вариантов групповых миссий является движение группы роботов в заданном строю с использованием стратегии «лидер-ведомые», когда в группе роботов выделяется лидер, имеющий информацию о миссии и формирующий траекторию движения, а остальные роботы являются ведомыми, которые вычисляют свое желаемое положение относительно лидера и следуют за ним.

В настоящее время уже разработано большое количество методов управления согласованным движением групп роботов [1]. Эти методы основаны на разных методах теории автоматического управления и позволяют обеспечить поддержание положения роботов-ведомых в строю с учетом неопределенности параметров роботов и влияния внешних возмущений.

Однако при движении по сложным траекториям, имеющим изгибы, для поддержания строя ведомые должны двигаться с различной скоростью. При этом может возникнуть ситуация, когда их движительные устройства могут войти в насыщения, что приведет к отходу робота от своего места в строю. В этом случае необходимо менять программную скорость движения лидера, чтобы ведомые могли успевать двигаться за ним.

В работе [2] был предложен метод настройки программной скорости движения подводных роботов, позволяющий обеспечить высокую точность и скорость их движения при сохранении заданной точности и учете входа их движителей в насыщения. Поэтому в работе решается задача модификации указанного метода для случая управления группой роботов, движущихся в строю.

### **Метод формирования программной скорости движения строя роботов**

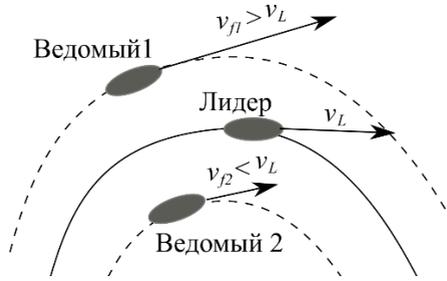
В работе рассматривается группа из  $n$  автономных подводных роботов, двигающихся в заданном строю. Один робот из группы является

---

\* Работа поддержана РФФИ (грант 16-29-04195-офи\_м).

лидером, который имеет полную информацию о траектории движения. Роботы-ведомые имеют информацию о положении, ориентации и скорости движения лидера и должны рассчитывать свое желаемое положение на основе этой информации.

Рассмотрим процесс прохождения группой криволинейной траектории (рис. 1).



**Рис. 1. Прохождение группой роботов криволинейной траектории**

В процессе прохождения изгиба траектории роботы-ведомые (Ведомый 1 на рис. 1), которые проходят изгиб траектории по радиусу большему, чем робот-лидер, чтобы сохранить строй должны двигаться со скоростью большей, чем робот-лидер. При этом увеличение скорости движения может приводить ко входу движителей робота-ведомого в насыщения и невозможности поддерживать повышенную скорость движения. В этом случае робот-лидер должен уменьшить скорость движения по траектории.

Для реализации этого принципа предлагается применить подход, предложенный в [2] и модифицированный для случая группового движения роботов. Для настройки программной скорости движения вдоль траектории предлагается использовать линейный регулятор, который будет изменять в зависимости от текущей точности этого движения. Эта точность будет оцениваться по динамической ошибке слежения за их желаемым положением. При этом точность движения всей группы будет оцениваться по максимальному значению динамической ошибки роботов-ведомых:

$$\xi = \max(\varepsilon_i), i = 1, n, \quad (1)$$

где  $n$  – количество роботов в группе;  $\varepsilon_i = \|X_i^* - X_i\|$  – расстояние от текущего положения  $X_i$   $i$ -го робота до целевой точки  $X_i^*$ .

Настройка программной скорости  $v_L^*$  движения робота-лидера происходит по следующему закону:

$$v^*_L = v^*_{LO} + K_p(\xi_{don} - \xi) + K_i \int (\xi_{don} - \xi) dt, \quad (2)$$

где  $v^*_{LO}$  – начальное значение программной скорости движения робота-лидера;  $K_p, K_i$  – положительные коэффициенты.

Как видно из выражения (2), настройка программной скорости робота-лидера выполняется с использованием ПИ-регулятора. Это решение обеспечивает простоту реализации системы, а также не требует использования высокоскоростных каналов связи. Для его функционирования достаточно передачи на робот-лидер информации от ведомых о текущем значении их динамических ошибок слежения за целевой точкой.

Для проверки предложенного метода было проведено математическое моделирование, в котором рассматривалось движение в строю группы из трех подводных роботов по криволинейной плоской траектории, описываемой гармоническим законом. Как показали результаты моделирования, использование предложенного метода настройки программной скорости движения позволяет обеспечить сохранение строя при движении по участкам траектории с большой кривизной, когда движители отдельных роботов могут входить в насыщения. При этом отсутствие такой настройки и движение робота-лидера по траектории с постоянной скоростью приводит к увеличению динамических ошибок управления на отдельных участках траектории в 3 раза, что не позволяет сохранять заданную конфигурацию строя.

### Заключение

В работе предложен метод автоматического формирования программной скорости движения группы роботов, движущихся в строю, в зависимости от текущих значений динамических ошибок движения каждого робота группы. Использование этой системы позволяет учесть вход в насыщения движителей отдельных роботов и обеспечить сохранение заданного строя. При этом реализация предложенной системы не требует существенного увеличения объема передаваемых данных между роботами группы.

1. *Зенкевич, С.Л.* Децентрализованное управление группой квадрокоптеров [Текст] / С.Л. Зенкевич, Н.К. Галустян // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – Т. 17, № 11. – С. 774–782.
2. *Филаретов, В.Ф.* Метод формирования гладких траекторий движения мобильных роботов в неизвестном заранее окружении [Текст] / В.Ф. Филаретов, Д.А. Юхимец // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2017. – № 4. – С. 174–184.

## **МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ СТРОЯ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ, ДВИЖУЩИХСЯ В НЕИЗВЕСТНОЙ ОБСТАНОВКЕ\***

*Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН,  
г. Владивосток,  
undim@iacp.dvo.ru, filaret@iacp.dvo.ru*

В настоящее время основным направлением увеличения производительности операций, выполняемых мобильными роботами различного типа, является использование групп роботов. При этом одним из важных режимов работы группы роботов является их движение в заданном строю. Указанный режим движения организуется на основе использования стратегии «лидер-ведомый», где в группе роботов выделяется один лидер, имеющий информацию о миссии и формирующий траекторию движения, а остальные роботы являются ведомыми, которые должны вычислять свое желаемое положение относительно лидера и следовать за ним.

В случае движения такой группы роботов в заранее неизвестной обстановке будут возникать ситуации, когда группа должна будет обходить обнаруженные препятствия. Поэтому возникает задача создания методов коррекции траектории роботов в группе так, чтобы каждый робот мог пройти на безопасной дистанции от обнаруженных препятствий и исключить столкновения с другими роботами группы. В настоящее время уже разработаны методы решения этой задачи, которые используют заранее построенную карту местности [1], что часто является невозможным, или основаны на методе потенциальных полей. Однако использование методов такого типа приводит к необходимости обеспечить обмен данными между всеми роботами группы, что не всегда возможно.

Таким образом, в работе предлагается метод формирования траекторий движения группы роботов в заранее неизвестной обстановке, который не требует априорной информации об окружающей обстановке и обмене дополнительной информацией между роботами группы.

### **Метод формирования траекторий группы роботов, перемещающихся в заданном строю**

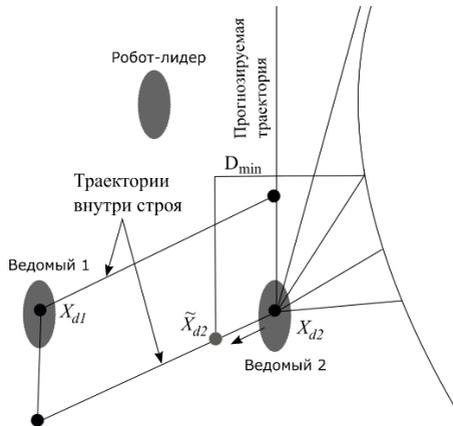
В работе рассматривается группа из мобильных роботов, реализующая стратегию «лидер-ведомые» и движущаяся в заранее неизвестной обстановке с препятствиями. Робот-лидер имеет информацию о задан-

---

\* Работа поддержана РФФИ (гранты 17-57-45055, 16-29-04195).

ной миссии (координаты базовых точек траектории) и корректирует свою траекторию в соответствии с обнаруженными препятствиями по методу, описанному в [2]. Роботы-ведомые следуют за лидером, придерживаясь положения в строю, координаты которого они рассчитывают на основе данных о текущем положении лидера. Каждый робот группы содержит набор дальномеров, позволяющих ему определять наличие и расстояние до препятствий.

При обнаружении препятствий роботами-ведомыми они должны скорректировать свое положение так, чтобы обеспечить безопасный проход около препятствия и отсутствие столкновений с другими роботами группы (рис. 1). При этом сохранение заданного строя не предусматривается, так как в противном случае это усложнило бы выполнение миссии или сделало бы ее невозможной (например, в случае, когда окружающая обстановка не содержит проходов между препятствиями, достаточных для безопасного прохождения строя).



**Рис. 1. Схема формирования траекторий движения роботов в заданном строю**

Для решения указанной задачи предлагается использовать следующий подход. Для заданной конфигурации строя для каждого ведомого заранее задается такая траектория возможного перемещения внутри строя, которая позволит ему обойти препятствие и не столкнуться с другими роботами в строю.

Алгоритм формирования траектории для отдельного  $i$ -го робота-ведомого состоит из следующих шагов.

1. Анализ данных, поступающих от бортовых дальномеров и определение расстояния от препятствия до траектории движения робота-

ведомого. Так как траектория движения робота-ведомого не задается, то указанное расстояние определяется от детектированной точки на препятствии до прямой, проходящей через желаемое положение робота-ведомого  $X_{di}$ , с направлением, совпадающим с текущим направлением движения лидера.

2. Если одно из расстояний, рассчитанных на основе данных от датчиков, меньше чем допустимое безопасное расстояние  $D_{min}$  до препятствия, то положение целевой точки для робота-ведомого смещается вдоль заданной траектории перемещения этого робота внутри строя. Указанное смещение рассчитывается так, чтобы расстояние от целевой точки до препятствия было бы не меньше, чем безопасная величина.

Следует отметить, что смещение целевой точки по предписанной траектории должно происходить не мгновенно, а с некоторой заданной скоростью, чтобы не вызвать резких изменений направления движения робота.

Для проверки предложенного подхода было проведено математическое моделирование в среде V-REP. В процессе моделирования рассматривалась группа из трех роботов, которые движутся в строю, представляющем равнобедренный треугольник. Каждый робот содержал по 7 дальномеров, равномерно распределенных в передней полусфере робота. Для моделирования был собран полигон, содержащий препятствия. При этом моделировались различные ситуации: между препятствиями существует безопасный коридор, между препятствиями безопасного прохода нет. Результаты моделирования показали, что предложенный алгоритм позволяет обеспечить безопасный проход группы роботов в неизвестном заранее окружении. При этом для обеспечения этого движения не требуется дополнительного обмена данными между роботами группы.

### Заключение

В работе предложен метод формирования траекторий движения группы роботов, движущихся в строю, в обстановке, содержащей неизвестные заранее препятствия. Предложенный метод позволяет обеспечить обход этих препятствий на безопасном расстоянии, исключая столкновения между роботами группы, без необходимости дополнительного обмена данными между этими роботами.

1. *Alvarez, D.* 3D Robot Formations Path Planning with Fast Marching Square / D. Alvarez, J. Gomez, S. Garrido, L. Moreno // Journal of Intelligent and Robotic Systems. – 06 February, 2015. – P. 1–18.
2. *Филаретов, В.Ф.* Метод формирования гладких траекторий движения мобильных роботов в неизвестном заранее окружении [Текст] / В.Ф. Филаретов, Д.А. Юхимец // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2017. – № 4. – С. 174–184.

## **ДИАЛОГОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ КОЛЛАБОРАТИВНЫМИ РОБОТАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДСТВ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ, НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ И ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ**

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), г. Москва, kafsm7@sm.bmstu.ru, arkadyus@mail,*

Коллаборативная робототехника (КР) получает все большее распространение в последнее время. Если раньше этот термин применялся к промышленным манипуляционным роботам, которые работали в том же рабочем пространстве, что и человек, то сегодня КР охватывает и мобильные роботы, работающие в среде, где находятся люди, и медицинскую робототехнику, и другие области, в которых робот также может быть назван ассистентом человека, выполняющего свою профессиональную работу. Особенностью КР является требование абсолютной безопасности для человека, работающего вместе с роботом, а также возможность легко управлять роботом и обучать его.

Основным средством взаимодействия человека и робота в КР становится речевой диалог. Методы обработки речевой информации и воспроизведения речи достаточно изучены. В [1, 2] описаны также средства организации «менеджера» речевого диалога, обеспечивающего ведение того или иного сценария диалога об обстановке, о неисправности робота, о планировании дальнейших действий и т.п. Поскольку при описании условий работы и самих рабочих операций человек всегда использует нечеткие термы («ближе», «дальше», «сильнее», «правее» и т.п.), то диалог в КР должен предусматривать использование нечетких термов и процедур фазификации /дефазификации. При этом могут быть составлены нечеткие правила поведения, заимствованные из опыта работы человека (хирурга, водителя автомобиля, летчика). Эти правила имеют вид правил-продукций, использующих нечеткие термы. С помощью известных процедур нечеткого вывода может быть найдено решение, которое либо описывает сложившуюся ситуацию, либо даёт представление о дальнейших действиях КР. Таким образом, реализуется экспертная система реального времени, вырабатывающая тактику поведения в реальных условиях и способная к самообучению.

Одним из важных условий диалога «человек-робот» является распознавание роботом отдельных предметов и характерных ситуаций, названия которых использует человек-оператор в процессе диалога. В настоящее время наиболее эффективным способом обучения робота распознаванию предметов является использование конволюционных

нейронных сетей [3]. Предварительное обучение робота на множестве объектов (предметов, ситуаций), с которыми, по предположению, робот может столкнуться в процессе своей работы, выполняется на обучающем множестве, содержащем либо реальные предметы, либо компьютерные 3D-изображения. После завершения обучения робот способен практически в масштабе реального времени «узнавать» знакомые объекты или определить степень сходства демонстрируемых объектов с теми, которые были включены в обучающее множество.

Поскольку мы говорим о речевом диалоге, то необходимо еще одно устройство в системе КР, которое распознавало бы голосовую речь оператора с достаточно высокой достоверностью. Сегодня для решения этой задачи эффективно используются глубокие нейронные сети [4, 5]. Учитывая, что достоверность распознавания указаний оператора все же не полная, то на этом этапе после обучения сети предполагается диалог подтверждения правильности распознанных команд.

Что же касается управления самим роботом, то здесь нужно выделить наиболее характерные классы операций, для которых можно заранее сформировать и необходимое управление. Например, для задачи захвата распознанных предметов необходимо знать их положение в пространстве, габариты, ориентацию. Если эти показатели обеспечивают возможность захвата с учетом конструкции схвата и конфигурации рабочей зоны манипулятора, то выбор управления осуществляется с помощью стандартных алгоритмов управления. Однако в ряде случаев необходима адаптация пространственного поведения манипуляционного робота к внешним условиям. Например, если в рабочей зоне оказывается посторонний предмет (рука человека), то необходимо планировать обход препятствия, или остановиться и сообщить оператору о возникшей ситуации. Аналогичная ситуация возникает в тех случаях, когда заранее неизвестно достаточно точно терминальное положение и ориентация схвата манипулятора. Например, в тех случаях, когда нужно передать предмет непосредственно в руку человеку. В этом случае адаптивное поведение манипуляционного робота также может быть реализовано с помощью нечеткой логики.

Заметим, что в экстремальных случаях (при управлении движущимися объектами, при выполнении сложных медицинских операций, при спасении людей и т.д.) может возникнуть необходимость дополнить речевое сообщение анализом выражения лица (человека, или условного лица робота). Эмоции являются важным средством дополнения речевой информации, минуя анализ её содержания. Решение этой задачи также может быть выполнено с помощью аппарата нечеткой логики и базы знаний, связывающей характерные признаки мимики с содержанием речевого общения [6]. Заметим, что такая технология позволяет также проводить оперативный анализ состояния самого оператора; это необходимо, например, при длительном управлении транспортными средствами.

Еще одним средством управления КР является дополненная реальность, позволяющая оператору получать дополнительную информацию в процессе работы с КР, а также проводить обучение системы управления на модели робота с последующей реализацией управления на реальном роботе. Это существенно повышает точность задания движения по сравнению с непосредственной его демонстрацией КР и безопасностью взаимодействия оператора с роботом, а также упрощает эту задачу для оператора. Планирование движений и непосредственное управление КР с использованием средств дополненной реальности приобретает особую важность при работе в экстремальных условиях.

Следует отметить, что тенденция к «облегчению» труда оператора КР реально приводит к его усложнению, точнее, переводу на более высокий интеллектуальный уровень. От управления отдельными движениями оператор переходит к постановке задач и контролю за ходом их выполнения. При этом к оператору предъявляются более высокие требования в отношении образного мышления, антиципации attentionных свойств [7]. Определенные психологические проблемы, требующие специальных исследований психологов, возникают и при реализации систем дополненной реальности.

В докладе приводятся экспериментальные результаты, полученные в результате исследования КР и позволяющие обоснованно проектировать такие системы.

1. *Williams, J.D.* Web-style ranking and SLU combination for dialog state tracking / J.D. Williams // Annual Meeting of the Special Interest Group on Discourse and Dialogue. – 2014. – P. 282.
2. *Zhonin, A.A.* Algorithm for learning the dialogue manager of the dialogue robot control system / A.A. Zhonin // Integrated models and soft computing in artificial intelligence. Sat scientific papers of the international conference. – М.: Phys. mat. Lit, 2011. – P. 395–406.
3. *Girshick, R.* Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation / R. Girshick, J. Donahue, T. Darrell, and J. Malik // CVPR, 2014.
4. *Arisoy, E.* Deep neural network language model / E. Arisoy, T. Sainath, B. Kingsbury, B. Ramabhadean // In proceedings of the Joint Human Language Technology Conference and the North American Chapter of the Association of Computational Linguistics Workshop. – 2012. – P. 20–28.
5. *Yu, Dong.* Automatic Speech Recognition / Yu Dong, Deng Li // A Deep Learning Approach. London, Springer, 2015. – P. 57–77.
6. *Yuschenko, A.* Mimic Recognition and Reproduction in Bilateral Human-Robot Speech Communication / A. Yuschenko, S. Vorotnikov, D. Konyshev, A. Zhonin // Interactive Collaborative Robotics. First International Conf. Budapest, 2016. – P. 133–142.
7. *Ющенко, А.С.* Человек и робот – эргономические проблемы коллаборативной робототехники [Текст] / А.С. Ющенко // Мир психологии. – 2018. – №4 (96). – С. 86–101.

## РАЗДЕЛ 3

### КОМПОНЕНТЫ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

*Ю.Ю. Андреева, Б.А. Жуков, Я.В. Калинин*

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ\*

*Волгоградский государственный технический университет,  
г. Волгоград,  
dvr@vstu.ru*

#### **Введение**

В современных робототехнических системах всё шире применяются новые материалы, которые обладают специфическими свойствами: пластмассы, резины, специальные виды сталей, клеевые и упругие соединения. Это обуславливается необходимостью достижения заданных свойств при жёстких ограничениях на массу робота и общих ограничениях эффективности работы и стоимости. Поэтому для возможности более широкого и экономически эффективного применения таких новых материалов со специфическими свойствами в робототехнике и машиностроении вообще необходимо разрабатывать новые и уточнять существующие модели поведения таких материалов в реальных условиях.

#### **Постановка задачи**

Решение задач нелинейной теории упругости для резиноподобных материалов осложняется тем, что неизвестен вид уравнения состояния, описывающий с приемлемой точностью их поведение при любых видах нагружения, подобно закону Гука в линейной теории. На данный момент известно множество моделей, которые хорошо согласуются с экспериментом при одном виде нагружения и плохо при другом виде для конкретных материалов. В работе [1] приведены 32 известные модели гиперупругих изотропных несжимаемых материалов и предлагаются новые. В работе [2] можно найти еще 12 моделей, не упомянутых в [1].

В распространенных коммерческих САЕ пакетах представлены в основном полиномиальные модели вида

---

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 18-41-343001).

$$W = \mathbf{e}_{i,j} c_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j. \quad (1)$$

Здесь  $I_1, I_2$  – главные алгебраические инварианты тензора деформаций Коши. Причем в ANSYS для несжимаемого гиперупругого материала всего две: Муни – Ривлина и Арруды – Бойса. В пакете SolidWorks несжимаемые гиперупругие материалы представлены тоже двумя моделями: Муни – Ривлина и Огдена. Более широкий спектр полиномиальных моделей предлагает ABAQUS. Для материалов, описываемых моделями, выражающимися через  $I_1, I_2$  трансцендентно или иррационально, приходится разрабатывать оригинальные численные пакеты. Для верификации новых пакетов необходимы точные решения задач нелинейной теории упругости для выбранной модели материала в условиях неоднородной деформации. Существует пакет с открытым вводом потенциала Marc, но и его приходится верифицировать для новых потенциалов [3, 4]. Целью является нахождение некоторых точных решений одной модельной задачи с разными потенциалами. Точные решения позволяют исследовать эффекты, не описываемые линейной теорией.

Наиболее простым видом двумерной неоднородной деформации, позволяющей найти точные решения, является антиплоская деформация. Ситуация осложняется тем, что для несжимаемых материалов конечная антиплоская деформация возможна только в телах с потенциалами энергии деформации, удовлетворяющими условиям, сформулированным в [5]. Она всегда возможна в материалах с обобщенным неогуксовским потенциалом  $W = W(I_1)$ . Для потенциалов вида  $W = W(I_1, I_2)$  антиплоская деформация возможна, например, в материале Муни – Ривлина и некоторых других. В общем случае реализуется более сложная цилиндрическая деформация [6, 7].

При постановке задачи статики при конечной антиплоской деформации использовались обозначения и терминология, которые соответствуют принятым в [8]. Общая постановка задач нелинейной упругости приводится к форме, удобной для дальнейшего рассмотрения [5]. В качестве задачи, для которой отыскиваются точные решения, рассматривается задача о конечном продольном сдвиге круговой цилиндрической втулки между жесткими концентрическими обоймами.

Рассматриваемая задача решалась многими авторами для различных потенциалов. Остановимся на некоторых из тех потенциалов [1], для которых нам не удалось найти решения в литературе. Поскольку для однородных материалов первого порядка  $W_1$  и  $W_2$  являются функциями только  $\dot{\nu}(\rho)$  и некоторых параметров, то при постановке конкретного выражения для потенциала энергии деформации в уравнение

$$[W_1(\rho) + W_2(\rho)]\dot{v}(\rho) = \frac{\mu q}{2\rho}, \quad (2)$$

полученное в [9], оно превращается в алгебраическое или трансцендентное уравнение относительно  $\dot{v}(\rho)$ . Успех в получении явного выражения для точного решения  $v(\rho)$  зависит от возможности получения явного выражения для решения этого уравнения. Получение такого решения всегда возможно для алгебраических уравнений степени не выше четвертой. Для трансцендентных уравнений получение явного выражения для решения проблематично. Получены новые точные аналитические решения одной задачи нелинейной теории упругости для двух потенциалов энергии деформации несжимаемого материала Фунга и Гента-Томаса.

1. *Hossa, L.* A new constitutive model for rubber-like materials / L. Hossa, R. J. Marczak // *Computational Mechanics* 29. – 2010 – P. 2759–2773.
2. *Черных, К.Ф.* Законы упругости для изотропных несжимаемых материалов, феноменологический подход [Текст] / К.Ф. Черных, И.М. Шубина // *Механика эластомеров*. – Краснодар, 1977. – Т. 1. – Вып. 242. – С. 54–64.
3. *Коробейников, С.Н.* Численная реализация лагранжевой формулировки определяющих соотношений изотропного гиперупругого материала Генки [Текст] / С.Н. Коробейников, А.А. Олейников, А.Ю. Ларичкин, А.В. Бабичев, В.В. Алёхин // *Дальневосточный математический журнал*. – 2013. – Т. 13, № 2. – С. 222–249.
4. *Knowles, J.K.* On finite anti-plane shear for incompressible elastic materials. / J.K. Knowles // *J. Austral. Math. Soc* 19, 1976. – P. 400–639.
5. *Жуков Б.А.* Нелинейное взаимодействие конечного продольного сдвига и конечного кручения втулки из резиноподобного материала [Текст] / Б.А. Жуков // *Известия РАН МТТ*. – 2015. – № 3. – С. 127–135.
6. *Horgan, C.* Superposition of generalized plane strain on anti-plane shear deformations in isotropic incompressible hyperelastic materials / C. Horgan, G. Saccomandi // *Journal of Elasticity* 73, 2003. – P. 221–235.
7. *Лурье, А.И.* Нелинейная теория упругости [Текст] / А.И. Лурье. – Москва: Наука, 1980. – 512 с.
8. *Valluri, S.R.* Some applications of the Lambert W function to physics / S.R. Valluri, D.J. Jeffrey, R.M. Corless // *Canadian J. Physics*. – 2000. – Vol. 78. – P. 823–831.
9. *Андреева, Ю.Ю.* Точные аналитические решения одной задачи нелинейной теории упругости для двух потенциалов энергии деформации несжимаемого материала [Текст] / Ю.Ю. Андреева, Б.А. Жуков // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки*. – 2018. – № 2 (46). – С. 64–76.

## КОМПЛЕКСИРОВАННЫЙ ДАТЧИК ДЛЯ КОНТРОЛЯ ФОРМЫ ЗВЕНЬЕВ МАНИПУЛЯТОРА С УПРАВЛЯЕМЫМ ИЗГИБОМ\*

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН,  
г. Уфа,  
dr\_bog@mail.ru

### Введение

Одним из наиболее интенсивно развивающихся направлений современной робототехники являются *soft*-манипуляторы, чьи свойства базируются на применении особых (эластичных, мягких) конструктивных материалов, что позволяет перемещать рабочую точку по заданной траектории путем изменения формы звеньев [1, 2]. Специфика конструкции значительно усложняет синтез систем управления *soft*-манипуляторами, так как требуется применение нетрадиционных подходов при построении моделей кинематики и динамики. Достаточно часто проблема решается путем проведения натуральных экспериментов, а на базе полученных данных строятся грубые имитационные модели [2], чего для подобных манипуляторов явно недостаточно, так как отработка приводами управляющих воздействий, сгенерированных только на основе результатов использования таких моделей, не гарантирует получения заданной формы звеньев манипулятора и достижения целевой точки с требуемой точностью. Поэтому возникает необходимость в коррекции расчетов за счет получения дополнительной информации о состоянии манипулятора. Так как в манипуляторе [3] отсутствуют шарниры между элементами звеньев, то для обеспечения целостности манипулятора требуется постоянный контроль усилий натяжения рабочих тросов.

### Постановка задачи

Управление формой манипулятора (перемещением рабочей точки в пространстве) осуществляется за счет изменения длин тросов звеньев, полученных из кинематической модели манипулятора, представляющей собой матрицу преобразования  $T_M$ :

$$T_M = \prod_{j=1}^N \prod_{i=1}^{M_j} T_{ji}, \quad (1)$$

где  $j$  – номер звена;  $i$  – номер элемента в звене;  $M_j$  – число элементов в  $j$ -м звене;  $T_{ji}$  – матрица преобразования для  $i$ -го элемента  $j$ -го звена.

---

\* Работа выполнена в рамках госзадания №0246-2018-007 и при поддержке Программы Президиума РАН № 1.29П.

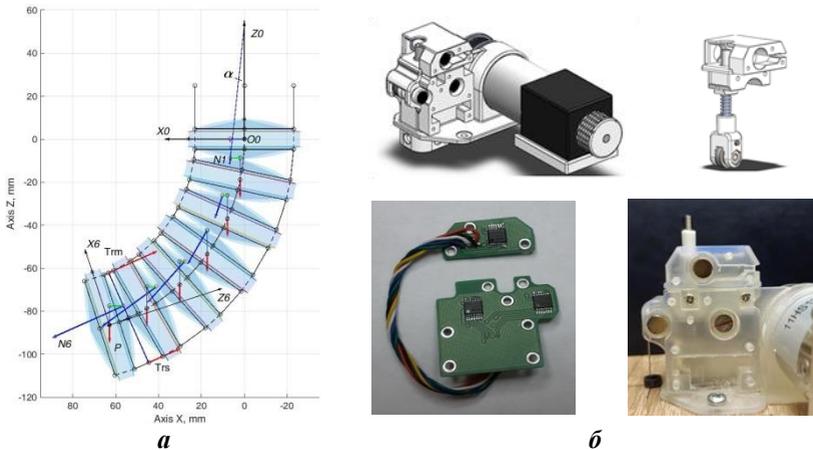
При этом для неразрывности элементов в первом звене необходимо, чтобы выполнялось следующее условие:

$$N_1 > (P \cdot \sin \alpha) / f_s, \quad (2)$$

где  $N_1$  – нормальная сила реакции в точке контакта неподвижного и первого подвижного элементов звена;  $P$  – вес одного элемента звена;  $\alpha$  – угол сдвига (качения) элементов друг относительно друга;  $f_s$  – коэффициент трения скольжения.

Таким образом, для перемещения манипулятора (рис. 1,а), помимо изменения длин тросов, необходим контроль баланса натяжения тросов для выполнения условия (2). После определения значения  $N_1$  вычисляются требуемое значение силы реакции  $N_n$  из рекурсии:

$$N_n = [N_{n-1} + P \cos((2n - 3)\alpha)] / \cos(2\alpha).$$



**Рис. 1. Плата с датчиками и размещение магнитов: а – звено манипулятора, б – силовой модуль (верхние рисунки, справа)**

Далее вычисленное значение  $N_n$  и требуемые соотношения сил натяжения тросов для заданных углов  $\alpha$  и  $\psi$  (3) используются для нахождения значений  $Tr_i$  из системы уравнений баланса сил, моментов (4):

$$\begin{cases} Tr_m = Tr_1 + Tr_2 \\ Tr_1 |M_{rm} M_2| = Tr_2 |M_{rm} M_1| \\ Tr_s = Tr_3 + Tr_4 \\ Tr_3 |M_{rs} M_4| = Tr_4 |M_{rs} M_3| \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} Tr_1 + Tr_2 + Tr_3 + Tr_4 - N_n - P \cos \alpha = 0 \\ N_n f_r - P d_p \pm \sum_{i=1}^4 T_i d_{Tr_i} = 0, \end{cases} \quad (4)$$

где  $f_r$  – коэффициент трения качения;  $d_p, d_{Tr_i}$  – плечи для сил тяжести и натяжения тросов соответственно, полученные из модели (1).

## Решение задачи

Для реализации описанного выше алгоритма функционирования системы управления манипулятором был разработан силовой модуль в виде единой базы, совмещающей шаговый привод и комплексированный датчик натяжения-перемещения тросов (ДНПТ) (рис. 1,б, верхние). Для получения информации используются датчики углового положения (*magnetic rotary encoder*) на базе микросхем AS5048A (*AMS Inc.*) [4] и постоянных магнитов, расположенных в торцах трех валов. Два датчика генерируют информацию о перемещении троса на валу привода и на входе в манипулятор, третий – о натяжении троса.

Для синхронного опроса датчиков по протоколу *SPI* (12 для одного звена и 36 для трех звеньев) была использована ПЛИС *Cyclone V* фирмы *Intel*, в которой синтезировалась электронная схема в соответствии с описанием специализированного компонента на языке *VHDL* [5].

## Заключение

Результаты экспериментов подтвердили жесткость зависимости показаний датчика от реального натяжения-перемещения тросов, но для оценки суммарной погрешности измерений требуется доработка конструкции узла с частичной заменой части полимерных деталей на металлические, так как полимер, использованный при 3D-печати прототипа, не обеспечивает необходимую геометрическую стабильность и жесткость.

Предлагаемый вариант реализации информационной системы предоставил возможность для продолжения теоретических и практических работ по синтезу эффективной системы управления манипулятором с управляемым изгибом.

1. *Hughes, Josie* Soft Manipulators and Grippers: A Review / Josie Hughes, Utki Culha, Fabio Giardina, et al. // *Frontiers in Robotics and AI* / November 2016, Vol. 3, Article 69, (published 16 November 2016). – DOI:10.3389/frobt.2016.00069.
2. *Ranzani, T.* Bioinspired soft manipulator for minimally invasive surgery / T. Ranzani, G. Gerboni, M. Cianchetti and A. Menciassi // *Bioinspiration & Biomimetics*, March 2015, DOI:10.1088/1748-3190/10/3/035008.
3. *Богданов, Д.Р.* Кинематика манипулятора с управляемым изгибом на базе твердых элементов со сферической поверхностью [Текст] / Д.Р. Богданов, О.В. Даринцев // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2015. – Т. 16, № 10. – С. 671–677. – DOI: 10.17587/mau.16.671-678.
4. AS5048A/AS5048B Magnetic Rotary Encoder.// URL:<http://www.datasheet-pdf.com/PDF/AS5048A-Datasheet-ams-903335> (дата обращения 13.05.2019).
5. Программа для моделирования и синтеза специализированного цифрового компонента ПЛИС опроса датчика магнитного энкодера AS5048A [Текст] / Д.Р. Богданов; Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2019613916 РФ, заявл. 11.03.2019; опубл. 26.03.2019.

*А.А. Борейко<sup>1</sup>, А.В. Инзарцев<sup>1</sup>, А.И. Машошин<sup>2</sup>,  
А.М. Павин<sup>1</sup>, И.В. Пашкевич<sup>2</sup>*

## **СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМ НЕОБИТАЕМОМ ПОДВОДНЫМ АППАРАТОМ БОЛЬШОЙ АВТОНОМНОСТИ\***

*<sup>1</sup>Институт проблем морских технологий ДВО РАН, г. Владивосток,  
<sup>2</sup>АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», г. Санкт-Петербург,  
aimashoshin@mail.ru*

Автономные обитаемые подводные аппараты являются одним из наиболее перспективных средств изучения и освоения Мирового океана [1].

Создание автономного обитаемого подводного аппарата (АНПА) предполагает решение целого комплекса сложных научно-технических и технологических проблем, из которых, как показала мировая практика, выделяется проблема создания эффективной системы управления (СУ), способной в автоматическом режиме обеспечить выполнение задания на миссию, адаптируясь к сложившейся обстановке на маршруте, и одновременно парируя все возникающие нештатные ситуации, вызванные как внешними (преднамеренное и непреднамеренное противодействие, подвижные и неподвижные препятствия), так и внутренними (неисправности и отказы аппаратной части, сбои программного обеспечения) причинами. По информации, полученной от зарубежных специалистов, стоимость создания СУ превышает половину стоимости создания всего АНПА.

Проблема ещё более усложняется при создании АНПА большой автономности, имеющих значительное водоизмещение и способных самостоятельно преодолевать маршрут в несколько тысяч километров и выполнять в конечной точке маршрута предписанное задание.

Целью доклада является изложение подходов к построению СУ АНПА большой автономности.

Система управления АНПА должна обеспечить выполнение заданной миссии путём управления широкой номенклатуры технических средств АНПА, типовой набор которых включает:

- систему навигации (СН);
- систему гидроакустического позиционирования (СГП) по сигналам донных, заякоренных и дрейфующих маяков-ответчиков, установленных в реперных точках маршрута АНПА;

---

\* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 19-08-00324) и программы Президиума РАН № 29 «Актуальные проблемы робототехнических систем».

- систему радионавигационного позиционирования (СРНП) с использованием сигналов стационарных и мобильных радионавигационных станций;
- систему спутникового позиционирования (ССП) по сигналам глобальных спутниковых навигационных систем;
- гидроакустическую систему освещения обстановки (ГСОО) в активном и пассивном режимах работы;
- систему гидроакустической связи (СГС);
- систему радиосвязи (СРС);
- систему генерации и распределения электроэнергии (СГРЭ);
- движительно-рулевой комплекс (ДРК);
- систему дифферентовки (СД);
- систему аварийной сигнализации (светосигнальной и гидроакустической).

СУ АНПА относится к системам управления наивысшей сложности, что обусловлено необходимостью управлять в реальном времени большим количеством разнородных технических средств и при этом функционировать в полностью автоматическом режиме в непрерывно изменяющейся внешней агрессивной среде при ограниченных возможностях автономной подводной навигации и связи с пунктом управления.

Известно [2, 3], что построить такую СУ как централизованную (мультиобъектную), в которой СУ управляет всеми действиями всех технических средств АНПА, ввиду высокой сложности весьма затруднительно.

Для построения СУ АНПА в наибольшей степени подходит децентрализованная мультиагентная структура. При такой структуре каждая система АНПА является самостоятельным независимым интеллектуальным агентом с собственной системой управления. Управление движением АНПА и выполнением других функций осуществляется путём взаимодействия на основе равноправного общения всех систем-агентов. Для того чтобы это взаимодействие имело целенаправленный характер, предусмотрен специальный агент-диспетчер, организующий выполнение сценария миссии, описанного в виде заранее подготовленного маршрутного задания (МЗ). МЗ содержит последовательность действий, которые должен совершить АНПА, с привязкой этих действий ко времени и географическим координатам и с указанием системы АНПА, которая должна осуществить каждое конкретное действие с привлечением, при необходимости, других систем.

При наступлении согласно МЗ времени выполнения очередного элемента маршрутного задания (ЭМЗ) диспетчер выдаёт заявку на выполнение данного ЭМЗ указанной в МЗ системе АНПА (здесь и далее для краткости, говоря о системе АНПА, мы, как правило, будем иметь в

виду её систему управления). Поскольку все системы АНПА запитаны от одного и того же источника электроэнергии и программное обеспечение всех систем АНПА, как правило, реализовано в едином вычислительном устройстве, перед выдачей заявки диспетчер должен убедиться, что система АНПА, которой выдаётся задание, обладает в данный момент достаточными энергетическими и вычислительными ресурсами для выполнения заявки.

Система-исполнитель, получив заявку от диспетчера, организует выполнение соответствующего действия с учетом сложившейся ситуации и имеющихся технических возможностей. При необходимости для реализации ЭМЗ система-исполнитель привлекает другие системы АНПА. Конкретное содержание этого привлечения определяется путём обмена сообщениями с этими системами. Для обеспечения обмена сообщениями все системы АНПА подключены к сети обмена данными. Обмен данными между абонентами сети осуществляется по унифицированным сетевым протоколам.

Выполнив предписанный ЭМЗ, система-исполнитель сообщает о результатах выполнения диспетчеру. Если система-исполнитель установила, что поступившую заявку по каким-либо причинам он выполнить не может либо может выполнить лишь частично, либо за большее время, она сообщает об этом диспетчеру с приведением аргументации (наличие неисправностей, нехватка электроэнергии и др.).

Если предписанный маршрутным заданием ЭМЗ в обозначенный срок полностью не выполнен, диспетчер в соответствии с имеющейся в маршрутном задании инструкцией корректирует МЗ. Это является наиболее сложной функцией диспетчера, особенно если учесть, что нарушение МЗ под воздействием внешних и внутренних факторов является не исключением, а правилом.

Также диспетчер должен следить за расходом запаса электроэнергии. Для этого ему периодически от СГРЭ поступают сведения об оставшемся запасе электроэнергии и её расходе в текущий момент времени с указанием потребителей и потребляемой ими мощности. Перед выдачей заявки в системы АНПА на выполнение энергоёмких действий диспетчер должен оценить, вписывается ли это действие в приведённый в МЗ график расхода электроэнергии. Если нет, то действие следует либо заменить другим, менее энергоёмким, либо не выполнять вовсе. При перерасходе электроэнергии на каком-либо участке маршрута диспетчер должен обеспечить вхождение в график расходования электроэнергии путём её экономии на другом участке.

Основным достоинством описанной структуры СУ АНПА является относительная простота её создания по сравнению с централизован-

ной структурой, поскольку разработать СУ отдельного агента существенно проще, чем комплексную СУ всего АНПА. При этом заметим, что при необходимости ещё большего упрощения каждая из систем АНПА может быть представлена несколькими агентами со своими СУ. Например, ГСОО может быть разделена на два агента, один из которых функционирует в активном режиме, а другой – в пассивном.

### **Заключение**

1. Система управления АНПА относится к системам управления наивысшей сложности, что обусловлено необходимостью управлять в реальном времени большим количеством разнородных технических средств и при этом функционировать в полностью автоматическом режиме в непрерывно изменяющейся внешней агрессивной среде при ограниченных возможностях автономной подводной навигации и связи с пунктом управления.

2. Для построения системы управления АНПА в наибольшей степени подходит децентрализованная мультиагентная структура, при которой каждая система АНПА является самостоятельным независимым интеллектуальным агентом с собственной системой управления.

3. Организация взаимодействия систем АНПА в интересах выполнения маршрутного задания возлагается на специального агента-диспетчера.

4. Поскольку достижение целей миссии АНПА во многом зависит от качества подготовленного маршрутного задания, до начала миссии оно должно пройти верификацию на специальном стенде на предмет выявления ошибок и уточнения необходимых энергетических и временных затрат на выполнение каждого элемента маршрутного задания.

1. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение [Текст] / А.В. Инзарцев, Л.В. Киселев, В.В. Костенко, Ю.В. Матвиенко, А.М. Павин, А.Ф. Щербатюк [отв. ред. Л.В. Киселев]. – Владивосток: ИПМТ ДВО РАН, 2018. – 368 с.
2. *Городецкий, В.И.* Многоагентные системы (обзор) [Текст]/ В.И. Городецкий, М.С. Грушинский, А.В. Хабалов // *Новости искусственного интеллекта.* – 1998. – № 2. – С. 64–116.
3. *Ржевский, Г.А.* Как управлять сложными системами? Мультиагентные технологии для создания интеллектуальных систем управления предприятиями [Текст] / Г.А. Ржевский, П.О. Скобелев. – Самара: Офорт, 2015. – 290 с.

*В.В. Жога<sup>2</sup>, В.В. Дяшкин-Титов<sup>1</sup>, И.А. Несмиянов<sup>1</sup>, А.В. Дяшкин<sup>1</sup>*

## **ПОЛНАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ МАНИПУЛЯТОРА ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ТРИПОДА**

<sup>1</sup>*Волгоградский государственный аграрный университет,*

<sup>2</sup>*Волгоградский государственный технический университет,  
г. Волгоград,*

*Центр технологий компонентов робототехники и мехатроники,*

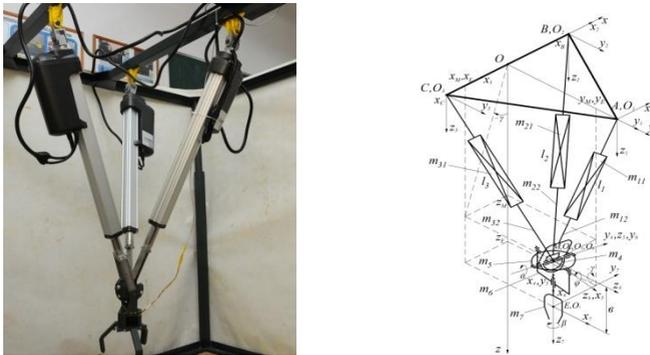
*Университет Иннополис, г. Иннополис,*

*c\_43.52.00@mail.ru, viczhoga@gmail.com*

В работе представлена полная аналитическая модель динамики манипулятора параллельно-последовательной структуры с учетом масс исполнительных звеньев. Уравнения записаны с помощью формализма Лагранжа для систем с дополнительными голономными связями. При заданных законах перемещения захвата манипулятора находятся движущие силы и моменты, обеспечивающие выполнение программного движения, а также значения динамических нагрузок в кинематических парах. Результаты расчетов служат для выбора приводных электродвигателей, проведения прочностных расчетов элементов конструкции манипулятора, а также являются исходными данными для проектирования системы управления.

Манипуляторы параллельной структуры находят применение в технологических процессах, при выполнении которых требуются высокие скорости и ускорения рабочего органа. Так, манипуляторы типа трипода используются при сборке микросхем, сортировке и упаковке продукции [1].

Фото и кинематическая схема рассматриваемого манипулятора приведены на рис. 1 [2].



**Рис. 1. Общий вид и кинематическая схема манипулятора – трипода на неподвижном основании**

Манипулятор состоит из пространственного подвижного трех-стержневого механизма, изготовленного в виде треугольной пирамиды с активными исполнительными звеньями переменной длины  $l_1, l_2, l_3$ . Одни концы этих звеньев соединяются посредством двухподвижных шарниров, расположенных на неподвижном основании  $ABC$ . В качестве исполнительных звеньев используются звенья с электрическим приводом постоянного тока (актуаторы). Все актуаторы снабжены встроенным аналоговым датчиком перемещения. В конструкции манипулятора оси приводных звеньев линейного перемещения геометрически сходятся в одной точке  $M$  посредством сферического пятиподвижного шарнирного узла, что исключает появление в них изгибающих моментов от внешних нагрузок.

На сферическом шарнирном узле смонтировано управляемое захватное устройство (см. рис. 1), состоящее из трех звеньев, последовательно соединенных друг с другом кинематическими парами V класса. Оси трех вращательных пар пересекаются в точке, и локальные движения конечной точки  $E$  цепи происходят по поверхности. Однако за счет региональных движений точки  $M$  подвеса захвата, обеспечивается ее объемное движение. Число степеней свободы манипулятора равно шести.

Координатами манипулятора являются длины звеньев  $l_i(t)$ , углы  $\delta_i(t)$ ,  $\varphi_i(t)$ , ( $i = 1 - 3$ ) поворотов электроцилиндров относительно абсолютной системы координат, углы относительных поворотов звеньев захватного устройства  $\alpha(t)$ ,  $\psi(t)$ ,  $\beta(t)$ , конструктивный угол  $\gamma(t)$  и координаты центра масс сферического шарнира  $x_M(t)$ ,  $y_M(t)$ ,  $z_M(t)$ .

Шесть координат являются независимыми. На все координаты наложены десять голономных связей.

Для описания динамики перемещения звеньев манипулятора воспользуемся уравнениями Лагранжа второго рода с дополнительными голономными связями [3]:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_j} = Q_j - \frac{\partial \Pi}{\partial q_j} + \sum_{i=1}^{10} \lambda_i \frac{\partial f_i}{\partial q_j}, \quad j = 1 \div 16, \quad (1)$$

где  $T$  – кинетическая энергия манипулятора;  $Q_j$  – обобщенная сила, соответствующая  $j$  координате;  $\lambda_i$  – множители Лагранжа;  $-\partial \Pi / \partial q_j$  – обобщенная сила потенциальных сил, соответствующая  $j$  координате.

Кинетическая энергия манипулятора складывается из кинетической энергии корпусов актуаторов  $T_{ia}$  при их сферическом движении, кинетической энергии штоков  $T_{ir}$  при переносном движении вместе с корпусами и при прямолинейном поступательном движении относительно корпусов, а также кинетической энергии сферического шарнира  $T_4$ , кинетической энергии  $T_5, T_6, T_7$  звеньев за-

хватного устройства манипулятора и кинетической энергии  $TW$  переносимого груза

$$T = \sum_{i=1}^3 T_{ia} + \sum_{i=1}^3 T_{ir} + T_4 + T_5 + T_6 + T_7 + T_w. \quad (2)$$

Формирование возможных технологических траекторий хвататного устройства манипулятора необходимо для планирования программных перемещений манипулятора, которые записываются в лингвистический аппроксиматор (ЛА) [4], а затем используются для формирования базы моделей и управлений (БМУ).

База моделей и управлений формируется математическими моделями манипулятора, алгоритмами управления и значениями коэффициентов регулятора обратных связей в соответствии с технологическими движениями, описанными в лингвистическом аппроксиматоре [5].

Полученные уравнения динамики позволили решить две основные задачи – определение движущих сил и моментов, необходимых для реализации заданных программных движений рабочего органа, а также усилия в кинематических парах.

1. Рыбак, Л.А. Инновационное обрабатывающее оборудование на базе параллельных структур: перспективы и направления коммерциализации [Текст] / Л.А. Рыбак, Г.П. Гриненко // Научные технологии в машиностроении. – 2013. – № 7(25). – С. 32–39.
2. Dyashkin-Titov V.V., Zhoga V.V., Nesmiyanov I.A., Vorob'eva N.S. (2018) Dynamics of the Manipulator Parallel-Serial Structure. In: Evgrafov A. (eds) Advances in Mechanical Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. – P. 33–43.
3. Лурье, А.И. Аналитическая механика [Текст] / А.И. Лурье. – Москва, 1961. – 824 с.
4. Интеллектуальные роботы [Текст]: учебное пособие для вузов; под общей ред. Е.И. Юревича / И.А. Каляев, В.М. Лохин, И.М. Макаров и др. – Москва: Машиностроение, 2007. – 360 с.
5. Воробьева, Н.С. Разработка базы моделей манипулятора параллельно-последовательной структуры [Текст] / Н.С. Воробьева, В.В. Жога, В.В. Дяшкин-Титов, А.В. Дяшкин // Десятая всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2017): материалы 10-й Всероссийской мультиконференции в 3 т. – Ростов-на-Дону: Издательство Южный федеральный университет, 2017. – С. 143–145.

## **РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АККОМОДАЦИИ К ДЕФЕКТАМ В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ МАНИПУЛЯТОРОВ, УСТАНОВЛЕННЫХ НА МОБИЛЬНЫХ РОБОТАХ\***

*Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН,  
Институт проблем морских технологий ДВО РАН,  
Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток,  
Университет Иннополис, г. Иннополис,  
filaret@iacp.dvo.ru, zuev@marine.febras.ru*

### **Введение**

Важной задачей при автономном групповом функционировании многозвенных манипуляторов (ММ) и мобильных роботов (МР) является повышение надежности, безопасности и живучести этих сложных устройств [1, 2]. Для достижения указанных требований необходимо осуществлять качественное оперативное диагностирование состояния основных блоков и устройств этих роботов, своевременно обнаруживая и устраняя возникающие дефекты до появления аварийных ситуаций. Известные в настоящее время системы отказоустойчивого управления робототехническими объектами основаны на процедурах диагностирования дефектов (т.е. обнаружении, локализации и определении их величины) и подстройки систем управления этими объектами для оперативного парирования последствий возникших дефектов [3]. При этом диагностирование дефектов, как правило, осуществляется с помощью диагностических наблюдателей (ДН), строящихся с использованием громоздких уравнений динамики объектов управления. Это значительно затрудняет обнаружение и точное определение величин возможных дефектов в электроприводах ММ, описываемых сложными нелинейными дифференциальными уравнениями с переменными параметрами, учитывающими взаимовлияния между всеми их степенями подвижности, внешние возмущения, сухие трения и др. В результате не удается сформировать дополнительные сигналы управления, подаваемые на электроприводы соответствующих степеней подвижности ММ, обеспечивающие точную компенсацию появляющихся дефектов.

Для решения этой проблемы в докладе создан новый метод синтеза легкорезализуемых систем аккомодации к дефектам в электроприводах ММ, основанный на использовании эффективных ДН, работающих на основе данных, поступающих от стереоскопических систем техниче-

---

\* Работа поддержана грантом Президента РФ (МК-1987.2018.8), а также грантами РФФИ (16-29-04195, 17-57-45055, 19-08-00347).

ского зрения (ССТЗ), которые позволяют быстро получать точные параметры движения всех типов ММ. При этом, в отличие от известных методов, процесс диагностирования дефектов осуществляется на основе быстрого комплексирования информации, получаемой только от датчиков манипулятора и текущей видеоинформации без традиционного использования сложных нелинейных уравнений динамики многозвенника.

### **Описание метода**

Предложенный метод синтеза содержит четыре основных этапа [4]. На первом этапе – с использованием уравнений кинематики ММ и информации о положении и ориентации его схвата, получаемой с помощью ССТЗ, строятся ДН, предназначенные для обнаружения и локализации возникающих дефектов в датчиках углового положения и скорости выходных валов редукторов электроприводов всех степеней подвижности робота. При этом для точного определения положения и ориентации схвата с помощью ССТЗ предложено использовать специальный шаблон, фиксируемый на схвате манипулятора. Этот шаблон представляет собой прямоугольный треугольник, в вершинах которого расположены круглые маркеры разных цветов (синий, красный и зеленый). Зная взаимное расположение этих маркеров, удастся определить матрицу однородного преобразования  $4 \times 4$ , определяющую положение и ориентацию схвата ММ в системе координат ССТЗ, которая далее приводится к базовой системе координат, связанной с основанием робота.

На втором этапе синтеза для диагностирования дефектов, обусловленных ошибками в показаниях датчика тока, изменением активного сопротивления или индуктивности цепи якоря электропривода конкретной степени подвижности, вводятся дополнительные ДН [5]. Особенностью этих ДН является то, что они строятся для мониторинга некоторой виртуальной переменной, являющейся совокупной оценкой указанных величин. При этом построение ДН осуществляется только на основе сигнала от датчика положения и величины напряжения, подаваемого на вход рассматриваемого электропривода.

Для выявления дефектов в конкретной степени подвижности манипулятора с учетом введенных ДН определяются соотношения между величинами полученных невязок и возникающими дефектами. Эти соотношения задаются с помощью матрицы синдромов.

После обнаружения и локализации дефектов на третьем этапе синтеза при реализации системы аккомодации необходимо в реальном масштабе времени точно оценить их величину. Для определения величин дефектов по сигналам, выдаваемым синтезированными ДН, предложено вводить в эти ДН обратные связи по сигналам невязки специального вида.

На четвертом, заключительном, этапе синтеза систем аккомодации полученные величины дефектов используются для формирования дополнительных сигналов, гарантирующих оперативное парирование этих дефектов. Для решения указанной задачи предложено использовать самонастраивающиеся корректирующие устройства, в которые введены специальным образом величины идентифицированных дефектов [2].

Результаты проведенного математического моделирования полностью подтвердили работоспособность и высокую эффективность предложенного нового метода и разработанных на его основе систем аккомодации к типовым дефектам, возникающим в электроприводах ММ, установленных на МР, в том числе и при движении их рабочих органов по сложным пространственным траекториям с высокой скоростью.

### Заключение

В докладе представлен метод синтеза легко реализуемых систем аккомодации к дефектам в электроприводах ММ, установленных на МР, основанный на использовании ДН, работающих на основе данных, поступающих от ССТЗ. Новизна метода заключается в том, что диагностирование дефектов осуществляется на основе быстрого комплексирования информации, получаемой от всех датчиков состояния этих устройств, и текущей видеоинформации без традиционного использования громоздких уравнений их динамики. Это значительно упрощает практическую реализацию и эффективность использования создаваемых систем аккомодации одновременно и МР, и ММ.

1. *Kim, T.W. Underwater vehicle manipulators / T.W. Kim, G. Marani, J. Yuh // In: Handbook of Ocean Engineering, Dhanak M.R., Xiros N.I. (Ed.), Springer. – 2016. – P. 407–422.*
2. *Filaretov, V. Development of fault accommodation system for actuators of underwater manipulators / V. Filaretov, A. Zuev, A. Zhirabok, A. Konoplin, A. Procenko, B. Subudhi // Proc. of the 28th DAAAM International Symposium. Zadar, Croatia. – 2017. – P. 14–22.*
3. *Isermann, R. Fault-Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance / R. Isermann. – Berlin: Springer-Verlag, 2003.*
4. *Filaretov, V. Fault Detection of Actuators of Robot Manipulator by Vision System / V. Filaretov, A. Zuev, A. Procenko, S. Melman // Applied Mechanics and Materials. – 2017. – Vol. 865. – P. 457–462.*
5. *Filaretov, V. Development of Fault Identification System for Electric Servo Actuators of Multilink Manipulators Using Logic-Dynamic Approach / V. Filaretov, A. Zuev, A. Zhirabok, A. Protsenko // Journal of Control Science and Engineering. – 2017. – Vol. 2017. – P. 1–8.*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ,  
СОПРОВОЖДАЮЩИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ  
ДВИЖИТЕЛЕЙ ШАГАЮЩИХ РОБОТОВ С ОПОРНОЙ  
ПОВЕРХНОСТЬЮ, И ИХ УЧЁТ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ\***

*Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград,  
dtm@vstu.ru*

### **Введение**

До сих пор практически всегда рассматривается траектория переноса шагающего движителя, предложенная в 70 – 80-е гг. прошлого столетия профессором Н.В. Умновым [1, 2]. Такой вид траектории был обусловлен неразвитостью информационно-измерительных систем роботов и обеспечивал гарантированное безударное взаимодействие стопы шагающего движителя с грунтом. На данном уровне развития систем технического зрения и сканирования поверхности возможно применение других более эффективных режимов переноса движителей.

### **Постановка задачи**

Для шагающих роботов с ортогональными движителями рассмотрена задача вертикального перемещения стопы движителя и ее переноса в новое положение [3] в соответствии с комплексным критерием качества движения.

Рассматривается поступательное, с постоянной скоростью корпуса, движение робота с ортогональными шагающими движителями, например, шагающего робота «Ортоног» [4] (рис. 1,а). Профиль опорной поверхности, характеризуемый расстоянием  $S$  от стопы, вступающей в фазу переноса, до препятствия в форме выступа высотой  $H$ , расстоянием  $L$  до места её постановки на высоте  $h$  от начального уровня (рис. 1,б), считается известным.

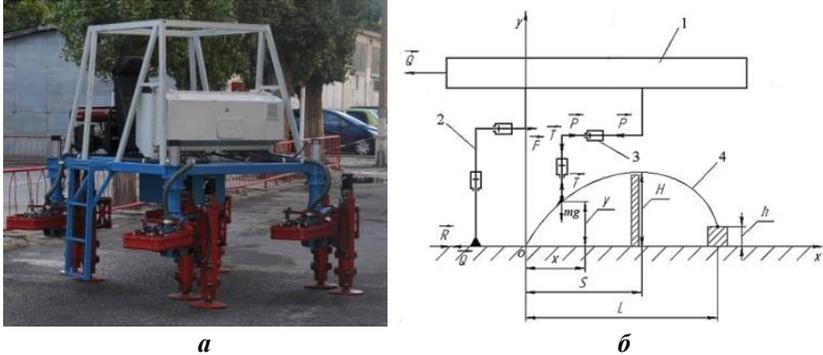
Для решения задачи составляются дифференциальные уравнения движения стопы массы  $m$  в горизонтальном и вертикальном направлении и уравнение, описывающее равномерное поступательное движение корпуса робота:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = P, \\ m\ddot{y} = T - mg, \\ 0 = F - Q - P, \end{cases} \quad (1)$$

---

\* Работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 18-71-10069).

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $Q$  – средняя сила сопротивления движению робота, приходящаяся на один движитель;  $F$ ,  $P$  – силы, развиваемые приводами курсового движения, соответственно, обеспечивающие движение корпуса и горизонтальный перенос стопы в новое положение;  $T$  – сила, развиваемая приводом вертикального перемещения стопы;  $x$ ,  $y$  – соответственно горизонтальная и вертикальная координаты стопы движителя в абсолютном движении.



**Рис. 1. Поступательное движение робота с ортогональными шагающими движителями: а – шагающий робот Ортоног; б – расчётная схема задачи**

Формируется показатель качества – уровень тепловых потерь в приводных двигателях, определяемый выражением

$$A = \alpha \int_0^{\tau} F^2 dt + \alpha \int_0^{\tau} P^2 dt + \beta \int_0^{\tau} T^2 dt, \quad (2)$$

где  $\tau$  – время переноса стопы;  $\alpha$ ,  $\beta$  – известные характеристики двигателей горизонтального и вертикального перемещения соответственно.

Ставится задача определения таких законов движения стопы по горизонтали  $x(t)$  и вертикали  $y(t)$ , которые обеспечат как преодоление препятствий и безударное взаимодействие переносимой стопы с опорной поверхностью, так и минимум тепловых потерь  $A$ .

Метод решения поставленной задачи основан на «разбиении движения» на два этапа с введением управляющих параметров:  $U$  – скорость стопы при прохождении над препятствием и  $\tau_1$  – время прохождения стопы над препятствием.

Полное время шага  $\tau$  в (2) определяется его длиной  $L$  по следовой дорожке и скоростью робота  $V$  и для шагающих роботов с движителями на основе сдвоенных механизмов шагания [4]:

$$\tau = \frac{L}{2V}, \quad (3)$$

а сила сопротивления движению  $Q$  в (1, 2) учитывает физико-механические свойства опорной поверхности из установленной зависимости между жесткостью  $c$  системы грунт-опора движителя [5]

$$Q = \sum_{j=1}^N \frac{P_{j\max}^2}{2cL}, \quad (4)$$

где  $P_{j\max}$  – максимальная нормальная реакция под стопой;  $c$  – нормальная жесткость системы «стопа – опорная поверхность»;  $N$  – количество движителей.

На каждом этапе составляются уравнения Эйлера-Пуассона для вариационной задачи с подынтегральной функцией, следующей из (1)

$$\Phi = \alpha \left[ (m\dot{x} + Q)^2 + (m\ddot{x})^2 \right] + \beta (m\ddot{y} + mg)^2. \quad (5)$$

Анализ аналитического решения и численных результатов показывает, что управляющие воздействия влияют на уровень тепловых потерь, и при их нерациональном выборе последние могут возрастать в несколько раз. Анализ полученных зависимостей показывает, что отличие в координатах стопы может достигать 50 – 60 %, а потери энергии для оптимального режима составляют 27 % от неоптимального режима. Для произвольного режима эти отличия могут быть существенно больше.

1. *Артоболевский, И.И.* Некоторые проблемы создания шагающих машин [Текст] / И.И. Артоболевский, Н.В. Умнов // Вестник АН СССР. – 1969. – № 2. – С. 44.
2. *Гончаров, С.И.* О предельных скоростях движения шагающих машин [Текст] / С.И. Гончаров, Н.В. Умнов // Теория механизмов и машин. – 1988. – № 44. – С. 82.
3. *Брискин, Е.С.* Об управлении адаптацией ортогональных шагающих движителей к опорной поверхности [Текст] / Е.С. Брискин, Я.В. Калинин, А.В. Малолетов и др. // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2017. – № 3. – С. 184–190.
4. *Брискин, Е.С.* Об управлении движением шагающей машины со сдвоенными ортогонально-поворотными движителями [Текст] / Е.С. Брискин, И.П. Вершинина, А.В. Малолетов, Н.Г. Шаронов // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2014. – № 3. – С. 168.
5. *Игнатъев, М.Б.* Алгоритмы управления роботами и манипуляторами. [Текст] / М.Б. Игнатъев, Ф.Н. Кулаков, А.М. Покровский и др. – Ленинград: Машиностроение, 1972.

## **ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В МОДЕЛИРОВАНИИ СЛОЖНЫХ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ\***

*Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орел,  
rusakor@inbox.ru*

Вращения присутствуют в подавляющем большинстве двигательных установок. Опоры являются важнейшими элементами роторных машин, определяющими их надежность и энергоэффективность. Известно четыре основных вида подшипников: подшипники скольжения, подшипники качения, подшипники жидкостного трения, электромагнитные подшипники. В данной работе рассматриваются подшипники жидкостного трения, основным преимуществом которых является полное разделение трущихся поверхностей за счет слоя рабочей среды (рис. 1).

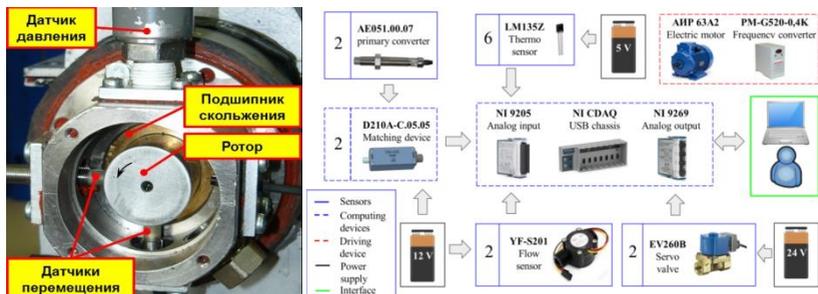
Одним из наиболее перспективных средств стохастического моделирования являются искусственные нейронные сети. С помощью искусственных нейронных сетей решаются задачи аппроксимации, классификации и кластеризации. Все эти типы задач могут быть применены в роторной динамике. Задачи аппроксимации могут быть успешно реализованы для определения силовой реакции смазочного слоя подшипника, предсказания траекторий движения ротора и его динамического состояния [1]. Решение задач классификации и кластеризации применимо для диагностики состояния роторной системы и выявления неполадок. Сравнительно новым классом задач является разработка систем управления на основе обучения с подкреплением и глубоких нейронных сетей [2].

Ниже приводятся результаты решения одной из задач, а именно задачи классификации способов подачи температурно-неоднородного смазочного материала в подшипник жидкостного трения. Решение задачи позволяет определить влияние эффекта температурно-вязкостного клина на характеристики жидкостного трения. Исследовалась роторно-опорная система с гладкими радиальными подшипниками скольжения, смазываемыми водой (рис. 1). Информационно измерительная система включала первичные преобразователи токовихревого типа АЕ051.00.07 для измерения виброперемещений ротора в двух перпендикулярных направлениях и

---

\* Работа подготовлена в рамках выполнения проекта РФ № 16-19-00186 (комплекс вычислительных экспериментов по расчету энергоэффективных траекторий движения роторов и термомеханических характеристик гидродинамических подшипников) и гранта Президента РФ № МК-3394.2019.8 (исследование эффекта температурно-вязкостного клина при жидкостном трении).

датчика КРТ 5-3 для измерения давления подачи смазочного материала. Частота опроса датчиков составила 1 кГц.



**Рис. 1. Мехатронная опора скольжения (слева) и схема информационно-измерительной системы (справа)**

Неоднородная по температуре смазка подшипника осуществлялась посредством специальной насадки зонной подачи смазочного материала из двух гидроаккумуляторов с холодной (22 °С) и горячей (50 °С) жидкостью. Рандомизированный план эксперимента включал 42 опыта для 4 различных положений насадки зонной подачи. В каждом опыте в течение 10 секунд выполнялся разгон ротора до 1700 об/мин с последующим поддержанием скорости. Опыты проводились на одной зарядке гидроаккумуляторов (см. рис. 1).

Входные данные для обучения нейронной сети составлялись из случайных фрагментов результатов измерений виброперемещений ротора и давления жидкости. На выходе нейронной сети определялась принадлежность к одному из четырех классов (4 положения насадки зонной подачи смазочного материала). Использовалась двухслойная сеть прямого распространения с 5 – 15 нейронами и сигмоидальной функцией активации в скрытом слое, а также 4 нейронами и логистической функцией активации типа «softmax» в выходном слое. В табл. 1 представлены результаты серии вычислительных экспериментов по оценке точности нейронной сети. При варьировании одного из параметров сети ( $Q$ ,  $N_{hid}$ ,  $N_{inp}$ ,  $U$ ) остальные параметры фиксировались на среднем уровне. Из результатов видно, что наилучший результат тестирования нейронной сети с точностью предсказания 95,8 % достигнут в случае, когда для обучения использовались одновременно все измеряемые параметры: виброперемещения вдоль двух осей  $X_1$ ,  $X_2$  и давление  $p$ . И наоборот, худшая точность показана при обучении по одному измеряемому параметру  $X_1$ . Количество нейронов в скрытом слое  $N_{hid}$  также существенно влияет на точность, однако возрастает разница ошибок обучения и валидации, что может приводить к явлению переобучения сети.

**Результаты вычислительных экспериментов**

№	Варьируемые параметры ИНС	Значения параметров	Ошибка, %		
			Обуч.	Валид.	Тестир.
1	Количество обучающих выборок, $Q$	3 000	8,2	18,4	16,7
		6 000	7,1	11,3	12,7
		9 000	6,0	11,3	11,3
2	Количество нейронов в скрытом слое, $N_{hid}$	10	12,7	17,9	18,6
		15	7,1	11,3	12,7
		20	1,2	5,4	7,9
3	Количество нейронов во входном слое, $N_{inp}$	$U = [300,1]$	6,5	12,8	15,6
		$U = [900,1]$	7,1	11,3	12,7
		$U = [1500,1]$	6,3	12	11,6
4	Состав матрицы входного слоя	$U = [X_j]$	13	18,6	20,7
		$U = [X_j X_2]$	7,1	11,3	12,7
		$U = [X_j X_2 p]$	1,7	3,8	4,2

В меньшей мере в данных диапазонах значений на точность повлияли количество нейронов во входном слое и количество обучающих выборок.

1. *Kornaev, A.V.* Application of artificial neural networks to calculation of oil film reaction forces and dynamics of rotors on journal bearings / A.V. Kornaev, N.V. Kornaev et al. // International Journal of Rotating Machinery. – 2017. – Vol. 2017. – 11 p.
2. *Goodfellow, I.* Deep Learning / I. Goodfellow, Yo Bengio, A. Courville. – 2016.

*Д.В. Лапин, А.А. Мокаева*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАЗРАБОТАННОГО  
МЕХАНИЗМА ВЕРТИКАЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ  
МОБИЛЬНОГО РОБОТА НА МАГНИТНЫХ  
ГУСЕНИЧНЫХ ДВИЖИТЕЛЯХ**

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет), г. Москва,  
lapindv@bmstu.ru, alisa.mokaeva@bmstu.ru*

**Введение**

В настоящий момент и в ближайшей перспективе обслуживание металлоконструкций из магнитных материалов является актуальной проблемой в различных инженерных отраслях. При этом ключевым направлением к рационализации данного процесса является применение перспективных робототехнических комплексов с возможностью вертикального перемещения. Подобные робототехнические средства используются в таких ответственных операциях, как диагностика нефтяных

цистерн [1], трубопроводов [2], кораблей [3] и прочих магнитных металлоконструкций сложной пространственной конфигурации.

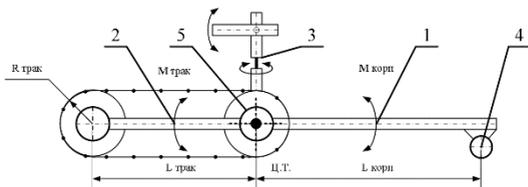
Данное исследование посвящено локомоции вновь разработанного мобильного робота вертикального перемещения на постоянных магнитных движителях, предназначенного для проведения локальных работ на магнитных металлоконструкциях сложной пространственной конфигурации. При этом были решены такие задачи, как анализ перспективных решений в современных мобильных роботах вертикального перемещения на основе магнитной силы, формирование концепции эффективного механизма вертикального перемещения с учетом специальных требований, а также проведение экспериментальных исследований разработанного прототипа.

### **Анализ перспективных решений**

Рассмотрение основных схем построения механизмов вертикального перемещения мобильных роботов для работы с металлоконструкциями на основе магнитной силы дало следующие результаты. Реализуемая в этих схемах динамика базируется как на гусеничных [4], так и на специальных колесных движителях [5]. При этом наибольшее распространение и, как следствие, глубину проработки получили механизмы на колесных движителях с постоянными магнитами [1, 3, 5], обладающими такими преимуществами, как простота конструкции и управления. Однако при этом имеются существенные эксплуатационные недостатки, такие как отсутствие механизма подвески, амортизации и стабилизации, а также малое пятно контакта колесного движителя. На основе данных предпосылок была разработана нижеследующая концепция механизма вертикального перемещения.

### **Концепция механизма вертикального перемещения**

Общая схема разработанного механизма вертикального перемещения представлена на рис. 1.



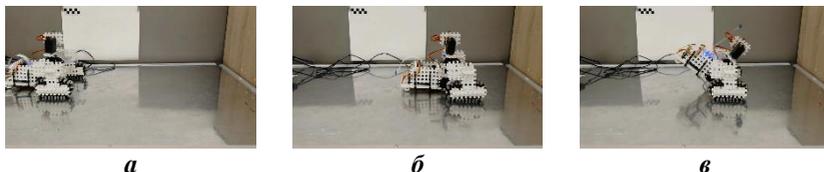
**Рис. 1. Схема устройства механизма вертикального перемещения**

Корпус-хвост (1) с шаровыми опорами (4) закреплен с гусеничными модулями (2) механизмом подвески (5), над механизмом подвески закреплен манипулятор (3). Динамическая схема представлена на рис. 2.

Путем подбора конструкционных параметров, координата центра тяжести перенесена максимально близко к оси крепления гусеничных модулей с корпусом-хвостом, над которой также расположена поворотная платформа, что улучшает балансировку механизма при перемещении по неровным поверхностям, а также позволяет реализовать в дальнейшем механизм дополнительной компенсации реакции от предоставленного манипулятора.

### Экспериментальные исследования

Для проведения экспериментальных исследований был реализован прототип, полноценно реализующий полный спектр закладываемых функциональных решений [6]. Внешний вид механизма вертикального перемещения представлен на рис. 3.



**Рис. 2. Прототип механизма вертикального перемещения**

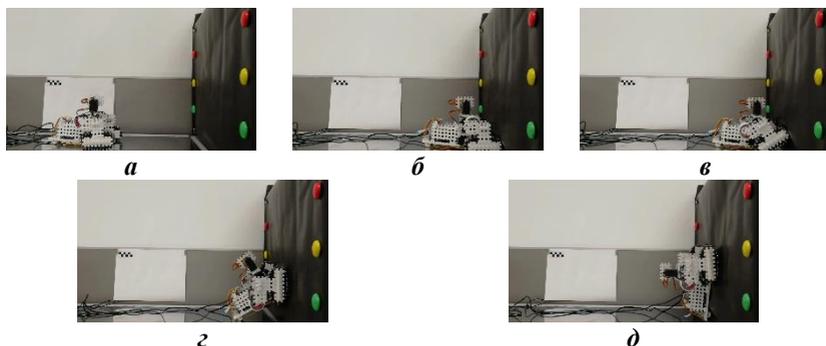
При этом особенность взаимного положения гусеничных движителей и корпуса-хвоста при перемещении вперед при крейсерской скорости (рис. 2,а), форсажной скорости (рис. 2,б) и перемещении назад (рис. 2,в) отличается в силу нелинейной составляющей функционирования механизма подвески. Основные технические механизмы разработанного прототипа представлены в табл. 1.

*Таблица 1*

**Технические характеристики разработанного прототипа**

Характеристика	Величина	Размерность
Масса	0,8	кг
Длина	215	мм
Высота	150	мм
Ширина	200	мм
Грузоподъемность	~2	кг
Скорость крейсерская	0,2	м/с
Скорость форсажа	0,5	м/с

На рис. 3 показаны фазы действия заложенного в конструкцию кинематического шаблона при преодолении вертикального препятствия.



***Рис. 3. Фазы функционирования механизма вертикального перемещения***

В ходе преодоления вертикального препятствия гусеничные модули начинают движение на горизонтальной поверхности (рис. 3,а), фиксируемой управляемым электромагнитом. При подходе к препятствию, благодаря полусвободному вращению, гусеничные модули прижимаются к вертикальной поверхности (рис. 3,б), усилие прижатия к стене создается за счет механизма подвески, работающей за счет магнитного нелинейного взаимодействия гусеничных трактов, усилие которого приведено к оси крепления гусеничных модулей с силовыми приводами и корпусом (рис. 3,в). При дальнейшем движении по стене активный корпус-хвост создает момент (рис. 3,г) для дополнительного прижимающего усилия передней части гусеничных модулей за счет того же механизма подвески. При полном переходе на вертикальную поверхность (рис. 3,г) корпус-хвост создает дополнительную опору, работающую в качестве механизма дополнительной компенсации усилия при применении установленного манипулятора.

### **Заключение**

Разработанная кинематическая схема позволила реализовать относительно простую и эффективную конструкцию механизма вертикального перемещения. Полученные результаты имеют существенное значение в рамках дисциплины проектирования мобильных робототехнических комплексов вертикального перемещения.

Следующим этапом исследования является разработка методики идентификации нелинейного механизма подвески за счет подходов виртуального и натурного моделирования. Данное решение позволит в перспективе получить проектные методы формирования аналогичных механизмов в различных масштабах.

1. *Shen, W.* Proposed wall climbing robot with permanent magnetic tracks for inspecting oil tanks [Электронный ресурс] / W. Shen, Gu J., Shen Y. // IEEE International Conference Mechatronics and Automation. – IEEE, 2005. – Т. 4. – С. 2072–2077.
2. *Tâche, F.* Adapted magnetic wheel unit for compact robots inspecting complex shaped pipe structures [Электронный ресурс] / Tâche, F., Fischer, W., Moser, R., Mondada, F., & Siegwart, R. // 2007 IEEE/ASME international conference on advanced intelligent mechatronics. – IEEE, 2007. – С. 1–6.
3. *Tavakoli, M.* OmniClimbers: Omni-directional magnetic wheeled climbing robots for inspection of ferromagnetic structures [Текст] / M. Tavakoli, C. Viegas, L. Marques, J. N. Pires, J. N., A. T. De Almeida // Robotics and Autonomous Systems. – 2013. – Т. 61. – №. 9. – С. 997–1007.
4. *Fondahl, K.* A magnetic climbing robot for marine inspection services [Электронный ресурс] / K. Fondahl, M. Eich, J. Wollenberg, F. Kirchner // Proceedings of the 11th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries. – Technische University at Hamburg-Harbur, 2012. – С. 92–102.
5. *Zhang, Y.* Design and optimization of magnetic wheel for wall and ceiling climbing robot [Электронный ресурс] / Y. Zhang, T. Dodd, K. Atallah, I. Lyne // 2010 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. – IEEE, 2010. – С. 1393–1398.
6. *Аверьянов, Е.В.* Основные аспекты создания отечественных технологических мобильных роботов вертикального перемещения [Текст] / Е.В. Аверьянов, Б.Б. Коваленко, А.В. Костин, Е.И. Пелепас, Ю.В. Подураев, С.Ф. Яковлев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. – №. 8. – С. 23–27.

***В.С. Мельканович***

**УПРАВЛЕНИЕ АДАПТИВНЫМ ПОДАВЛЕНИЕМ  
ИМПУЛЬСНЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ПОМЕХ  
В УСЛОВИЯХ АПРИОРНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ  
ИХ ПАРАМЕТРОВ\***

*АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», г. Санкт-Петербург,  
vmelkanovich@mail.ru*

Эффективность решения задач управления подводным роботом непосредственно зависит от стабильности работы его гидроакустического канала, обеспечивающего функционирование средств связи, позиционирования и освещения подводной обстановки.

Гидроакустические средства являются основными средствами, обеспечивающими систему управления АНПА информацией об окружающей обстановке, необходимой для решения задач безопасности плавания и выполнения задач функционального назначения. Для гидроакустической подсистемы АНПА характерен интенсивный обмен информацией по гидроакустическому каналу связи, а также периодическое

---

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты № 17-08-00666, № 19-08-00253.

излучение активных сигналов для позиционирования в пространстве, поиска объектов и выявления угроз.

Гидроакустическими помехами, особо значимыми для АНПА, помимо традиционных шумов судоходства, являются узкополосные и широкополосные импульсные сигналы, источниками которых являются сигналы гидроакустической связи и гидролокаторов других АНПА, сигналы, излучаемые техногенными сооружениями и гидробионтами.

Задача приема гидроакустических сигналов на фоне импульсных помех традиционно решалась с применением жесткого ограничения уровня сигналов на приемных гидрофонах [1]. Однако такой подход неэффективен в условиях множественных помех высокой мощности.

Более перспективным является хорошо известный [2] подход, основанный на когерентной компенсации помех. Он состоит в формировании приемного канала, ориентированного на источники помех, и вычитании принятых им сигналов помех из сигнала "осветляемого" канала с весами, значения которых формируются обучением из соображений максимизации выбранного критерия.

Однако, применительно к АНПА, при реализации такого подхода возникают следующие сложности:

- необходимость наведения каналов на источники помех для каждой выборки данных, представляющей собой совокупность комплексных спектральных отсчетов сигналов гидрофонов антенны по выходу нескольких последовательных интервалов БПФ на интервале времени, составляющем доли секунды;
- необходимость реализации обучения и подавления помех применительно только к тем элементам выборки по времени и частоте, которые характеризуются наличием сигнала помехи;
- необходимость обеспечить приём сигналов как от слабых источников, так и от подавляемых источников помех.

Указанные проблемы в значительной степени являются проблемами управления компенсацией помех. Традиционно в гидроакустических приложениях задача управления компенсацией помех возлагается на оператора.

**Целью настоящей работы** является поиск путей применения методов когерентной компенсации локальных помех к задаче автоматического подавления множественных импульсных локальных помех.

**Предлагается подход**, базирующийся на выделении следующих этапов обработки сигналов.

1. На первом этапе совокупность данных по выходу антенной решетки разбивается на адаптивные выборки, каждая из которых составлена из комплексных спектральных отсчетов сигналов всех гидрофонов на смежных интервалах частот и интервалах спектрального анализа. На последующих этапах обработка выполняется независимо для каждой из выборок.

2. В качестве весовых векторов при формировании помеховых каналов на каждой из выборок используются значения старших собственных векторов матрицы корреляции сигналов неадаптивных приемных каналов, формируемых в системе обзора по данным выборки. Оценка матрицы осуществляется с осреднением по частотным и временным реализациям выборки. Данное решение отработано применительно к задачам подавления стационарных помех [3, 4].

3. Локализация и учет амплитудного распределения сигналов помех по элементам выборки (т.е. по номерам частотных и временных отсчетов, составляющих выборку) осуществляется на основе анализа подпространства старших собственных векторов матрицы корреляции элементов выборки по времени и частоте [5]. Оценка таких матриц осуществляется с осреднением по всем приемным каналам в секторе обзора.

4. С целью сохранения информации о всей совокупности сигналов, включая и помеховые, процедура когерентной компенсации реализуется как процедура ограничения мощности помех в каждом элементе каждой выборки по уровню, заданному относительно уровня распределенной помехи.

5. В особо сложных ситуациях после локализации сигналов помех по времени может быть реализована рекурсивная каскадная схема обработки сигналов, обеспечивающая выполнение второго этапа процедуры с формированием матриц по индивидуальным для отдельных импульсов помехи частотно-временным сегментам выборки.

**В результате применения предложенного подхода** решена задача автоматического управления компенсацией импульсных локальных помех в индивидуальных частотно-временных сегментах для каждого импульса каждой из помех. В результате обеспечивается повышение устойчивости функционирования всей номенклатуры подсистем гидроакустических средств, прежде всего - систем гидролокации, позиционирования и связи подводных роботов.

1. *Ильичев, В.И.* Статистическая теория обнаружения гидроакустических сигналов [Текст] / В.И. Ильичев, А.Я. Калюжный, Л.Г. Красный, В.Ю. Лаптий. – Москва: Наука, 1992.
2. *Малышкин, Г.С.* Оптимальные и адаптивные методы обработки гидроакустических сигналов [Текст] / Г.С. Малышкин // Адаптивные методы. Т. 2. – Санкт-Петербург: Электроприбор, 2011.
3. *Ратынский, М.В.* Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках [Текст] / М.В. Ратынский. – Москва: Радио и связь, 2004.
4. *Мельканович, В.С.* Адаптивный алгоритм ограничения мощности локальных помех по выходу каналов обзора шумопеленгатора [Текст] / В.С. Мельканович // Управление в морских и аэрокосмических системах (УМАС-2018): труды российской научно-практической конференции. – 2008.
5. *Мельканович, В.С.* Особенности адаптивной обработки сигналов в гидроакустических средствах АНПА [Текст] / В.С. Мельканович // Перспективные системы и задачи управления (ПСИЗУ-2019): труды 14-й Всероссийскую научно-практической конференции. – 2019.

## МЕХАТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА РОТОРНЫХ МАШИН\*

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орел,  
savin@ostu.ru

Различные виды роторных агрегатов с электрическим или турбинным приводом, включая двигатели, насосы, детандеры, холодильники, компрессоры и т.д., применяются практически во всех транспортных и технологических системах. Прорывные технические решения в элементах приводных систем, силовой электронике, микропроцессорных и сенсорных устройствах привели к появлению качественно нового этапа в разработке умных роторных машин, интегрирующих функции автоматизированной диагностики и компьютерного управления движением исполнительных органов. Цель данной публикации заключается в выявлении общей тенденции развития и рассмотрении взаимодействия отдельных частей роторных машин как единой мехатронной системы (рис. 1).

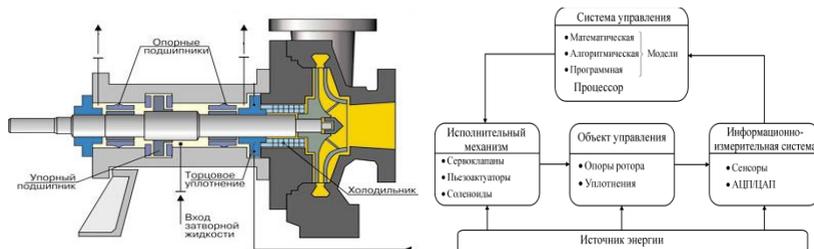


Рис. 1. Роторный агрегат и структура мехатронной системы

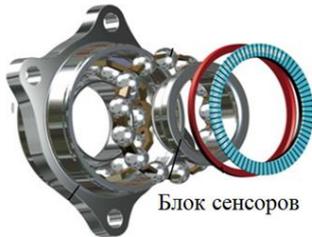
Можно выделить три базовых уровня интеллектуализации роторных машин. В первую очередь, речь идет о механических, гидравлических, пневматических и других устройствах, оснащенных сенсорными элементами контроля рабочих параметров, т.е. об автоматизированной диагностике как наиболее изученной категории умных машинных технологий. Более продвинутый вариант предполагает использование обратной информационной связи совместно с исполнительными механизмами и микроконтроллерами, воспроизводящими функции автоматизации и программного управления. Третий уровень связан с компьютерным управлением на основе сложных математических моделей и методов искусственного интеллекта, обеспечивающим способность осуществлять самодиагностику и адаптироваться к неопределенности внешней

\* Доклад подготовлен в рамках выполнения проекта РНФ № 16-19 00186 и проекта государственного задания № 9.252.2017.

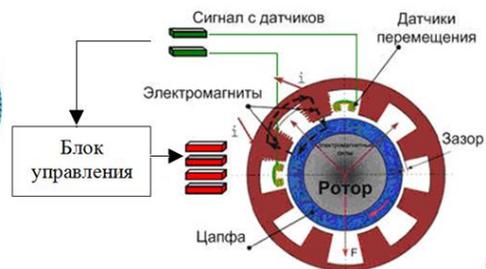
среды. Иными словами, речь идет о переходе от автоматизированного к интеллектуальному способу управления характеристиками роторной системы [1]. В машинных агрегатах эти функции могут быть реализованы посредством мехатронных устройств, включающих объекты управления, информационно-измерительные модули с сенсорными компонентами и преобразователями, источники энергии и системы управления. В качестве управляемых объектов выступают опоры роторов, уплотнительные и демпферные узлы.

Создание роторных машин новых поколений формирует комплекс новых требований к подшипниковым узлам, в числе которых можно прежде всего назвать: обеспечение сверхвысоких скоростей вращения ротора с минимальными энергозатратами и максимальными показателями устойчивости; возможность получения прецизионных движений ротора с целью реализации новых перспективных микро- и нанотехнологий; реализацию интеллектуального поведения роторной системы в условиях неопределенности внешней среды, в частности, при возникновении автоколебательных режимов, параметрических и хаотических колебаний. Потенциально возможно создание мехатронных опор роторов с активным управлением на базе подшипников с различными видами трения. В настоящее время находят применение мехатронные подшипниковые узлы (рис. 2) Active Sensor Bearing (ASB), содержащие интегрированные блоки с датчиками контроля угловых положений, температуры, вибраций, скорости и направления вращения. Все большее распространение также получают активные магнитные подшипники [2], представляющие собой мехатронные устройства, в которых стабилизация положения ротора осуществляется магнитными силами, а ток в электромагнитах регулируется системой автоматического управления по сигналам датчиков перемещений.

*Подшипник качения*



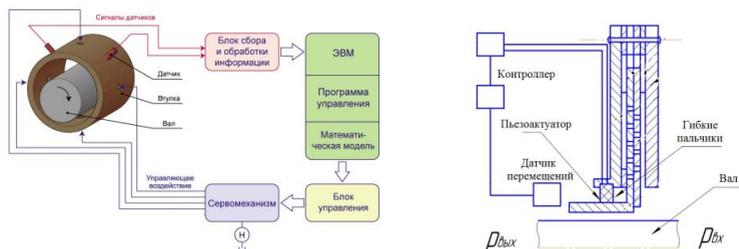
*Активный магнитный подшипник*



**Рис. 2. Мехатронные подшипники**

Потенциально перспективным вариантом опор высокоскоростных и тяжелых роторов являются гидростатодинамические подшипники (ГСДП) и уплотнения с активным управлением динамическими и энергетическими характеристиками (рис. 3), в которых изменение эксплуатационных показателей, в частности, траекторий движения роторов, амплитудно-частотных

характеристик и потерь мощности, может обеспечиваться управлением величиной и направлением гидродинамической реакции смазочного слоя с помощью сервоклапанов, пьезоактуаторов, соленоидов и других видов исполнительных механизмов в составе единой мехатронной системы.



**Рис. 3. Радиальный ГСДП и пальчиковое уплотнение с активным управлением**

В настоящее время в развитых странах мира активно проводятся поисковые и прикладные исследования в области создания роторных машин с интеллектуальными мехатронными опорами. Исследования и создание опор жидкостного трения с активным управлением движением роторов осуществляется на кафедре мехатроники, механики и робототехники ОГУ им. И.С. Тургенева в рамках формирования нового направления науки и техники – трибомехатроники, представляющей собой область науки и техники, основанную на конвергенции мехатроники и триботехники.

1. Maslen, E.H. Smart machine advances in rotating machinery / E.H. Maslen // 9th International Conference on Vibrations in Rotating Machinery, IMechE 2008. – P. 3–14.
2. Савин, Л.А. Активные магнитные подшипники: принципы функционирования и моделирования [Текст] / Л.А. Савин, О.В. Соломин // Механизация, автоматизация, управление. – 2009. – № 2. – С. 33–37.

**И.А. Селин**

## **ОЦЕНИВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СТРАТЕГИИ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ДЛЯ СОЛНЦЕМОБИЛЯ**

*Санкт-Петербургский политехнический университет  
Петра Великого, г. Санкт-Петербург,  
ivanselin93@gmail.com*

### **Введение**

Гонки солнцемобилей становятся всё более и более популярными среди университетских команд всего мира из-за своей технической сложности и благоприятности к окружающей среде [1 – 5]. Самыми по-

пулярными соревнованиями такого рода являются World Solar Challenge (BWSC), American Solar Challenge (ASC) и South African Solar Challenge (SSC). Эти гонки характеризуются очень длинной дистанцией, которую команды должны преодолеть максимально быстро. Длина маршрута соревнования различается в разных гонках, но порядок расстояний всегда один и тот же – тысячи километров гоночной дистанции.

В таких условиях правильное использование энергии критически важно. Команды-участники с целью уменьшения времени прохождения трассы разрабатывают стратегии энергосбережения. Из-за большой длины дистанции задача характеризуется большим количеством входных параметров и её решение не является тривиальным, особенно с учётом возможности зарядки аккумулятора транспортного средства.

### Основная часть

Для возможности построения оптимальной стратегии энергосбережения необходимо реализовать следующие.

1. Математическую модель солнцемобиля.
2. Симуляцию движения солнцемобиля по трассе.
3. Подбор оптимальных параметров движения для каждого участка маршрута.

Математическая модель транспортного средства основана на идее энергетического баланса из прихода и расхода энергии [4, 6, 7].

$$E = E^{(+)} - E^{(-)}.$$

Энергия накапливается в аккумуляторе, но есть физические ограничения, которые необходимо учитывать:

$$\begin{aligned} E_i &= E_{i-1} + E_i^{(+)} - E_i^{(-)}, \quad 1 < i < n; \\ E_0 &= E^{battery\ start}; \\ 0 &< E_i < E^{battery}. \end{aligned}$$

Старт гонки происходит с полной ёмкостью аккумулятора, в любой момент времени количество энергии в аккумуляторе не может быть меньше нуля и не может быть больше максимальной ёмкости.

Составляющая расхода энергии вычисляется из трёх главных сил, противодействующих движению транспортного средства: силы лобового сопротивления воздуха ( $D$ ), силы тяжести ( $W_x$ ) и силы трения  $R$ .

$$T = D + W_x + R.$$

При достаточной длине участков маршрута, движение на каждом из них можно считать равномерным.

Количество энергии, затрачиваемое на преодоление определённого участка, рассчитывается как

$$A_T = \frac{T}{\eta} \cdot \Delta s_i,$$

где  $\eta$  – показатель эффективности двигателя солнцемобиля;  $\Delta s_i$  – длина  $i$ -го участка маршрута.

Также к затратам энергии можно отнести операционные потери на функционирование системы

$$A_{Op} = \frac{P\Delta s_i}{V},$$

где  $P$  – мощность бортового оборудования;  $V$  – скорость транспортного средства.

Общее количество энергии, необходимое для преодоления участка маршрута, можно записать как

$$A = A_T + A_{Op} = \frac{T}{\eta} \cdot \Delta s_i + \frac{P\Delta s_i}{V} = \frac{D + W_x + R}{\eta} \cdot \Delta s_i + \frac{P\Delta s_i}{V}.$$

Рассматривая отдельные составляющие потерь энергии, сила лобового сопротивления воздуха зависит от скорости транспортного средства ( $V$ ), атмосферной плотности воздуха, выраженной через окружающие метеоусловия (температуру воздуха ( $T$ ), атмосферное давление ( $p$ ) и газовую константу  $R_A$ ), и от аэродинамических характеристик транспортного средства: его лобовой площади ( $S_{front}$ ) и коэффициента лобового сопротивления ( $C_D$ ), будет равна

$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 S_{front} c_D = \frac{p}{R_A T} \frac{1}{2} V^2 S_{front} c_D.$$

Сила тяжести зависит от угла наклона текущей части маршрута и выражается как

$$W_x = mg \sin \alpha.$$

Сила трения вычисляется через 2 коэффициента ( $\mu_1$  и  $\mu_2$ ), последний из которых умножается на скорость движения транспортного средства, массу транспортного средства и  $\cos$  угла наклона участка маршрута:

$$R = mg \mu \cos \alpha = mg(\mu_1 + \mu_2 V) \cos \alpha.$$

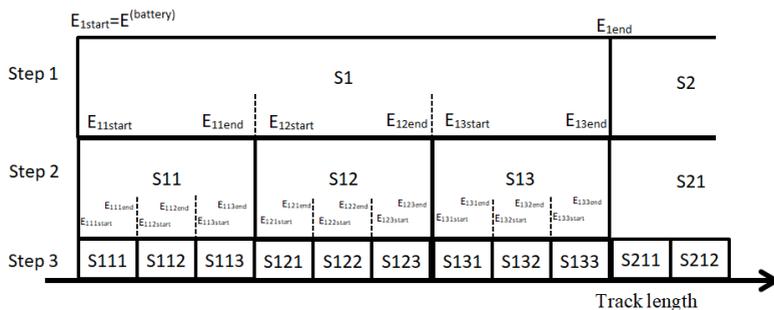
Пополнение же энергии в случае солнцемобиля может быть вычислено несколькими способами. Среди них фигурирует модельный способ, высчитывающий солнечную радиацию для определённой точки пространства и времени [8], статистический метод, усредняющий данные по солнечной радиации за уже прошедший промежуток времени, и использование данных прогноза погоды. При использовании любого из вышеперечисленных способов общее количество полученной энергии вычисляется, интегрируя значения солнечной радиации по времени.

Результаты моделирования расхода и пополнения энергии возможно совместить друг с другом, так как изначально известны данные по маршруту, а время в каждой точке возможно вычислить благодаря тому, что входными параметрами модели являются скорости на каждом участке трассы.

После реализации моделирования движения по трассе возможно перейти к оптимизации. Оптимизационная задача ставится следующим образом (с учётом штрафующей функции):

$$f_{time_{constr}}(s_1, s_2, s_3, \dots) = f_{time}(s_1, s_2, s_3, \dots) + k * |\min(f_{energy}(s_1, s_2, s_3, \dots))|$$

Количество входных параметров всё ещё слишком велико для решения проблемы за удовлетворительное время. Предлагается использовать иерархический подход, заключающийся в решении большого количества подзадач с меньшим количеством входных параметров, распространяемых на подгруппы участков (рис. 1).



**Рис. 1. Иерархическая оптимизация**

### Заключение

Создана математическая модель солнцемобиля. Произведено моделирование движения солнцемобиля по трассе соревнования. Предложен подход к оптимизации задач с большим количеством входных параметров, значительно сокращающий время решения проблемы.

1. *Lukyanchenko, A.K.* Using of solar energy for energy efficiency of urban transport / A.K. Lukyanchenko // Aspirant. – 2015. – Iss. 6–1. – P. 63–65.
2. *Jailaubekov, Y.A.* Application of solar panels in transportation / Y.A. Jailaubekov // The Bulletin of KazATC. – 2016. – Iss. 1 (96). – P. 36–40.
3. *Kronthaler, L.* Vehicle-integrated Photovoltaic (ViPV) systems: Energy production, Diesel Equivalent, Payback Time; an assessment screening for trucks and busses / L. Kronthaler et al. // Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), 2014 Ninth International Conference on. – IEEE, 2014. – P. 1–8.
4. *Thacher, E. F.* A Solar Car Primer: A Guide to the Design and Construction of Solar-powered Racing Vehicles / E. F. Thacher. – Springer, 2015.
5. *Nader, N. A.* Designing, Building of Solar Race Car for the World Solar Challenge (Phase I) / N. A. Nader, M. Ghoneim, R. S. Alsayed // Universal Journal of Mechanical Engineering. – 2015. – T. 3, №. 4. – P. 122–130.
6. *Pudney, P.* Optimal energy management for solar-powered cars / P. Pudney // PhD Thesis. University of South Australia. August 2000.
7. *Mocking, C.* Optimal design and strategy fro the SoUTra / C. Mocking // MScreport. University of Twente, January, 2006.
8. *An Introduction to Environmental Biophysics / G.S. Campbell, J.M. Norman:* 2nd edition, 1998.

*С.М. Соколов, А.А. Богуславский, В.С. Смолин, А.В. Агеев*

## **НЕЙРОСЕТЕВОЙ РЕГУЛЯТОР В СОСТАВЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СФЕРИЧЕСКОГО ПРИВОДА\***

*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва,  
sokolsm@list.ru, anbg74@mail.ru, smolin@keldysh.ru,  
aleksei147147@yandex.ru*

### **Постановка задачи**

В составе модулей СТЗ со структурированным подсветом сферические приводы прямого управления (СППУ) обеспечивают избирательный сбор 3-мерных данных, что на несколько порядков снижает требования к бортовым вычислительным ресурсам по сравнению с «облаками» трёхмерных точек, предоставляемыми лидарами, которые, к тому же, на несколько порядков дороже СППУ. Относительная простота и дешевизна таких приводов для достижения необходимых точностей позиционирования требует построения специализированных алгоритмов управления. Одним из путей решения задач алгоритмического обеспечения систем управления СППУ является использование традиционных подходов на основе построения ПИД регуляторов для отдельных режимов работы СППУ [1]. Есть и другое направление – в совершенствовании алгоритмического обеспечения СУ СППУ. Достижения последних лет в создании нейросетевых моделей и их компьютерных реализаций позволяют оптимистично рассматривать возможность учёта нелинейных характеристик объекта управления и неточности в определении текущего положения объекта управления за счёт введения в контур управления СППУ обучаемого сетевого регулятора. Исследованию возможностей использования этого направления и посвящена наша работа.

### **Нейросетевой подход в системе управления СППУ**

Вместо построения закона управления на основе описания свойств управляемого объекта (которое затруднено проблемой неточных данных) предлагается экспериментально выявлять законы соответствия между различными управляющими воздействиями и изменениями состояний объекта. Если объект характеризуется вектором измеряемых параметров  $x$ , а управляющее воздействие  $u$  приводит к изменению  $x$  на векторную величину  $\Delta x$ , то подавая в различных состояниях  $x$  случайные управляющие воздействия  $u$  можно получить экспериментальное описание зависимости  $u = f(x, \Delta x)$  большим масси-

---

\* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантом РФФИ №19-07-01113.

вом соответствий  $\{x_i, y_i, \Delta x_i\}$ . Этот массив соответствий может быть использован для обучения нейросети аппроксимации преобразования  $y = f(x, \Delta x)$ . После обучения нейросетевая аппроксимация позволит получать значения управляющего воздействия не только в проверенных точках  $\{x_i, \Delta x_i\}$ , но и в произвольных точках  $\{x, \Delta x\}$  из области их существования. Такой подход обеспечивает учёт плохо поддающихся непосредственному измерению свойств и строит закон управления без построения математической модели управляемого объекта. Подход выглядит универсальным, но применимость его ограничена объектами и управляющими воздействиями, описываемыми небольшим числом параметров. Выбранный объект управления – СППУ – удовлетворяет этим условиям: хотя физическую модель СППУ нельзя назвать простой, состояние СППУ описывается двумя углами и их производными, а управляющее воздействие – двумя параметрами – ШИМами, подаваемыми на скрещенные пары катушек.

Другим преимуществом нейросетевого подхода к построению закона управления на основе экспериментальных данных является устранение отрицательного влияния задержки в контуре обратной связи при штатном протекании процесса управления. По состоянию объекта  $x$  и задачи изменения состояния  $\Delta x$  нейросеть строит аппроксимацию управляющего воздействия  $u$ . Конечно, полностью устранить влияние задержки обратной связи нельзя. Если контроль протекания процесса управления выявляет его отклонения от штатного, то выбор нового закона управления, компенсирующего выявленное отклонение, будет проходить с задержкой. Но возможность управления без задержки, на основе предсказания результатов, хотя бы только при штатном режиме работы системы позволяет строить более эффективные законы управления.

### **Экспериментальное исследование нейросетевого регулятора в составе СУ СППУ**

Применительно к использованию нейросетевых структур в составе СУ мобильных устройств одним из ограничивающих условий является требование реализации на ограниченных бортовых вычислительных мощностях. Это обстоятельство ставит задачу исследования наиболее эффективной компоновки нейросети. При одинаковых преобразованиях в узлах сети варьируемыми параметрами являются количество слоёв и элементов в слое. Реально существующие экземпляры СППУ по ряду технических причин не позволяют организовать обмен данными между бортовым микроконтроллером и универсальным компьютером с необходимой частотой для исследования влияния параметров нейросети на качество управляющих

сигналов. Поэтому была построена математическая модель СППУ, опирающаяся на результаты работ [1, 2]. На этой модели и выполнялись эксперименты по поиску оптимальной структуры нейросети.

При поиске оптимальной структуры были рассмотрены различные модели нейронной сети, функции нелинейной активации и оптимизаторы, которые описаны в работе [3]. В качестве критериев качества управления, формируемого нейросетью, принимались ошибки в отклонении СППУ от заданного положения и от нулевой скорости в этом положении. По выбранному критерию и результатам экспериментов оптимальной признана модель с 5 слоями и 32 элементами в слое. Количественные результаты экспериментов с предложенными нейросетевыми регуляторами на модели СППУ показывают возможность достижения точности управления в 2 – 4 угловых минуты по положению и 2 – 3 угловых градуса в секунду по скорости. Такое качество управления превосходит качество, полученное в экспериментах с традиционной СУ на ПИД регуляторе и показывает перспективность выбранного направления исследований.

### **Заключение**

На основе экспериментов на компьютерной модели сферического привода прямого управления с различными нейросетевыми структурами получены результаты, показывающие возможность успешного применения нейросетевого регулятора в составе системы управления сферическим приводом прямого управления.

В процессе исследований определена оптимальная структура нейрорегулятора по количеству слоёв и элементов в слоях при обеспечении высокого качества управления. Эта оптимизация позволяет реализовать возможность применения нейросетевого регулятора по такой схеме: одна часть обучение и формирование весовых коэффициентов – на универсальном компьютере верхнего уровня управления и вторая часть – исполнительная на микроконтроллере в составе СППУ.

Следующим этапом описываемых исследований является перенос экспериментов с математической моделью СППУ к экспериментам с действующим образцом и реализация нейросетевого регулятора по предложенной схеме.

1. *Соколов, С.М.* Система управления сферическим приводом прямого управления с датчиками Холла в контуре обратной связи [Текст] / С.М. Соколов, О.В. Трифонов, В.С. Ярошевский // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2008. – № 94. – 20 с.
2. *Николенко, С.* Глубокое обучение [Текст] / С. Николенко, А. Кадури, Е. Архангельская. – Санкт-Петербург: Питер, 2018. – 480 с.
3. *Тамм, И.Е.* Основы теории электричества [Текст]: учебное пособие для вузов / И.Е. Тамм. – 11 изд., испр. и доп. – Москва: Физматлит, 2003. – 616 с.

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ  
И ИДЕНТИФИКАЦИИ ДЕФЕКТОВ  
В НАВИГАЦИОННЫХ ДАТЧИКАХ АВТОНОМНЫХ  
НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ\***

*Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН,  
Институт проблем морских технологий ДВО РАН,  
Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток,  
Университет Иннополис, г. Иннополис,  
filaret@iacp.dvo.ru, zuev@marine.febras.ru, zhirabok@mail.ru*

**Введение**

Автономные обитаемые подводные аппараты (АНПА) являются самым эффективным инструментом исследования и освоения Мирового океана [1]. Важными компонентами АНПА, от которых зависит их способность выполнять поставленные задачи, являются навигационные датчики (НД), показания которых используются для формирования и отработки траекторий движения аппаратов. Отказ или сбой в работе любого датчика приводит к ошибкам в выполнении миссий или даже к потере дорогостоящего робота. Поэтому задача своевременного обнаружения дефектов в НД АНПА является весьма актуальной.

В настоящее время известно несколько подходов к решению задач диагностирования подводных роботов [2, 3], которые основаны на использовании диагностических наблюдателей. Эти наблюдатели строятся на основе сложных нелинейных динамических моделей АНПА, имеющих неопределенные и существенно переменные параметры, что приводит к появлению отличных от нуля невязок даже при отсутствии дефектов. Для устранения этого недостатка применяются различные методы робастного диагностирования. Однако большой проблемой, препятствующей практическому применению многих известных методов, остается высокая сложность их практической реализации применительно к АНПА.

**Разработка системы диагностирования и идентификации  
дефектов в НД АНПА**

В докладе для решения задачи синтеза диагностических наблюдателей (в отличие от известных подходов) предложено использовать только кинематические модели АНПА, которые не содержат переменных или неопределенных коэффициентов, но при этом позволяют свя-

---

\* Работа поддержана грантом Президента РФ (МК-1987.2018.8), а также грантами РФФИ (16-29-04195, 19-08-00347).

зать все параметры их движения и переменные, измеряемые НД. Достоинством такого метода является простота реализации и высокая точность компенсации выявляемых дефектов в условиях неопределенности и существенной переменности параметров окружающей среды.

При этом важной задачей является не только определение факта возникновения дефекта и локализация неисправного датчика, но и определение величины дефекта, которая должна использоваться системой управления АНПА при коррекции программных сигналов.

Предложенный метод синтеза системы диагностирования и идентификации дефектов в НД АНПА содержит два основных этапа. На первом – с использованием уравнений кинематики АНПА и специального комплексирования данных, получаемых от его НД, решается задача обнаружения и локализации возникающих дефектов. Для этого используется специальный банк наблюдателей, который синтезируется на основе уравнений кинематики аппарата и моделирует в реальном масштабе времени показания датчиков, измеряющих его положение, ориентацию и скорость движения [4]. Для выявления неисправного датчика с учетом введенного банка наблюдателей определяются соотношения между величинами полученных невязок и дефектами, возникающими в сигналах, поступающих от конкретных датчиков. Эти соотношения задаются с помощью специальной матрицы синдромов. Как показали проведенные исследования, не всегда полученная матрица дефектов позволяет однозначно определить сигнал, в каком конкретно датчике содержится дефект. Для устранения этого недостатка производится модификация используемого банка путем добавления в его состав дополнительных наблюдателей, невязка которых не зависит от неопределяемых дефектов. В результате удалось однозначно определить наличие дефектов в каждом из диагностируемых НД АНПА на основе комплексирования и анализа получаемых от них сигналов.

После обнаружения и локализации дефектов на втором этапе синтеза необходимо в реальном масштабе времени точно оценить их величину. При этом величины некоторых дефектов можно определить сразу путем интегрирования сигналов невязки, получаемых от соответствующих НД. Для определения величин дефектов по сигналам, выдаваемым остальными датчиками АНПА, предложено вводить новые наблюдатели, содержащие обратные связи по сигналам невязки и специальную фильтрацию возможных помех [4].

Для проверки работоспособности и эффективности разработанной системы диагностирования и идентификации дефектов было проведено численное моделирование, в процессе которого использовалась хорошо апробированная и верифицированная модель реального АНПА МАРК [5]. Возникновение дефектов имитировалось изменением величин сиг-

налов, поступающих от доплеровского лага и датчика угловых скоростей движения аппарата.

Результаты выполенного моделирования показали несомненные преимущества предложенного метода и разработанной на его основе системы диагностирования и идентификации дефектов, возникающих в НД АНПА, в том числе и при их движении по сложным пространственным траекториям с высокой скоростью. Использование разработанной системы позволит существенно повысить надежность этих АНПА, а также увеличить вероятность точного выполнения заданий и миссий при наличии существенных неисправностей.

### Заключение

В докладе рассмотрен метод синтеза системы диагностирования и идентификации дефектов в НД АНПА. Преимущество этого метода заключается в том, что он позволяет обеспечивать обнаружение и оценку величин ошибочных показаний в НД без использования громоздких нелинейных уравнений динамики АНПА, содержащих переменные и неопределенные параметры. Результаты математического моделирования подтвердили работоспособность и высокую эффективность синтезированной системы.

1. *Инзарцев, А.В.* Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение [Текст] / А.В. Инзарцев, Л.В. Киселев, В.В. Костенко, Ю.В. Матвиенко, А.М. Павин, А.Ф. Щербатюк. – Владивосток: Издательство ИПМТ ДВО РАН, 2018. – 368 с.
2. *Antonelli, G.* Fault diagnosis for AUVs using support vector machines / G. Antonelli, F. Caccavale, C. Sansone, L. Villani // Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 2004. – Vol. 5. – P. 4486 – 4491.
3. *Alessandri, A.* A Model-Based Approach to Fault Diagnosis in Unmanned Underwater Vehicles / A. Alessandri, M. Caccia, G. Verruggio // Proceedings of Oceans, Nice, France. – 1998. – P. 825–829.
4. *Filaretov, V.* The Development of System of Accommodation To Faults of Navigation Sensors of Underwater Vehicles with Resistance to Disturbance / V. Filaretov, A. Zhirabok, A. Zuev, A. Protchenko // Proc. of 2014 14th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2014), Gyeonggi-do, Korea. – 2014. – P. 1548–1553.
5. *Ваулин, Ю.В.* Малогабаритный автономный обитаемый подводный аппарат МАРК нового поколения для выполнения групповых операций [Текст] / Ю.В. Ваулин, Ф.С. Дубровин, А.А. Кушнерик, И.Е. Туфанов, А.Ф. Щербатюк // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2012. – № 6. – С. 59–65.

**СТРУКТУРА И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ОТРАБОТКИ  
КОЛЛЕКТИВНЫХ ЗАДАЧ РОБОТАМИ\***

<sup>1</sup>*Уфимский государственный авиационный технический университет,*

<sup>2</sup>*Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН,*

*г. Уфа,*

*bogdan.u86@gmail.com*

Актуальным и востребованным направлением исследований в робототехнике является разработка новых архитектур, методик и алгоритмов управления автономными коллективами роботов (КР), которые значительно превосходят по своим функциональным возможностям, надежности и устойчивости одиночные робототехнические комплексы [1]. Несомненными преимуществами обладает подход к построению коллектива мобильных роботов (МР), базирующийся на реализации систем управления/планирования с использованием «облачной» архитектуры и технологий виртуализации, параллелизации обработки данных [2, 3].

Модель взаимодействия [4] предполагает, что вся группа МР представляет с собой распределенную реляционную базу данных (БД), а каждый агент хранит и обрабатывает лишь часть информации (строку или несколько строк БД), которая включает сведения о текущем состоянии агента (выполняемые задачи, уровень заряда и т.п.), его функциональном назначении и характеристику ближайшего окружения. При этом каждый МР в группе может выполнять роль сетевого шлюза для доступа к распределенной БД (точка подключения к облаку), предоставляя структурированные данные, которые могут быть легко интерпретированы в клиентском приложении оператора или агента.

Проверка работоспособности, эффективности и быстродействия синтезированной модели взаимодействия, алгоритмов обработки информации, навигации и управления в различных оперативных пространствах требует особого подхода к реализации испытательного стенда. С учетом специфики полученных решений и аппаратно-программного комплекса построенного КР была синтезирована распределенная архитектура стенда, ориентированная на использование уже применяемой для МР технологии обмена информацией. Поэтому новые программно-технические средства рассматриваются как агент-наблюдатель, являющийся полно-

---

\* Работа выполняется при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-29-04165-офи-м и Программы фундаментальных исследований Президиума РАН I.29П.

ценным элементом облака – единого информационного пространства коллектива.

В качестве аппаратной базы при реализации агента-наблюдателя использовались два комплекта – микропроцессор *Raspberry Pi 3* и видеокамера, установленные над испытательным полигоном, что предоставляет возможность получать информацию об оперативной обстановке в режиме реального времени в виде уже обработанных данных, формируемых по запросам от других узлов облака. Такая реализация в дальнейшем, при внесении изменений в структуру КР, позволит легко модифицировать агента-наблюдателя: увеличить число комплектов (расширить зону охвата), использовать БПЛА (мобильный комплект наблюдателя), заменить камеру (коррекция разрешающей способности) и т.д.

Информация от агента-наблюдателя поступает в распределенную БД в двух видах: общая обстановка в поле зрения и информация, формируемая на основании запросов от других узлов облака или внешнего оператора. При этом, в зависимости от типа запроса, генерируемый ответ отражает специфику решаемых задач, а алгоритм обработки – особенности «потребителя»: исполнительного, тактического или стратегического уровней системы управления КР.

На каждом МР смонтирована система светодиодных маркеров, позволяющая агенту-наблюдателю при обработке полученных изображений определить положение и ориентацию всех МР, находящихся в поле зрения камеры/камер (рис. 1).



**Рис. 1. Мобильный робот с установленными маркерами**

Затем, в зависимости от типа запроса, эти данные формируют необходимый ответ и размещают его в БД. Так, для исполнительного уровня системы управления ответ содержит информацию о текущем положении МР и ошибке (уход с траектории), которая необходима для коррекции управляющих сигналов и обнуления накапливающейся ошибки в инерци-

альных системах. Для тактического уровня используются и текущие координаты, и предыдущие ответы, необходимые для отслеживания траекторий обхода как стационарных, так и динамических препятствий. Запрос от стратегического уровня системы управления формирует наиболее полный ответ, содержащий информацию еще и о найденных заданиях, препятствиях, расположении МР в рабочем пространстве, что необходимо для решения задачи распределения заданий в КР.

Использование единой аппаратной платформы для реализации испытательного стенда и КР, а также виртуализация большинства датчиков, позволило избежать проблемы программно-аппаратной совместимости решений и реализовать открытую кроссплатформенную архитектуру.

В результате проведенных работ:

- разработаны и собраны пять прототипов МР;
- собран испытательный полигон с внешней системой СТЗ, проведена отладка ПО агентов-наблюдателей;
- проведены эксперименты с отработкой задач дистанционного мониторинга с использованием КР.

Полученные результаты подтвердили работоспособность и эффективность принятых структурных и алгоритмических решений, позволили сформировать план дальнейших работ. Так, в ближайшее время планируется оснащение части МР светодиодными дисплеями, на которых будут формироваться специальные символы с закодированной информацией о текущем состоянии робота, оценке окружающего пространства, координатах выявленных малоразмерных препятствий и т.д. Синтез специализированного ПО позволит одномоментно получить, распознать и обработать символьную информацию со всех роботов, находящихся в поле зрения камер.

1. *Михайлов, Б.Б.* Автономные мобильные роботы – навигация и управление [Текст] / Б.Б. Михайлов, А.В. Назарова, А.С. Ющенко // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 2 (175).
2. *Каляев, А.И.* Алгоритм мультиагентного диспетчирования ресурсов в гетерогенной облачной среде [Текст] / А.И. Каляев, Я.С. Коровин, И.А. Каляев // Вычислительные технологии. – 2016. – Т. 21, № 5. – С. 38–53.
3. *Даринцев, О.В.* Архитектура системы управления коллективом роботов на базе облачных технологий [Текст] / О.В. Даринцев, Б.С. Юдинцев, А.Ю. Алексеев // Десятая всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2017): материалы мультиконференции. – 2017. – Т. 3. – С. 169–171.
4. *Darintsev, O.V.* Methods of a Heterogeneous Multi-agent Robotic System Group Control / O.V. Darintsev, B.S. Yudintsev, A.Yu. Alekseev etc. // Procedia Computer Science. – 2019. – P. 687–694. – DOI: 10.1016/j.procs.2019.02.032.

**АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ****А**

Абдуллин Т.Х., **140**  
 Абросимов Э.А., **116**  
 Агеев А.В., **217**  
 Акмаев О.К., **27**  
 Алексеев А.Ю., **223**  
 Андреева М.В., **14, 30**  
 Андреева Ю.Ю., **183**  
 Анисимов А.А., **33**  
 Асанов А.З., **36**

**Б**

Бахшиев А.В., **81**  
 Бобьрь М.В., **39**  
 Богданов Д.Р., **186**  
 Богуславский А.А., **217**  
 Бойкачѐв В.Н., **83**  
 Борейко А.А., **189**  
 Брискин Е.С., **17, 42,**  
**119, 151**  
 Бычков И.В., **75**

**В**

Веселов Г.Е., **122**  
 Воробьева Н.С., **45**

**Г**

Гайворонский С.А., **48**  
 Гайдук А.Р., **52, 72**  
 Глущенко А.И., **55, 95**  
 Годжаев З.А., **127**  
 Голубев А.С., **81**  
 Горбачев В.А., **157**  
 Градецкий В.Г., **58, 61**  
 Губанков А.С., **130**  
 Гурьянова Е.О., **36**

**Д**

Даринцев О.В., **133, 186,**  
**223**  
 Дивеев А.И., **63**  
 Долгий Ю.Ф., **66**  
 Дяшкин А.В., **193**  
 Дяшкин-Титов В.В., **193**

**Е**

Езангина Т.А., **48**  
 Ермолов И.Л., **136**

**Ж**

Жильникова Ю.Ф., **138**  
 Жирабок А.Н., **69, 220**  
 Жога В.В., **45, 193**  
 Жуков Б.А., **183**

**З**

Зеленский А.А., **140**  
 Зуев А.В., **69, 196, 220**

**И**

Иванов Д.Я., **108**  
 Илюхин Ю.В., **140**  
 Инзарцев А.В., **189**  
 Инь Шуай, **180**  
 Исхаков А.Ю., **167**

**К**

Кавтрев С.С., **161**  
 Калинин Я.В., **17, 102,**  
**183, 199**  
 Каляев А.И., **108**  
 Капустян С.Г., **52, 72,**  
**112**

Кацков П.А., **142**

Кензин М.Ю., **75**  
 Киселев И.О., **158**  
 Климчик А.С., **145**  
 Князьков М.М., **58, 61**  
 Ковшов И.В., **170**  
 Колесникова С.И., **78**  
 Колоколова К.В., **52**  
 Корнаев А.В., **202, 211**  
 Корнаев Н.В., **202**  
 Корнаева Е.П., **202**  
 Коровин Я.С., **108**  
 Кудояров Р.Г., **27**  
 Кузьмин В.А., **127**  
 Куличенко А.Д., **116**

**Л**

Лапин Д.В., **154, 204**  
 Ласточкин К.А., **55**  
 Лепетухин К.Ю., **17**  
 Литвинов О.В., **81**  
 Лунева М.Ю., **39**

**М**

Макаров Ю.Н., **83**  
 Максимкин Н.Н., **75**  
 Малолетов А.В., **17, 145**  
 Мартынова Л.А., **86**  
 Марчук Е.А., **102**  
 Машошин А.И., **148, 189**  
 Мельканович В.С., **208**  
 Мигранов А.Б., **133**  
 Мирошкина М.В., **151,**  
**199**  
 Можаяев А.Н., **116**

Мокаева А.А., **154, 204**  
 Морозов Ю.В., **89**  
 Мунасыпов Р.А., **27, 92**  
 Муслимов Т.З., **92**

**Н**

Несмиянов И.А., **45, 193**  
 Никитин А.Д., **157**  
 Носиков В.Б., **83**  
 Носков В.П., **158**  
 Носков И.А., **142**

**П**

Павин А.М., **189**  
 Павловский В.Е., **14, 30**  
 Пашкевич И.В., **189**  
 Петров А.В., **142**  
 Петров В.А., **55, 95**  
 Плавинский М.Н., **161**  
 Плаксиенко В.С., **72**  
 Платонов В.Н., **42**  
 Половко С.А., **161**  
 Поляков Р.Н., **211**  
 Проценюк А.С., **161**

**Р**

Рубцов И.С., **83**  
 Рудианов Н.А., **164**

**С**

Савин Л.А., **202, 211**  
 Селин И.А., **213**  
 Семашкин Е.Н., **19**

Семёнов В.В., **83**  
 Семёнов Е.А., **61, 58**  
 Сенькевич С.Е., **127**  
 Сергеев С.Ф., **148**  
 Серебрянный В.В., **154**  
 Серов В.А., **170**  
 Сесекин А.Н., **66**  
 Складаров А.А., **122**  
 Смирная Л.Д., **199**  
 Смирнова Е.Ю., **116, 161**  
 Смолин В.С., **217**  
 Соифер В.А., **24**  
 Соколов С.М., **217**  
 Суханов А.Н., **58, 61**  
 Сычѳв В.А., **98**

**Т**

Тарарыкин С.В., **33**  
 Ташлыков О.Л., **66**  
 Точилин П.А., **101**  
 Трефилов П.М., **167**  
 Тютиков В.В., **138**

**У**

Устинов С.А., **170**

**Ф**

Фадеев М.Ю., **145**  
 Федин А.П., **102**  
 Фецак С.И., **27**  
 Филаретов В.Ф., **174, 177,**  
**196, 220**  
 Филимонов А.Б., **105**

Филимонов Н.Б., **105**

**Х**

Харьков М.А., **140**  
 Хисамутдинов М.В.,  
**108**  
 Ходжаев В.Д., **83**  
 Хрипунов С.П., **136**  
 Хрипунов С.С., **136**  
 Хрущев В.С., **164**

**Ч**

Чупин И.А., **66**

**Ш**

Шабанов В.Б., **112**  
 Шаронов Н.Г., **42, 119**  
 Швандт А., **180**  
 Шмалько Е.Ю., **63**  
 Шумский А.Е., **69**  
 Шурьегин В.А., **170**  
 Шушкевич Н.А., **83**

**Ю**

Юдинцев Б.С., **223**  
 Юрцев Е.С., **83**  
 Юхимец Д.А., **130, 174,**  
**177**  
 Ющенко А.С., **180**

**Я**

Яковлев К.С., **142**

*Научное издание*

Материалы  
XII мультиконференции

**XII МУЛЬТИКОНФЕРЕНЦИЯ  
ПО ПРОБЛЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ**

**МКПУ-2019**

23 – 28 сентября 2019 г.  
Дивноморское, Геленджик

В четырех томах

Том 2

Компьютерная верстка *Л.Л. Слостен*  
Редактор: *И.В. Петручук*

Подписано в печать 16.08.2019 г.  
Бумага офсетная. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Усл. печ. лист. 13,26.  
Уч. изд. л. 11,3. Заказ № 7175. Тираж 75 экз.

Отпечатано в отделе полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции  
Издательско-полиграфического комплекса КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ.  
344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, тел (863) 243-41-66.