



№1-2020

ISSN 1999-9429

ИЗВЕСТИЯ ЮФУ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Перспективы применения робототехнических комплексов
- Системы управления и моделирования
- Системы энергетики, приводная и датчиковая аппаратура
- Связь, навигация и наведение
- Техническое зрение

ИЗВЕСТИЯ ЮФУ. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ IZVESTIYA SFedU. ENGINEERING SCIENCES

Свидетельство о регистрации средства массовой информации
ПИ № ФС77-28889 от 12.07.2007

Научно-технический и прикладной журнал
Издается с 1995 года, до середины 2007 года под названием «Известия ТРТУ»
Подписной индекс 41970

№ 1 (211). 2020 г.

Тематический выпуск

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ И ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ

Журнал включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук».

Редакционный совет

Каляев И.А. (председатель); Курейчик В.В. (зам. председателя); Курейчик В.М. (зам. председателя); Бородянский И.М. (ученый секретарь); Абрамов С.М.; Агеев О.А.; Бабенко Л.К.; Вагин В.Н.; Веселов Г.Е.; Гонкальвес Ж.; Колесников А.А.; Коноплев Б.Г.; Левин И.И.; Макаревич О.Б.; Маркович И.И.; Микрин Е.А.; Никитов С.А.; Обуховец В.А.; Осипов Г.С.; Панатов Г.С.; Панич А.Е.; Петров В.В.; Петровский А.Б.; Пшихопов В.Х.; Редько В.Г.; Румянцев К.Е.; Саламах М.; Солдатов А.В.; Стемповский А.Л.; Сухинов А.И.; Сысоев В.В.; Тарасов С.П.; Фрадков А.Л.; Хашемипур М.; Чаплыгин Ю.А.; Чередниченко Д.И.; Четверушкин Б.Н.; Чичков Б.Н.

Учредитель Южный федеральный университет.

Издатель Южный федеральный университет.

Ответственный за выпуск Косенко Е.Ю.

Технический редактор Ярошевич Н.В.

Оригинал-макет выполнен Ярошевич Н.В.

Подписано к печати 23.11.2020. Формат 70×108 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная.

Офсетная печать. Усл. печ. л. – 22,6. Уч.-изд. л. – 19,5.

Заказ № 7764. Тираж 250 экз.

Адрес издателя: 344091, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1. Тел. 8(863)2478051.

Адрес типографии: 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) 247-80-51.

Адрес редколлегии: 347922, г. Таганрог, ул. Чехова, 22, ЮФУ, тел. +7 (928) 909-57-82, e-mail: iborodyanskiy@sfedu.ru, <http://izv-tn.tti.sfedu.ru/>.

16+

Цена свободная

ISSN 1999-9429 (Print)

ISSN 2311-3103 (Online)

© Южный федеральный университет, 2020

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ I. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

В.Х. Пшихопов, А.Р. Гайдук, М.Ю. Медведев, Д.Н. Гонтарь, В.В. Соловьёв, О.В. Мартьянов КОНЦЕПЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОПЕРАТИВНОЙ ГРУППЫ РТК.....	6
Н.В. Ким, В.П. Носков, И.В. Рубцов, В.А. Аникин АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОСАДКИ БЕСПИЛОТНОГО ВЕРТОЛЕТА НА НЕОБОРУДОВАННУЮ ПЛОЩАДКУ.....	17
А.И. Наговицин, С.Н. Пестерев, Б.Б. Молоткова, И.В.Аксенов ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ОБУЧАЮЩИХ СИСТЕМ С ЭЛЕМЕНТАМИ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ РАКЕТНЫХ ВОЙСК И АРТИЛЛЕРИИ, ПРИМЕНЯЮЩИХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ	25
А.Л. Ронжин, К.Т. Нго, В.В. Нгуен ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ОБМЕНОМ ФИЗИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ МЕЖДУ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКОЙ РАЗНОЙ СТЕПЕНИ РОБОТИЗАЦИИ.....	39
В.В. Чернышев, И.П. Вершинина, В.В. Арыканцев УСТОЙЧИВОСТЬ ШАГАЮЩИХ МАШИН И РОБОТОВ В ПОДВОДНЫХ УСЛОВИЯХ	52
Я.А. Туровский, С.С. Харченко, Р.В. Мещеряков, А.Ю. Исхаков, А.О. Исхакова АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНТЕРФЕЙСА УПРАВЛЕНИЯ РОБОТ-ЧЕЛОВЕК ПРИ ВЫДЕЛЕНИИ ЗРИТЕЛЬНЫХ ВЫЗВАННЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ НА ОСНОВЕ МНОГОМЕРНОГО ИНДЕКСА СИНХРОНИЗАЦИИ	66

РАЗДЕЛ II. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.В. Зуев, А.Н. Жирабок РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ДВИЖИТЕЛЕЙ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ	79
Д.В. Березников, А.А. Закиев, Е.А. Магид СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОНОМНОГО ВОЗВРАЩЕНИЯ КОЛЁСНОГО РОБОТА ПРИ ПОТЕРЕ СВЯЗИ С УДАЛЕННЫМ ОПЕРАТОРОМ	90
В.А. Шурыгин, В.А. Серов, С.А. Устинов, А.В. Леонард, С.Е. Червонцев, В.Н. Платонов, С.С. Мазлов ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ДОСЫЛА АРТИЛЛЕРИЙСКОГО СНАРЯДА В КАМОРУ ОРУДИЯ	98
В.В. Костенко, И.Г. Мокеева, Н.А. Найденко, А.Ю. Толстоногов ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОЙ МАРШЕВЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА.....	108
М.А. Маевский, В.Ю. Занин, И.В. Кожемякин РАЗРАБОТКА КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РЕЗИДЕНТНЫМ/ИНТЕРВЕНЦИОННЫМ АНПА НА ОСНОВАНИИ ПОВЕДЕНЧЕСКИХ МЕТОДОВ	119
Г.В. Горелова ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В СЛОЖНЫХ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ.....	134
В.А. Горелов, И.В. Рубцов, А.А. Стадухин ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДВИЖНОСТИ МОБИЛЬНЫХ РОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	144

РАЗДЕЛ III. СИСТЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ, ПРИВОДНАЯ И ДАТЧИКОВАЯ АППАРАТУРА

В.А. Герасимов, А.В. Комлев, А.Ю. Филоженко РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ТРАНСФОРМАТОРА СИСТЕМЫ БЕСКОНТАКТНОГО ЗАРЯДА АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ АНПА.....	156
Н.К. Киселев, Л.А. Мартынова, И.В. Пашкевич МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ В СОСТАВЕ СТЕНДА ОТЛАДКИ И СОПРОВОЖДЕНИЯ АНПА	170

РАЗДЕЛ IV. СВЯЗЬ, НАВИГАЦИЯ И НАВЕДЕНИЕ

В.А. Бондаренко, В.А. Павлова, В.А. Тупиков, Н.Г. Холод НЕЙРОСЕТЕВОЙ АЛГОРИТМ ПОЛНОКАДРОВОГО РАСПОЗНАВАНИЯ НАДВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ.....	188
В.П. Андреев, В.Л. Ким, С.Р. Эприков АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ ФРЕЙМВОРК ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МОДУЛЬНЫХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ С ИЕРАРХИЧЕСКОЙ АРХИТЕКТУРОЙ.....	199
В.А. Бондаренко, Д.К. Ельцова, А.И. Лизин, В.А. Павлова, М.В. Созинова, В.А. Тупиков МНОГОАГЕНТНЫЙ АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ И СОПРОВОЖДЕНИЯ НЕДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ ОБЪЕКТОВ.....	218

РАЗДЕЛ V. ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗРЕНИЕ

А.Е. Щелкунов, В.В. Ковалев, К.И. Морев, И.В. Сидько МЕТРИКИ ОЦЕНКИ АЛГОРИТМОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ	233
С.М. Соколов, А.А. Богуславский, С.А. Романенко ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ БОРТОВЫХ СИСТЕМ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОДВИЖНЫХ СРЕДСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТЗ.....	246

CONTENT

SECTION I. PROSPECTS FOR THE USE OF ROBOTIC SYSTEMS

V.Kh. Pshikhopov, A.R. Gaiduk, M.Yu. Medvedev, D.N. Gontar, V.V. Solovjev, O.V. Martjanov CONCEPT OF A ROBOT GROUP CALCULATION	6
N.V. Kim, V.P. Noskov, I.V. Rubtsov, V.A. Anikin AUTOMATED LANDING OF AN UNMANNED HELICOPTER TO AN UNEQUIPPED SITE.....	17
A.I. Nagovitsin, S.N. Pesterev, B.B. Molotkova, I.V. Aksenov EXPERIENCE IN USING TRAINING SYSTEMS WITH VIRTUAL REALITY ELEMENTS FOR TRAINING SPECIALISTS OF MISSILE FORCES AND ARTILLERY USING ROBOTIC SYSTEMS FOR MILITARY PURPOSES.....	26
A.L. Ronzhin, K.T. Ngo, V.V. Nguyen TASKS OF CONTROLLING THE EXCHANGE OF PHYSICAL RESOURCES BETWEEN AGRICULTURAL MEANS WITH VARYING DEGREES OF ROBOTIZATION	40
V.V. Chernyshev, I.P. Verzhinina, V.V. Arykantsev STABILITY OF WALKING MACHINES AND ROBOTS IN UNDERWATER CONDITIONS	52
Y.A. Turovskij, S.S. Kharchenko, R.V. Meshcheryakov, A.Y. Iskhakov, A.O. Iskhakova ALGORITHMIC SUPPORT OF THE INTERFACE OF MANAGEMENT OF ROBOT-HUMAN WITH THE STEADY STATE VISUAL EVOKED POTENTIALS BASED ON THE MULTIVARIATE SYNCHRONIZATION INDEX.....	67

SECTION II. CONTROL AND SIMULATION SYSTEMS

A.V. Zuev, A.N. Zhirabok DEVELOPMENT OF A FUNCTIONAL DIAGNOSTIC SYSTEM FOR THRUSTERS OF UNDERWATER VEHICLES	79
D.V. Bereznikov, A.A. Zakiev, E.A. Magid WHEELED ROBOT AUTONOMOUS RETURN SYSTEM AT REMOTE OPERATOR COMMUNICATION BLACKOUT.....	91
V.A. Shurygin, V.A. Serov, S.A. Ustinov, A.V. Leonard, S.E. Chervoncev, V.N. Platonov, S.S. Mazlov INTELLIGENT CONTROL SYSTEM OF THE PROJECTILE FIXATION INSIDE THE GUN'S CHAMBER	98
V.V. Kostenko, N.A. Aidenko, I.G. Mokeeva, A.Yu. Tolstonogov RESEARCH OF MARCHING PROPULSIONS THRUST CONTROL METHODS OF UNMANNED UNDERWATER VEHICLES.....	109
A.M. Maevskiy, V.U. Zanin, I.V. Kozhemyakin DEVELOPMENT OF A COMBINED CONTROL SYSTEM FOR RESIDENT/INTERVENTION AUV BASED ON BEHAVIORAL METHODS	119
G.V. Gorelova STATEMENT THE PROBLEM OF SIMULATION OF DECISION-MAKING PROCESSES IN COMPLEX ORGANIZATIONAL-TECHNICAL SYSTEMS.....	134
V.A. Gorelov, I.V. Rubtsov, A.A. Stadukhin MOBILITY ANALYSIS OF ROBOT SYSTEMS BY MEANS OF SIMULATION	145

SECTION III. POWER SYSTEMS, DRIVE SYSTEM AND SENSOR EQUIPMENT

V.A. Gerasimov, A.V. Komlev, F.Yu. Filozhenko TRANSFORMER CALCULATION METHOD DEVELOPMENT OF THE AUV CONTACT-LESS BATTERY CHARGING SYSTEM.....	157
N.K. Kiselev, L.A. Martynova, I.V. Pashkevich THE MATHEMATICAL MODEL OF THE FUNCTIONING OF A HYBRID ENERGY SUPPLY SYSTEM AS PART OF A DEBUGGING AND MAINTENANCE STAND AUV	171

SECTION IV. COMMUNICATION, NAVIGATION, AND GUIDANCE

V.A. Bondarenko, V.A. Pavlova, V.A. Tupikov, N.G. Holod REALTIME NEURAL NETWORK ALGORITHM FOR FULL-FRAME MARINE SURFACE OBJECTS RECOGNITION	188
V.P. Andreev, V.L. Kim, S.R. Eprikov HARDWARRE-SOFTWARE FRAMEWORK FOR DEVELOPMENT OF MODULAR MOBILE ROBOTS WITH HIERARCHICAL ARCHITECTURE	200
V.A. Bondarenko, D.K. Eltsova, A.I. Lizin, V.A. Pavlova, M.V. Sozinova, V.A. Tupikov MULTI-AGENT ALGORITHM FOR AUTOMATIC DETECTION AND TRACKING OF NON-DETERMINISTIC OBJECTS.....	219

SECTION V. TECHNICAL VISION

A.E. Shchelkunov, V.V. Kovalev, K.I. Morev, I.V. Sidko THE METRICS FOR TRACKING ALGORITHMS EVALUATION	233
S.M. Sokolov, A.A. Boguslavsky, S.A. Romanenko SOFTWARE AND HARDWARE FOR MOBILE MEANS INFORMATION SUPPORT ONBOARD SYSTEMS WITH USE OF VISION SYSTEM	246

Раздел I. Перспективы применения робототехнических комплексов

УДК 004.896

DOI 10.18522/2311-3103-2020-1-6-16

**В.Х. Пшихопов, А.Р. Гайдук, М.Ю. Медведев, Д.Н. Гонтар, В.В. Соловьёв,
О.В. Мартьянов**

КОНЦЕПЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОПЕРАТИВНОЙ ГРУППЫ РТК*

Рассматривается задача формирования группы автономных робототехнических комплексов с целью нейтрализации обнаруженной группы противника. Группа робототехнических комплексов должна быть сформирована таким образом, чтобы поставленная ей задача по нейтрализации обнаруженного противника была выполнена с большой долей вероятности. Поставленная проблема математически представляет собой задачу о назначениях. Исходными данными для решения указанной задачи являются: типы и число объектов обнаруженной группы противника; данные о расположении объектов противника; данные о составе и характеристиках средств, имеющихся в нашей группировке; тип формируемой группы (робототехническая или смешанная); цель выполнения операции; действия группы по окончании операции. Предлагается решение задачи, базирующееся на оценках эффективности применения отдельных робототехнических комплексов. Решение сформулировано в виде последовательности этапов. На первом этапе осуществляется расчет априорных эффективностей применения каждого элемента обнаруженной группы противника. На втором этапе, исходя из экспертных оценок, производится выбор коэффициентов эффективности применения каждого из имеющихся робототехнических комплексов против каждого элемента обнаруженной группы противника. На третьем этапе осуществляется коррекция априорных оценок эффективности применения имеющихся в распоряжении робототехнических комплексов, с учетом выбранных на втором этапе коэффициентов. На четвертом этапе производится формирование группы робототехнических комплексов таким образом, чтобы ее суммарная эффективность применения превышала суммарную эффективность применения обнаруженного противника в 2,0–2,5 раза. Предложенная методика формирования группы позволяет сформировать как количественный, так и качественный состав группы. В статье приводится пример формирования группы, целью которой является нейтрализация обнаруженного противника. Результаты статьи могут использоваться при моделировании групп роботов, обладающих высокой степенью автономности. Такие группы могут не только выполнять поставленную задачу, но в автоматическом режиме составлять план решения задачи.

Групповое управление; робототехнические комплексы; формирование состава группы; эффективность применения; распределение целей.

**V.Kh. Pshikhopov, A.R. Gaiduk, M.Yu. Medvedev, D.N. Gontar, V.V. Solovjev,
O.V. Martjanov**

CONCEPT OF A ROBOT GROUP CALCULATION

The problem of calculation of an autonomous robotic group in order to destroy the detected enemy group is considered. A group of robots must be formed in such a way that the task assigned to it to destroy the enemy group is performed with a high degree of probability. The task is solved as an assignment problem. The initial information for solving this problem are types and number

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 16–08–00012 выполняемый в Южном федеральном университете.

of objects of the detected enemy group, positions of the enemy objects, information about the war possibilities of the tools available in our group, the type of group being formed (robotic or mixed), the purpose of the operation, the actions of the group at the end of the operation. We propose a solution to the problem based on the evaluation of the effectiveness of individual robotic systems. The solution is formulated as a sequence of the four stages. At the first stage, the calculation of a priori effectiveness of each element of the detected enemy group is performed. At the second stage, based on expert assessments, the choice of efficiency coefficients for each of the available robotic systems against each element of the detected enemy group is made. At the third stage, a priori estimates of the effectiveness of the available robotic systems are corrected, taking into account the coefficients selected at the second stage. At the fourth stage, a group of robotic systems is formed in such a way that its total application efficiency exceeds the total application efficiency of the detected enemy by 2.0–2.5 times. The proposed method of forming a group allows you to create both quantitative and qualitative composition of the group. The article provides an example of the formation of a group whose goal is to neutralize an exposed enemy.

Group control; mobile robots; calculation of a group robot; effectiveness of robot; task assignment.

Введение. Современные военные конфликты имеют ряд специфических черт, существенно отличающих их от конфликтов 19–20 веков. Прежде всего, это отсутствие явных весьма протяженных сплошных фронтов. Непосредственные столкновения в основном протекают между отдельными группами военных, использующих как обычные (традиционные) виды вооружения, так и специальные комплексы вооружений. В настоящее время все шире применяются робототехнические комплексы военного назначения (РТК ВН) наземного, воздушного или морского базирования [1–3]. В последнее время интенсивно проводятся исследования в области применения однородных и разнородных групп робототехнических комплексов [4–6]. Очень часто современные военные конфликты имеют локальный характер и протекают в отдельных районах населенных пунктов, причем при наличии мирного населения.

Важной особенностью современных локальных вооруженных конфликтов является то, что обе противоборствующие стороны чаще всего применяют сходные виды вооружений. При этом тактико-технические характеристики современных вооружений являются, практически, открытыми. Это объясняется тем, что они производятся небольшим числом наиболее развитых в техническом отношении стран и являются предметом международной торговли, как странами-производителями, так и отдельными группами лиц. В связи с этим в печати и различных информационных сетях существует широкая реклама различных вооружений, в которой содержатся открытые данные о тактико-технических характеристиках практически всех известных видов вооружений [7–11]. Исключения составляют лишь виды вооружений новейших разработок, однако вероятность их применения в локальных конфликтах довольно мала.

С другой стороны, применение современных средств разведки: спутников, воздушных РТК ВН, радиотехнических и других систем позволяет не только обнаружить группу военных, но и установить расположение, виды и типы их вооружения. Имеющиеся в настоящее время методики оценки эффективности применения (ЭП) отдельных ВВТ и комплексов вооружений, в том числе и зарубежных, позволяют заранее разработать экспертные таблицы ЭП всех возможных видов ВВТ и РТК ВН, которыми могут располагать группы противника [12–16]. Эта информация позволяет по данным разведки найти оценку ЭП вооружений некоторой военной группы противника и сформировать оперативную группу для решения задачи нейтрализации группы противника.

В данной статье предлагается информационная концепция формирования из состава имеющейся в наличии союзной группировки оперативной группы для нейтрализации обнаруженной группы противника. Существование этой концепции заклю-

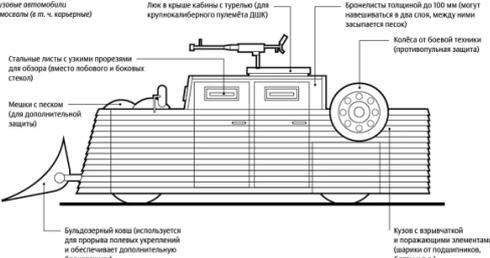
чается в том, чтобы формируемая оперативная группа была оснащена ВВТ, являющимися наиболее эффективными против ВВТ группы противника из тех, которыми располагает наша группировка. При этом ЭП выбранной совокупности ВВТ формируемой группы превышал бы ЭП группы противника не менее, чем в 2–2,5 раза [12, 14, 17]. Одновременно должна учитываться принадлежность ВВТ к тому или иному РТК ВН с тем, чтобы, с одной стороны, использовалось, по возможности, максимальное количество ВВТ, имеющих на каждом РТК ВН, а с другой стороны, минимальное количество последних. Тем самым будет снижена стоимость операции.

Постановка задачи. С математической точки зрения данная задача является задачей о назначениях [13, 18–22], и как всякая задача характеризуется исходными данными. В данном случае такими данными являются:

1. Данные о составе ВВТ (типы и число) обнаруженной группы противника, например, представленные в табл. 1.
2. Данные о расположении ВВТ противника.
3. Данные о живой силе противника.

Таблица 1

Данные о группе противника

Состав РТК ВН (типы и число) группы противника	<p>1. Танк Т-55 – 1 ед. 2. Легкобронированный автомобиль (Mitsubishi L200+ДШК) – 2 ед.</p> <p>«Джихад-мобиль»</p> <p>Используемая техника Платы Танки с демонтированными вооружениями Боевые машины пехоты БМП-1 Грузовые автомобили Самосвалы (в т.ч. карьерные)</p> 
Данные о расположении ВВТ противника	Расстояние до противника – 3 км.
Данные о живой силе противника	Экипажи танка и автомобилей (при расчете БП не учитываются)
Данные о боекомплектах СП ВВТ противника	<p>Т-55 1х 100-мм Д-10Т2С (43 выстрела). 1х 12,7-мм пулемет ДШК-М 300 патр. 1х 7.62 ПКТ (2250 патр.) Mitsubishi L200+ДШК (2 единицы) 1х 12,7-мм пулемет ДШК 500 патр.</p>

4. Данные о составе ВВТ РТК ВН, имеющих в нашей группировке.
5. Данные о технических характеристиках наших РТК ВН.
6. Тип формируемой группы: РТК ВН или смешанной (далее – группы РТК).
7. Цель формируемой группы – окружение, ликвидация или блокирование обнаруженной группы противника.
8. Действия оперативной группы по окончании операции.

Предполагается, что для решения поставленной задачи штаб группировки располагает следующими ресурсами:

- ♦ программа расчета ЭП ВВТ (любого типа) или база данных, в которой содержатся рассчитанные заранее ЭП всех известных ВВТ как наших, так и противника по их номинальным характеристикам;
- ♦ таблица сравнительной эффективности, которая позволяет рассчитать ЭП наших РТК ВН с учетом оставшегося боекомплекта каждого ВВТ и оценить эффективность применения того или иного нашего ВВТ против той или иной цели противника.

Для иллюстрации порядка применения предлагаемой концепции приведем конкретный пример формирования оперативной группы для противодействия группе противника, обнаруженной разведкой. Исходные по этой группе приведены в табл. 1 [7, 11].

В составе группировки, на основе которой должна быть сформирована оперативная группа против указанной выше группы противника, имеются четыре РТК ВН, информация о которых представлена в табл. 2 [8–11].

Таблица 2

Состав и ВВТ нашей группировки РТК ВН

Тип РТК ВН и боекомплекты СП их ВВТ	1. Уран – 9 1х30-мм пушка 2А72 200 выстр. 1х7.62 ПКТМ 2000 патр. 4хПТУР «Атака»
	2. Нерехта 1х12.7 Корд 600 патр.
	3. Соратник 4х РПГ-18 «Муха» 1х12.7 Корд 300 патр.
	4. Уран-6 – инженерный РТК ВН
Данные о технических характеристиках наших РТК ВН в группировке	
Тип формируемой группы	Группа автономных РТК ВН
Цель формируемой группы	Уничтожение РТК и ВВТ противника
Действия по окончании операции	Возврат в пункт постоянной дислокации
Ресурсы	Программа (база ЭП)
	Таблица распределения ВВТ по целям

Решение задачи. В общем случае, выполнение поставленной задачи состоит из этапа разведки, формулирования цели операции, разработки плана выполнения задачи, формирования группы для решения поставленной задачи, выполнения задачи [23, 24]. Последний этап включает в себя периодическую корректировку плана по данным доразведки и, при необходимости, введение резервов.

Указанная процедура поясняется структурой, представленной на рис. 1.

Согласно представленной структуре, центральный пункт управления ставит задачи для группы разведки, которая посылает отчеты по поставленным задачам. В результате полученных данных осуществляется постановка задачи для группы РТК, которая выполняет указанную выше последовательность действий.

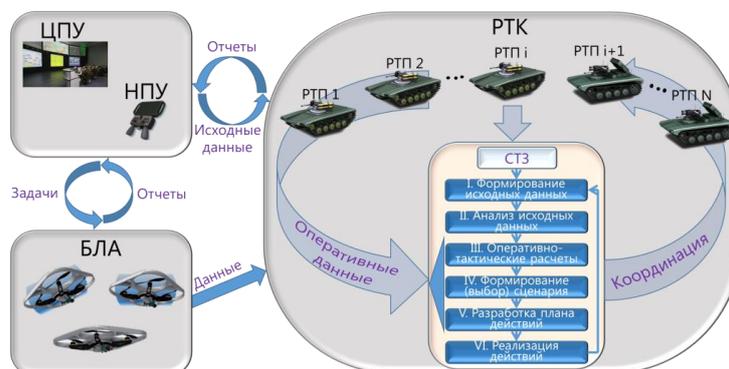


Рис. 1. Структура решения задачи по назначению группой роботов

Формирование группы РТК ВН происходит в следующей последовательности.

1. Прежде всего, определяются значения ЭП каждого ВВТ противника. Если указанная выше база данных имеется, то значения ЭП обнаруженных ВВТ противника выбираются из базы данных. В противном случае они рассчитываются по открытым данным о соответствующих ВВТ. В данном случае значения ЭП рассчитаны по указанным в левой колонке данным табл. 3. Суммарное значение ЭП каждого обнаруженного элемента группы противника указано в правой колонке этой таблицы.

Таблица 3

Суммарные значения ЭП ВВТ группы РТК противника

Типы РТК ВН	Эффективность применения
Т-55 1х 100-мм Д-10Т2С (43 выстрела). 1х 12,7-мм пулемет ДШК-М 300 патр. 1х 7.62 ПКТ (2250 патр.)	1041
Mitsubishi L200+ДШК (2 единицы) 1х 12,7-мм пулемет ДШК 500 патр.	452*2 = 904

2. По экспертным таблицам распределения выбираются коэффициенты эффективности применения каждого из ВВТ, имеющихся в нашей группировке РБК, против каждого РБК и его ВВТ противника. Эти таблицы могут быть составлены, в частности, на основе экспертных оценок с применением «метода парных сравнений» Т.Л. Саати или каким-либо другим методом [25–29]. По отношению к некоторым ВВТ эти коэффициенты можно найти в литературе.

Оценки показателей эффективности применения ВВТ уfitq группировки РТК ВН применительно к рассматриваемому случаю приведены в табл. 4. В пятом столбце этой таблицы приведены максимальные значения ЭП каждого ВВТ, а в шестом и седьмом – значения коэффициентов ЭП против Т-55 и Д-мобиля, соответственно.

3. По данным табл. 4 вычисляются реальные значения ЭП каждого ВВТ нашей группировки РТК по отношению к каждому РТК, входящих в состав группы противника. Вычисление реальной ЭП некоторого ВВТ осуществляется путем умножения его расчетного ЭП на соответствующий коэффициент. Например,

ЭП ПТУР «Атака» по отношению к танку Т-55 равна $863 \cdot 0,9 = 777$. Аналогично, ЭП 30-мм пушки 2А72 по отношению к танку Т-55 равна $433 \cdot 0,2 = 87$, а по отношению к одному Mitsubishi L200+ДШК равна $433 \cdot 0,8 = 346$. Этим же методом найдены и остальные значения реальных ЭП, приведенные в табл. 5.

Таблица 4

Коэффициенты ЭП ВВТ нашей группировки РБК ВН

Поражающие РТК ВН				Поражаемые РТК ВН		
Типы РТК ВН	Стоимость участия в операции	Кол-во в группировке	Типы ВВТ и боекомплект СП	Расчетный ЭП (макс.)	Т-55	Д-мобиль Mitsubishi L200+ДШК
Уран-9	1 000 000	5	ПТУР «Атака»	863	0,9	1
			30-мм пушка 2А72	433	0,2	0,8
			7.62 ПКТМ	0/216	0	0,6
Соратник	300 000	15	РПГ-18 «Муха»	431	0,7	0,9
			12.7 Корд	0/254	0	0,7
Нерехта	100 000	5	12.7 Корд	0/254	0	0,7

Переходя к формированию оперативной группы, по данным табл. 5, не трудно заключить, что из имеющихся в нашей группировке РТК против РТК группы противника эффективными являются только РТК Уран-9 и Соратник, так как каждый из них может действовать как против танка Т-55, так и против L200+ДШК, но с различной эффективностью. Поэтому выделим эти РТК в отдельную табл. 6.

В соответствии с предложенной концепцией, тип и число РТК входящих в состав формируемой оперативной группы выбирается таким образом, чтобы суммарная ЭП группы наших РТК была в 2–2,5 раза больше ЭП группы РТК противника.

Для решения задачи выбора РТК воспользуемся следующей методикой. Прежде всего, отметим, что суммарный ЭП группы противника равен: $1041 + 904 = 1945$, т.е. чтобы иметь преимущество в 2–2,5 раза необходимо создать группировку с ЭП от 3890 до 4862.

Таблица 5

Реальные ЭП ВВТ наших РТК

Поражающие РТК ВН		Поражаемые РТК ВН		
Типы РТК ВН	Типы ВВТ	Расчетный БП (макс.)	Т-55 (1041)	Д-мобиль Mitsubishi L200+ДШК (452*2=904)
Уран-9	4хПТУР «Атака»	863	777	863
	30-мм пушка 2А72	433	87	346
	7.62 ПКТМ	0/216	0	130
Соратник	4хРПГ-18 «Муха»	431	302	388
	12.7 Корд	0/254	0	178
Нерехта	12.7 Корд	254	0	178

В связи с этим рассмотрим 3 варианта:

1. Если в формируемой группе использовать РТК Уран-9, то против танка Т-55 необходимо иметь от $1041 \cdot 2 / 864 = 2,4$ до $1041 \cdot 2,5 / 864 = 3$, т.е. 3 РТК, а против Д-мобилей от $904 \cdot 2 / 1339 = 1,35$ до $904 \cdot 2,5 / 1339 = 1,68$, т.е. 2 РТК. Следовательно, в этом случае в группу необходимо включить 5 единиц РТК Уран-9 общей стоимостью 5 миллионов рублей.

2. Если группу формировать из РТК Соротник, то против танка Т-55 необходимо иметь от $1041 \cdot 2 / 302 = 6,9$ до $1041 \cdot 2,5 / 302 = 8,6$, т.е. от 7 до 9 единиц, а против Д-мобилей от $904 \cdot 2 / 566 = 3,2$ до $904 \cdot 2,5 / 566 = 3,99$, т.е. 4 единицы. Следовательно, в этом случае в группу необходимо включить 12 единиц РТК Соротник общей стоимостью 3,6 миллиона рублей.

3. Приведенные расчеты позволяют заключить, что оперативную группу можно сформировать и таким образом: против танка Т-55 ориентировать 3 РТК Уран-9, а против двух Д-мобилей – 4 РТК Соротник. Тогда общая стоимость РТК оперативной группы составит 4,42 миллиона рублей. Очевидно, этот вариант, как и первый, является нецелесообразным.

Очевидно, при формировании группы целесообразно использовать второй вариант. При этом, окончательно, оперативная группа должна включать 12 единиц РТК Соротник, из которых 8 единиц действуют против танка Т-55, а 4 – против двух Д-мобилей.

Соотношение ЭП РТК оперативной группы с ЭП РТК группы противника:

♦ против Т-55 с ЭП равной 1041 действуют 8 РТК Соротник с ЭП равной $302 \cdot 8 = 2416$, т.е. с превышением в 2,32 раза.

♦ против двух Д-мобилей с ЭП равной 904 действуют 4 РТК Соротник с ЭП равной $566 \cdot 4 = 2264$, т.е. с превышением в 2,5 раза.

Таблица 6

Эффективные РТК нашей группировки

Поражающие РТК ВН			Поражаемые РТК		Варианты и стоимость		
Типы РТК ВН	Цена участия 1 ед. РТК	Типы ВВТ	Т-55 (1041)	Д-мобиль L200+ДШК 2 ед. (452*2=904)	1	2	3
					$5 \cdot 10^6$	$3,6 \cdot 10^6$	$4,2 \cdot 10^6$
Уран-9	$5 \cdot 10^6$	ПТУР «Атака»	864	1339	3+2=5	0	3
		30-мм пушка 2А72					
		7.62 ПКТМ					
Соротник	$3 \cdot 10^5$	РПГ-18 «Муха»	302	566	0	8+4=12	4
		12.7 Корд					

Очевидно, полученное решение задачи формирования оперативной группы для нейтрализации группы противника, с известными значениями ЭП её РТК, соответствует предложенной концепции.

Заключение. В работе представлен подход к решению задачи формирования оперативных групп робототехнических комплексов военного назначения, предназначенных для нейтрализации обнаруженных разведкой групп противника. Решение задачи осуществляется с применением экспертных оценок эффективности боевого применения робототехнических комплексов, которые формируются соответствующими методами на основе известных ценовых и технических характеристик имеющихся в наличии РТК.

Рассчитанная в результате предложенного подхода группа обладает эффективностью, позволяющей решить поставленную задачу.

Следует отметить, что эффективность решения поставленной задачи, зависит не только от состава группы, но и от качества решения задач группового управления, таких как формирование оптимального строя, целераспределение, рациональный выбор критериев [30–32]. Указанные аспекты также могут быть учтены при формировании группы. В частности, в работе [33] проведена оценка системного эффекта от группового применения роботов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Макаренко С.И.* Робототехнические комплексы военного назначения – современное состояние и перспективы развития // Системы управления, связи и безопасности. – 2016. – № 2. – С. 17-28.
2. *Дульнев П.А., Педенко Н.П., Старовойтов С.Н., Сычев С.А.* К вопросу развития робототехнических средств сухопутных войск и оценки эффективности их боевого применения // Военная мысль. – 2019. – № 7. – С. 147-156.
3. *Рубцов И.В.* Вопросы состояния и перспективы развития отечественной наземной робототехники военного и специального назначения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 3 (140). – С. 23-29.
4. *Rizk Y., Awad M., Tunstel E.W.* Cooperative heterogeneous multi-robot systems: A survey // ACM Computing Surveys Volume. – 2019. – Vol. 52 (2).
5. *Xu B., Yang Z., Ge Yu., and Peng Z.* Coalition Formation in Multi-agent Systems Based on Improved Particle Swarm Optimization Algorithm // International Journal of Hybrid Information Technology. – 2015. – Vol. 8 (3). – P. 1-8.
6. *Tan Y., Zheng Z.-Y.* Research Advance in Swarm Robotics // Defense Technology. – 2013. – Vol. 9 (1). – P. 18-39.
7. *Гришин Н.В.* Организация системы закупок вооружения и военной техники для министерств обороны ведущих стран НАТО // ФГУП Труды Крыловского государственного научного центра. – 2017. – № 380. – С. 148-160.
8. Боевой робот «Урал-9». huntsmanblog, 2017. – URL: <http://huntsmanblog.ru/boevoj-robot-ural-9/> (дата обращения: 20.02.2020).
9. Боевой роботизированный комплекс "Нерехта" // Новости ВПК. – 2019. – URL: <https://vpk.name/library/f/nerelhta-rtk.html> (дата обращения: 20.02.2020).
10. БАС-01Г БМ "Соратник", вариант. № 2. Армия-2016. – 2016. – URL: <https://yuripasholok.livejournal.com/9424148.html> (дата обращения: 20.02.2020).
11. *Зубов В.Н.* Новые российские военные робототехнические комплексы // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – СПб.: Научно-производственное объединение специальных материалов, 2017. – № 5-6. – P. 107-108. – С. 73-81. – ISSN: 2306-1456.
12. *Паршин Н.М., Степанов О.А., Куренков Н.И., Ананьев С.Н.* Концептуальный подход к оценке эффективности применения системы высокоточного оружия в операциях // Военная мысль. – 2019. – № 3. – С. 72-81.
13. *Костин Н.А.* Методический подход к определению боевых потенциалов войсковых формирований // Военная мысль. – 2017. – № 10. – С. 33-48.
14. *Брезгин В.С.* Методика расчёта боевых потенциалов образцов вооружения и военной техники по результатам имитационного моделирования боевых действий // Вооружение и экономика. – 2009. – № 1 (5). – С. 30-34.
15. *Леонов А.В., Трущенко В.В., Нестеров Д.В.* Алгоритм военно-экономической оценки эффективности использования робототехнических комплексов в составе подразделений Вооруженных Сил Российской Федерации // Военная мысль. – 2019. – № 7. – С. 81-90.
16. *Буренок В.М., Погребняк Р.Н., Скотников А.П.* Методология обоснования перспектив развития средств вооруженной борьбы общего назначения / редкол. серии: *В.В. Панов* (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 2010. – 368 с.
17. *Гайдук А.Р., Каркищенко А.Н., Пилюхов В.Х.* О влиянии РТК ВН на эффективность использования ВВТ // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 1 (203). – С. 61-74.
18. *Gaiduk A.R.* Polynomial design of the stochastic optimal, minimal complication system // Lecture Notes in Control and Information Sciences. – 1990. – P. 611-615.

19. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. – М.: Физматлит, 2009. – 280 с.
20. Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Концепция построения систем коллективного управления беспилотными летательными аппаратами // В кн.: Системы радиоуправления. Кн. 4. Оптимизация алгоритмов управления / под ред. В.И. Меркулова. – М.: Радиотехника, 2018. – С. 39-46.
21. Geng M., Xu K., Zhou X., Ding B., Wang H., Zhang L. Learning to cooperate via an attention-based communication neural network in decentralized multi-robot exploration // Entropy. – 2019. – Vol. 21 (3).
22. Martínez-García E.A., Torres-Córdoba R., Carrillo-Saucedo V.M., López-González E. Neural control and coordination of decentralized transportation robots // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part I: Journal of Systems and Control Engineering*. – 2018. – Vol. 232 5. – P. 519-540.
23. Unmanned Systems Integrated Roadmap 2017-2042 // Department of defense. US, 2017. – P. 58.
24. Unmanned Aircraft Systems. Joint Doctrine Publication 0-30.2. – https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/673940/doctrine_uk_uas_jdp_0_30_2.pdf.
25. Саати Т.Л. Принятие решений: Методы анализа иерархий. – М.: Радио и связь, 1993.
26. Мартемьянов Ю.Ф. Экспертные методы принятия решений. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2010. – 80 с.
27. Орлов А.И. Методы принятия управленческих решений. – М.: КНОРУС, 2018. – 286 с. – ISBN 978-5-406-06430-6
28. Blanco-Mesa, F., Merigó, J.M., Gil-Lafuente, A.M. Fuzzy decision making: A bibliometric-based review // *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*. – 2017. – Vol. 32 (3). – P. 2033-2050.
29. Groeneveld, J., Müller, B., Buchmann, C.M., et. all. Theoretical foundations of human decision-making in agent-based land use models – A review // *Environmental Modeling and Software*. – 2017. – Vol. 87. – P. 39-48.
30. Pshikhopov V., and Medvedev M. Group control of autonomous robots motion in uncertain environment via unstable modes // *SPIIRAS Proceedings*. – 2018. – Vol. 60 (5). – P. 39-63.
31. Vorotova A., Medvedev M., Soloviev V., Finaev V. Statistical Data Processing of Two Mobile Objects Behavior in Random Environments Using Simulation Modeling Method // *International Review of Automatic Control*. – 2019. – Vol. 12 (4). – P. 182-191.
32. Pshikhopov V., Medvedev M. Position-Path Control of a Vehicle // *Path Planning for Vehicles Operating in Uncertain 2D Environments*. – 2017. – P. 1-23.
33. Гайдук А.Р., Пишхопов В.Х., Медведев М.Ю., Плаксиенко В.С., Гонтарь Д.Н. Оценка влияния эффекта системности на результативность антагонистических игр // *Известия Юго-Западного государственного университета*. – 2019. – Т. 23, № 5. – С. 129-144.

REFERENCES

1. Makarenko S.I. Robototekhnicheskie komplekсы voennogo naznacheniya – sovremennoe sostoyaniye i perspektivy razvitiya [Military robotic systems – current state and development prospects]. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti* [Systems of Control, Communication and Security], 2016, No. 2, pp. 17-28.
2. Dul'nev P.A., Pedenko N.P., Starovoytov S.N., Sychov S.A. K voprosu razvitiya robototekhnicheskikh sredstv sukhoputnykh voysk i otsenki effektivnosti ikh boevogo primeneniya [On the issue of development of robotic means of the land forces and evaluation of the effectiveness of their combat use]. *Voennaya mysl'* [Military thought], 2019, No. 7, pp. 147-156.
3. Rubtsov I.V. Voprosy sostoyaniya i perspektivy razvitiya otechestvennoy nazemnoy robototekhniki voennogo i spetsial'nogo naznacheniya [Current situation and perspective of development for ground military and special robotics]. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFEDU. Engineering Sciences], 2013, No. 3 (140), pp. 23-29.
4. Rizk Y., Awad M., Tunstel E.W. Cooperative heterogeneous multi-robot systems: A survey, *ACM Computing Surveys Volume*, 2019, Vol. 52 (2).
5. Xu B., Yang Z., Ge Yu., and Peng Z. Coalition Formation in Multi-agent Systems Based on Improved Particle Swarm Optimization Algorithm, *International Journal of Hybrid Information Technology*, 2015, Vol. 8 (3), pp. 1-8.

6. Tan Y., Zheng Z.-Y. Research Advance in Swarm Robotics. *Defense Technology*, 2013, Vol. 9 (1), pp. 18-39.
7. Grigin N.V. Organizatsiya sistemy zakupok vooruzheniya i voennoy tekhniki dlya ministerstv oborony vedushchikh stran NATO [Organization of the procurement system for weapons and military equipment for the Ministry of defense of the leading NATO countries]. *FGUP Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra* [Proceedings of the Krylov state scientific center], 2017, No. 380, pp. 148-160.
8. Boevoy robot «Ural-9» [Ural-9 combat robot], 2017. Available at: <http://huntsmanblog.ru/boevoy-robot-ural-9/> (accessed 20 February 2020).
9. Boevoy robotizirovanny kompleks "Nerekhta" [Nerekhta combat robot]. *Elektronnyy resurs* [Electronic resource]. *Novosti VPK* [News of the military -industrial complex], 2019. Available at: <https://vpk.name/library/f/nerekhta-rtk.html> (accessed 20 February 2020).
10. BAS-01G BM "Soratnik", variant № 2. Armiya-2016 [BAS-01G BM "Soratnik", variant 2, Army-2016], 2016. Available at: <https://yuripasholok.livejournal.com/9424148.html> (accessed 20 February 2020).
11. Zubov V.N. Novye rossiyskie voennye robototekhnicheskie komplekсы [New Russian military robotic systems], *Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 16: Tekhnicheskie sredstva protivodeystviya terrorizmu* [Questions of defense equipment. Series 16: Technical means of countering terrorism], 2017, No. 5-6 (107-108), pp. 73-81. ISSN: 2306-1456.
12. Parshin N.M., Stepanov O.A., Kurenkov N.I., Ananjev S.N. Kontseptual'nyy podkhod k otsenke effektivnosti primeneniya sistemy vysokotochnogo oruzhiya v operatsiyakh [A conceptual approach to evaluating the effectiveness of a precision weapon system in operations]. *Voennaya mysl'* [Military thought], 2019, No. 3, pp. 72-81.
13. Kostin N.A. Metodicheskiy podkhod k opredeleniyu boevykh potentsialov voyskovykh formirovaniy [Methodological approach to determining the combat potential of military formations]. *Voennaya mysl'* [Military thought], 2017, No. 10, pp. 33-48.
14. Brezgin V.S. Metodika rascheta boevykh potentsialov obrazcov vooruzheniya i voennoy tekhniki po rezul'tatam imitatsionnogo modelirovaniya boevykh deystviy [Method of calculating the combat potential of weapons and military equipment samples based on the results of simulation of combat operations]. *Vooruzhenie i ekonomika* [Armament and economy], 2009, No. 1 (5), pp. 30-34.
15. Leonov A.V., Trushenkov V.V., Nesterov D.V. Algoritm voenno-ekonomicheskoy otsenki effektivnosti ispol'zovaniya robototekhnicheskikh kompleksov v sostave podrazdeleniy Vooruzhennykh Sil Rossiyskoy Federatsii [Algorithm for military -economic evaluation of the effectiveness of using robotic systems in the armed Forces of the Russian Federation]. *Voennaya mysl'* [Military thought], 2019, No. 7, pp. 81-90.
16. Burenok V.M., Pogrebnyak R.N., Skotnikov A.P. Metodologiya obosnovaniya perspektiv razvitiya sredstv vooruzhennoy bor'by obshchego naznacheniya [Methodology for substantiating the prospects for the development of General-purpose weapons]. Ed. by V.V. Panov. Moscow: Mashinostroenie, 2010, 368 p.
17. Gaiduk A.R., Karkischenko A.N., Pshikhopov V.Kh. O vliyaniy RTK VN na effektivnost' ispol'zovaniya VVT [About influence of the military rtk on efficiency use of WMT], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFEDU. Engineering Sciences], 2019, No. 1 (203), pp. 61-74.
18. Gaiduk A.R. Polynomial design of the stochastic optimal, minimal complication system, *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, 1990, pp. 611-615.
19. Kalyaev I.A., Gaiduk A.R., Kapustyan S.G. Modeli i algoritmy kollektivnogo upravleniya v gruppakh robotov [Models and algorithms for collective control in robot groups]. Moscow: Fizmatlit, 2009, 280 p.
20. Gaiduk A.R., Kapustyan S.G. Kontseptsiya postroeniya sistem kollektivnogo upravleniya bespilotnymi letatel'nymi apparatami [The concept of building collective control systems for unmanned aerial vehicles], *In book: Sistemy radioupravleniya. Kn. 4. Optimizatsiya algoritmov upravleniya* [Radio control systems. Book 4. Optimization of control algorithms]. Ed. by V.I. Merkulov. Moscow: Radiotekhnika, 2018, pp. 39-46.
21. Geng M., Xu K., Zhou X., Ding B., Wang H., Zhang L. Learning to cooperate via an attention-based communication neural network in decentralized multi-robot exploration, *Entropy*, 2019, Vol. 21 (3).
22. Martínez-García E.A., Torres-Córdoba R., Carrillo-Saucedo V.M., López-González E. Neural control and coordination of decentralized transportation robots, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2018, Vol. 232 (5), pp. 519-540.

23. Unmanned Systems Integrated Roadmap 2017-2042, Department of defense. US, 2017, pp. 58.
24. Unmanned Aircraft Systems. Joint Doctrine Publication 0-30.2. Available at: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/673940/doctrine_uk_uas_jdp_0_30_2.pdf.
25. Saati T.L. Prinyatie resheniy: Metody analiza ierarkhiy [Decision making: Methods of the analysis of hierarchies]. Moscow: Radio i svyaz', 1993.
26. Martwmyanov Yu.F. Ekspertnye metody prinyatiya resheniy [Expert decision making methods]. Tambov: Tambovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 2010. 80 p.
27. Orlov A.I. Metody prinyatiya upravlencheskikh resheniy [Management decision making methods]. Moscow: KNORUS, 2018, 286 p.
28. Blanco-Mesa, F., Merigó, J.M., Gil-Lafuente, A.M. Fuzzy decision making: A bibliometric-based review. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 2017, Vol. 32 (3), pp. 2033-2050.
29. Groeneveld, J., Müller, B., Buchmann, C.M., et. all. Theoretical foundations of human decision-making in agent-based land use models – A review, *Environmental Modeling and Software*, 2017, Vol. 87, pp. 39-48.
30. Pshikhopov V., and Medvedev M. Group control of autonomous robots motion in uncertain environment via unstable modes, *SPIIRAS Proceedings*, 2018, Vol. 60 (5), pp. 39-63.
31. Vorotova A., Medvedev M., Soloviev V., Finaev V. Statistical Data Processing of Two Mobile Objects Behavior in Random Environments Using Simulation Modeling Method, *International Review of Automatic Control*, 2019, Vol. 12 (4), pp. 182-191.
32. Pshikhopov V., Medvedev M. Position-Path Control of a Vehicle, *Path Planning for Vehicles Operating in Uncertain 2D Environments*, 2017, pp. 1-23.
33. Gaiduk A.R., Pshikhopov V., Medvedev M., Plaksienko V.S., Gontar' D.N. Otsenka vliyaniya effekta sistemnosti na rezul'tativnost' antagonistskikh igr [Evaluation of the impact of the system effect on the effectiveness of antagonistic games], *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* [Proceedings of Southwestern state University], 2019, Vol. 23, No. 5, pp. 129-144.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Р.А. Нейдорф.

Пшихопов Вячеслав Хасанович – НИИ робототехники и процессов управления Южного федерального университета; e-mail: pshichop@rambler.ru; 347900, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2; тел.: 88634371694; д.т.н.; профессор; директор.

Гайдук Анатолий Романович – e-mail: gaiduk_2003@mail.ru; д.т.н.; профессор; в.н.с.

Медведев Михаил Юрьевич – e-mail: medvmihal@sfedu.ru; д.т.н.; в.н.с.

Гонтарь Дмитрий Николаевич – e-mail: dimagont@gmail.com; м.н.с.

Соловьев Виктор Владимирович – e-mail: soloviev-tti@mail.ru; с.н.с.

Мартьянов Олег Викторович – Фонд перспективных исследований; e-mail: martyanovov@fpi.gov.ru; г. Москва, Бережковская набережная, 22, стр. 3; тел.: +74994180025; к.т.н.; руководитель Национального центра развития технологий и базовых элементов робототехники.

Pshikhopov Viacheslav Khasanovich – R&D Institute of Robotics and Control Systems; e-mail: pshichop@rambler.ru; 2, Shevchenko street, Taganrog, 347900, Russia; phone: +78634371694; dr. of eng. sc.; professor; director.

Gaiduk Anatoly Romanovich – e-mail: gaiduk_2003@mail.ru; dr. of eng. sc.; leading researcher.

Medvedev Mikhail Yurjevich – e-mail: medvmihal@sfedu.ru; dr. of eng. sc.; leading researcher.

Gontar Dmitrii Nikolaevich – e-mail: dimagont@gmail.com; researcher.

Solovjev Victor Vladimirovich – e-mail: soloviev-tti@mail.ru; senior researcher.

Martyanov Oleg Victorovich – Fond of Prospective Investigations; e-mail: martyanovov@fpi.gov.ru; 22/3, Berezhkovskaya naberezhnaya, Moscow, Russia; phone: +74994180025; cand. of eng. sc.; Director of National center for the development of technologies and basic elements of robotics.

Н.В. Ким, В.П. Носков, И.В. Рубцов, В.А. Аникин**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОСАДКИ БЕСПИЛОТНОГО ВЕРТОЛЕТА
НА НЕОБОРУДОВАННУЮ ПЛОЩАДКУ**

Многие целевые задачи, решаемые беспилотными вертолетами, выполняются в сложных условиях функционирования. При этом вертолеты подвержены воздействию различных дестабилизирующих факторов, существенно влияющих на безопасность полетов. В представленной работе рассмотрены основные проблемы, возникающие при эксплуатации беспилотных вертолетов, показано, что недостаточный уровень безопасности полетов обусловлен, в частности, высокой частотой крушений при вынужденных посадках. Обоснована необходимость создания бортовых средств автоматической посадки беспилотного вертолета. С учетом предъявляемых Федеральными авиационными правилами требований к местам посадки, сформулированы параметры-ограничения, позволяющие формализовать выбор пригодных для посадки участков рельефа по данным бортовой системы технического зрения. На основе сравнительного анализа, показано, что в настоящее время при формировании исходных видеоданных для решения поставленной задачи целесообразно использовать комплексированную систему технического зрения на базе взаимно юстированных и имеющих общую зону обзора 3D-лазерного сенсора, цветной видеокамеры и тепловизора. Предложены алгоритмы распознавания мест посадки по видеоданным бортовой комплексированной системы технического зрения с использованием критериев геометрической и опорной проходимости. Распознавание пригодных для посадки мест по критерию геометрической проходимости предлагается выполнять в два этапа: сначала формировать по данным 3D-лазерного сенсора карту высот рельефа, попавшего в зону обзора сенсора, затем путем сравнения перепадов высот данного рельефа с допустимыми для данного беспилотного вертолета выделять пригодные и непригодные для посадки участки. Распознавание пригодных для посадки мест по критерию опорной проходимости предлагается выполнять путем вычисления евклидова расстояния между формируемыми комплексированной системой технического зрения данными и заранее известными эталонами различных типов грунтов в шестимерном пространстве признаков (дисперсия высоты, интенсивность отраженного сигнала, три цвета и температура). Окончательный выбор пригодных для посадки мест предлагается выполнять путем пересечения участков, удовлетворяющих обоим критериям. Приведены результаты работы соответствующих программно-аппаратных средств в реальных условиях, подтверждающие корректность и эффективность предлагаемых алгоритмов.

Беспилотный вертолет; автоматическая посадка; система технического зрения; геометрическая и опорная проходимость.

N.V. Kim, V.P. Noskov, I.V. Rubtsov, V.A. Anikin**AUTOMATED LANDING OF AN UNMANNED HELICOPTER
TO AN UNEQUIPPED SITE**

Unmanned helicopters perform many tasks in difficult operating conditions and are subject to various destabilizing factors that significantly affect flight safety. The main problems encountered in the operation of unmanned helicopters are considered. It is shown that the insufficient level of flight safety is caused, in particular, by the high frequency of crashes during forced landings. The necessity of creating onboard means of automatic landing of an unmanned helicopter is proved. Taking into account the requirements of the Federal aviation regulations for landing places, the parameters-restrictions that allow formalizing the choice of terrain areas suitable for landing according to the onboard technical vision system are formulated. On the basis of comparative analysis, it is shown that at present, when forming the initial video data for solving this problem, it is advisable to use a complex system of technical vision based on mutually adjusted and having a common viewing area of a 3D laser sensor, color video camera and thermal imager. The proposed

recognition algorithms of the pick-up location in the video data on-Board complex system of technical vision with the use of geometric criteria and the reference permeability. It is proposed to perform the recognition of landing places based on the criterion of geometric cross-country capability in two stages: at the first stage, a map of terrain heights is formed based on 3D laser sensor data, and at the second stage, areas suitable for helicopter landing are selected. Recognition of suitable and unsuitable areas is performed by comparing the elevation differences of this terrain with the reference elevation differences defined for this unmanned helicopter. It is proposed to perform the recognition of suitable landing sites based on the criterion of reference passability by calculating the Euclidean distance between the obtained data and pre-known standards corresponding to different types of soil in the six-dimensional feature space (height variance, reflected signal intensity, three colors, and temperature). The final selection of suitable places for planting is proposed to be made from sites that meet both criteria. The results of the work of the corresponding software and hardware in real conditions are presented, confirming the correctness and effectiveness of the proposed algorithms.

Unmanned helicopter; automatic landing; technical vision system; geometric and reference cross-country capability.

Введение. В последние годы все большее применение имеют беспилотные летательные аппараты, оснащенные бортовыми системами технического зрения. В частности, авиационный мониторинг наземной обстановки является важным этапом обследования мест чрезвычайных ситуаций [1], в т.ч. анализа пожарной обстановки, поиска людей, техники [2, 3], экологического мониторинга и пр. В [4] обсуждаются вопросы обнаружения наземных стационарных объектов, в [5] рассматриваются алгоритмы принятия решений при реализации мониторинга дорожной обстановки с помощью малоразмерных летательных аппаратов вертолетного типа. Обнаружение и слежение за наземными объектами с помощью беспилотного вертолета (БВ) исследуется в работе [6]. Целевые задачи мониторинга, связанные с обнаружением и распознаванием объектов интереса решаются автоматически с помощью программно-аппаратных средств систем технического зрения [7–10].

Подобные БВ функционируют в сложных условиях и в ряде случаев подвержены воздействию различных дестабилизирующих факторов. Основные проблемы эксплуатации БВ во многом связаны с недостаточным уровнем безопасности полетов и, в частности, довольно высокой частотой крушений при вынужденной посадке.

Необходимость в вынужденной посадке возникает при особых ситуациях, к которым относятся:

- ◆ потеря связи или передача на пульт управления не качественных видеоизображений окружающего БВ пространства;
- ◆ сбой в работе навигационной системы;
 - сложные для полета метеоусловия;
 - аварийная ситуация;
 - внезапное изменение полетного задания.

Автоматическая система посадки может рассматриваться в качестве альтернативы (или дополнения) существующим системам с дистанционным управлением не только при потере связи, но и для исключения ошибок оператора [11, 12]. Автоматической системой посадки так же должны быть оснащены БВ, ориентированные на полностью автономное функционирование в индустриально-городских средах, избыточно экранированными зонами [13].

Возможны следующие виды посадок вертолета:

- ◆ вертикальная посадка с работающими двигателями;
- ◆ посадка скоростью (по самолетному);
- ◆ посадка на режиме самовращения несущего винта.

Рассмотрим вариант вертикальной посадки БВ, требующий выбора посадочной площадки минимального размера. По аналогии с Федеральными авиационными правилами «Требования к посадочным площадкам, расположенным на участке земли или акватории» при автоматической посадке в качестве посадочной должна быть выбрана земельная (ледовая) или искусственная площадка, пригодная для взлета и посадки данного типа БВ. При этом размер d (диаметр круга) посадочной площадки должен быть не менее максимального габарита объекта управления с вращающимися винтами, а ее поверхность – быть свободной от препятствий (высота вертикальной ступеньки не более h_0), удовлетворять ограничениям по уклону (средний уклон в любом направлении не должен превышать ψ_c , локальный уклон, измеряемый по размеру r колеи БВ, не должен превышать ψ_n) и выдерживать воздействие струи несущего винта и шасси. Таким образом, при выборе (распознавании) пригодного для посадки места необходимо учитывать геометрические и опорные характеристики грунта в зоне вынужденной посадки, что может быть сделано по аналогии с классификацией зоны маневрирования наземного робота по критериям геометрической и опорной проходимости [14–18].

Выбор места посадки по критерию геометрической проходимости. В данном случае выбор места посадки может осуществляться на основе данных бортовой системы технического зрения (СТЗ), обеспечивающей построение подробной карты высот зоны вынужденной посадки с последующей классификацией ее участков на пригодные и не пригодные для посадки путем сравнения их геометрии с геометрическими ограничениями для данного БВ. В качестве бортовой СТЗ для построения подробной карты высот наиболее целесообразно в настоящее время использовать 3D-лазерные сенсоры, которые:

- ◆ по сравнению с СТЗ со структурированной подсветкой имеют большую дальность и сохраняют работоспособность при солнечном освещении;
- ◆ по сравнению с СТЗ на основе стереозрения не зависят от условий освещенности и контрастности текстуры изображений;
- ◆ по сравнению с СТЗ на основе метода «структура-по-движению» не требуют высокоточной навигации.

Зона посадки определяется зоной обзора 3D-лазерного сенсора, которая представляет собой телесный угол с оптической осью, направленной вниз (рис. 1)



Рис. 1. Зоны обзора сенсора и зона посадки

Карта высот зоны посадки представляет собой координаты высот (Z) рельефа относительно центральной горизонтально плоскости (XxY), которые могут быть получены из облака точек $v_i = \langle x_i, y_i, z_i \rangle^T$ ($i=1, 2, \dots, n$), сформированного 3D-лазерным

сенсором, путем преобразования их координат из системы координат сенсора в систему координат центральной горизонтальной плоскости с учетом крена (θ) и тангажа (γ) объекта управления [14]:

$$V_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ z'_i \end{pmatrix} - M(\theta, \gamma) \times v_i,$$

где $M(\theta, \gamma)$ – обобщенная матрица поворотов на углы крена и тангажа (приведение к местной вертикали);

z'_i – z-координата i-й точки после приведения ее к местной вертикали;

$V_i = \langle X_i, Y_i, Z_i \rangle^T$ ($i=1, 2, \dots, n$) – координаты рельефа зоны посадки.

На рис. 2,б приведена карта высот реального рельефа (фото на рис. 2,а), сформированная по данным 3D-лазерного сенсора (2D-лазерный сенсор SICK LMS 291 на опорно-поворотном устройстве).

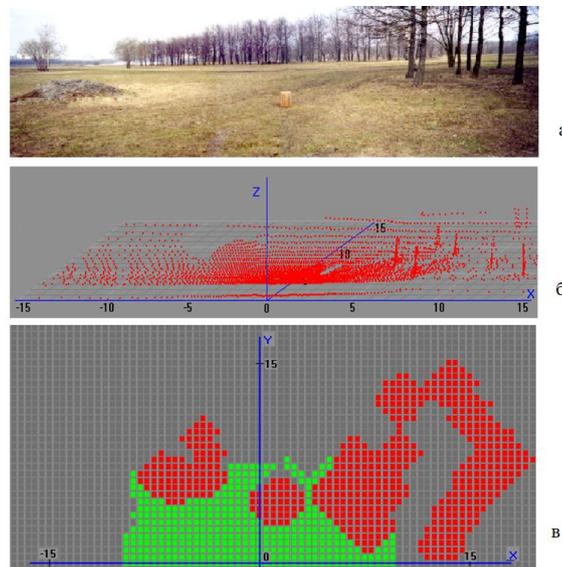


Рис. 2. Выбор места посадки по критерию геометрической проходимости

При наличии подробной карты высоты классификация участков зоны посадки на пригодные и не пригодные сводится к вычислению перепадов высот (выделению препятствий типа ступенек) и возможных колебаний корпуса БВ по крену и тангажу на данном рельефе и сравнению их соответственно с предельно-допустимыми h_0 и ψ_d в пределах колеи r . Кроме того, в соответствии с сформулированными выше требованиями, необходимо вычислять средний уклон места посадки с диаметром d в любом направлении и сравнивать его с предельно допустимым ψ_c . Как показано в [14], наиболее эффективными для этого являются алгоритмы классификации, в основу которых положена процедура вычисления перепадов высот между точками рельефа, находящимися друг от друга в горизонте на расстоянии l , и сравнения их со значением функции геометрической проходимости $f(l)$ для данного БВ (рис. 3).

При превышении перепада высот хотя для одной пары точек, принадлежащих площадке диаметра d , соответствующего значения функции геометрической проходимости, данная площадка классифицируется, как не пригодная для посадки. Для ускорения процесса классификации можно перейти от карты высот к матрице экстремальных высот [14], в которую записываются не все точки, а только макси-

мальные и минимальные высоты дискретных участков горизонтальной плоскости (шаг дискретизации выбирается в зависимости от плотности сканирования зоны посадки и габаритов БВ и его шасси). Результат классификации для рассмотренной выше сцены приведен на рис. 2,в, а для дорожной сцены на рис. 4 (красным выделены не пригодные для посадки участки).

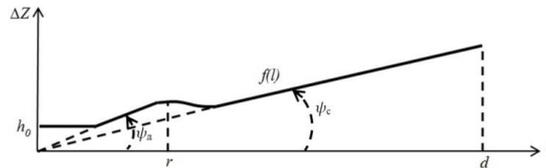


Рис. 3. Функция геометрической проходимости БВ



Рис. 4. Выбор места посадки по критерию геометрической проходимости

Выбор места посадки по критерию опорной проходимости. В данном случае выбор места посадки должен осуществляться на основе данных бортовой комплексованной СТЗ, представляющей собой совокупность взаимно юстированных сенсоров различной физической природы (например, 3D-лазерного сенсора, цветной видеокамеры и тепловизора) с общей зоной обзора [17–20]. Данные юстировки позволяют совмещать в единой системе координат дальнометрические, видео- и тепловизионные изображения, в результате чего получается геометрия рельефа опорной поверхности в виде облака точек T , с распределением на нем цветового и температурного полей:

$$T = [T_i] = [\langle \alpha_i, \beta_i, d_i, I_i, R_i, G_i, B_i, Y_i \rangle],$$

$$i = 1, 2, \dots, n,$$

где n – число точек;

α_i, β_i – углы, соответственно, горизонтальной и вертикальной развёртки 3D-лазерного сенсора;

d_i – измеренная дальность;

I_i – измеренная интенсивность отражённого сигнала лазерного сенсора;

R_i, G_i, B_i – три компонента цвета пиксела, полученные с телевизионной камеры;

Y_i – температура пиксела, полученная с тепловизионной камеры.

Построенная таким образом более полная комплексная модель позволяет более достоверно распознать типы грунтов (песок, глина, растительность, асфальт, бетон и др.) отдельных участков зоны посадки. Распознавание типов грунтов можно выполнять путем вычисления евклидова расстояния между формируемыми комплексированной СТЗ данными и заранее известными эталонами различных типов грунтов в шестимерном пространстве признаков (дисперсия высоты, интенсивность отраженного сигнала, три цвета и температура). На рис. 5,б приведен результат распознавания типов грунтов в реальной среде (фото на рис. 5,а).

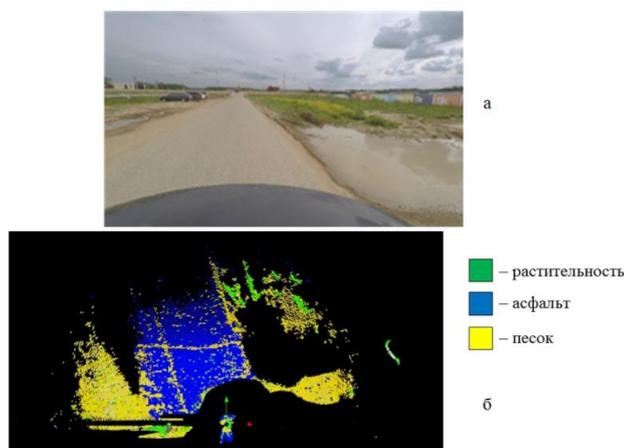


Рис. 5. Распознавание типов грунтов

Водные поверхности и очаги возгорания не отражают зондирующего сигнала лазерного сенсора, что также является признаком, позволяющим достоверно распознавать такие участки с учетом остальных признаков.

Распознавание типов грунтов позволяет оценить соответствующую им несущую способность и исключить попадающие в зону обзора СТЗ участки, пригодные для посадки по критерию геометрической проходимости, но не пригодные по критерию опорной проходимости, что существенно повышает безопасность автоматической посадки.

Так как дальнометрическое изображение зоны посадки сформировано в системе координат БВ, то в этой же системе координат определены и места посадки (в том числе и ближайшее к объекту управления), что дает необходимые данные для реализации автоматической посадки бортовой системой управления.

Заключение. Предложенные алгоритмы обработки дальнометрических и комплексированных изображений зоны посадки позволяют на доступных в настоящее время бортовых средства эффективно (в реальном времени и с высокой достоверностью) решать задачи выделения пригодных для посадки мест и обеспечить тем самым безопасную автоматическую посадку БВ. Работоспособность и эффективность предлагаемых алгоритмов подтверждена результатами работы соответствующих программно-аппаратных средств в реальных средах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Evdokimenkov V.N., Kim N.V., Kozorez D.A., Mokrova M.I.* Control of unmanned aerial vehicles during fire situation monitoring // INCAS Bulletin. – 2019. – No. 11. – P. 66-73
2. *Yan X., Wu X., Kakadiaris I.A., Shah S.K.* To Track or To Detect? An Ensemble Framework for Optimal Selection. In: Fitzgibbon A., Lazebnik S., Perona P., Sato Y., Schmid C. (eds) Computer Vision – ECCV 2012. LNCS. Vol. 7576. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2012.
3. *Türmer S., Leitloff J., Reinartz, P., et al.* Evaluation of selected features for car detection in aerial images // ISPRS Hannover Workshop. – 2011. – P. 14-17.
4. *Obermeyer K.* Path Planning for a UAV Performing Reconnaissance of Static Ground Targets in Terrain. In: AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Guidance, Navigation, and Control and Co-located Conferences. – 11 p. Chicago, USA, 2009.
5. *Kim N., Chervonenkis M.* Situational control unmanned aerial vehicles for traffic monitoring. Modern Applied Science 9 (5), Special Issue, Canadian Center of Science and Education. ISSN (printed): 1913-1844. – ISSN (electronic): 1913-1852, 2015.
6. *Lin, F., Lum, KY., Chen, B.M. et al.* Development of a vision-based ground target detection and tracking system for a small unmanned helicopter. Science in China Series F: Information Sciences, Springer, 2009. 52:2201.
7. *Коган И.М.* Прикладная теория информации. – М.: Радио и связь. 1981. – 216 с.
8. *Горелик А.Л., Скринские В.А.* Методы распознавания. – М.: Наука, 2004. – 207 с.
9. *David A. Forssyth, Jean Ponce.* Computer Vision: a Modern Approach // Prentice Hall, Ptr., Coperight, 2003 by Pearson Education, Inc.
10. *Kim N., Bodunkov N.* «Computer Vision in Control Systems - 3: Aerial and Satellite Image Processing». Vol. 3, Editors M. Favorskaya, Lakhmi C. Jain, Springer 2018. – 343 p.
11. *Kim N.V., Hyun Y.M. and Yang H.K.* Performance analysis of aircraft automatic landing system based on surface image processing // Proceedings WCSE/UKC 2002, Seoul, 2002.
12. *Ким Н.В., Кузнецов А.Г.* Автоматическая посадка малогабаритного летательного аппарата в особых ситуациях // Тр. международной конференции. – СПб., 2010.
13. *Загоруйко С.Н., Казьмин В.Н., Носков В.П.* Навигация БПЛА и 3D-реконструкция внешней среды по данным бортовой СТЗ // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2014. – № 8. – С. 62-68.
14. *Буйволов Г.А., Носков В.П., Руренко А.А., Распопин А.Н.* Аппаратно-алгоритмические средства формирования модели проблемной среды в условиях пересеченной местности // Сб. научных трудов «Управление движением и техническое зрение автономных транспортных роботов». – М.: ИФТП, 1989. – С. 61-69.
15. *Каляев А.В., Носков В.П., Чернухин Ю.В., Каляев И.А.* Однородные управляющие структуры адаптивных роботов. – М.: Наука, 1990. – 147 с.
16. *Носков В.П., Рубцов И.В.* Опыт решения задачи автономного управления движением мобильных роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2005. – № 12. – С. 21-24.5.
17. *Носков А.В., Рубцов И.В., Романов А.Ю.* Формирование объединенной модели внешней среды на основе информации видеокамеры и дальномера // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2007. – № 8. – С. 2-5.
18. *Вазаев А.В., Носков В.П., Рубцов И.В., Цариченко С.Г.* Распознавание объектов и типов опорной поверхности по данным комплексированной системы технического зрения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 2 (175). – С. 127-139.
19. *Вазаев А.В., Носков В.П., Рубцов И.В., Цариченко С.Г.* Комплексированная СТЗ в системе управления пожарного робота // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 1 (186). – С. 121-132.
20. *Вазаев А.В., Носков В.П., Рубцов И.В.* Нейросетевой модуль выбора эталонов для распознавания типов опорной поверхности // Перспективные системы и задачи управления: Матер. XIV Всероссийской научно-практической конференции и X молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах»; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2019. – С. 29-33.

REFERENCES

1. *Evdokimenkov V.N., Kim N.V., Kozorez D.A., Mokrova M.I.* Control of unmanned aerial vehicles during fire situation monitoring, *INCAS Bulletin*, 2019, No. 11, pp. 66-73
2. *Yan X., Wu X., Kakadiaris I.A., Shah S.K.* To Track or To Detect? An Ensemble Framework for Optimal Selection. In: Fitzgibbon A., Lazebnik S., Perona P., Sato Y., Schmid C. (eds) *Computer Vision – ECCV 2012*. LNCS. Vol. 7576. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012.
3. *Türmer S., Leitloff J., Reinartz, P., et al.* Evaluation of selected features for car detection in aerial images, *ISPRS Hannover Workshop*, 2011, pp. 14-17.
4. *Obermeyer K.* Path Planning for a UAV Performing Reconnaissance of Static Ground Targets in Terrain. In: *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Guidance, Navigation, and Control and Co-located Conferences*, 11 p. Chicago, USA, 2009.
5. *Kim N., Chervonenkis M.* Situational control unmanned aerial vehicles for traffic monitoring. *Modern Applied Science* 9 (5), Special Issue, Canadian Center of Science and Education. ISSN (printed): 1913-1844. ISSN (electronic): 1913-1852, 2015.
6. *Lin, F., Lum, KY., Chen, B.M. et al.* Development of a vision-based ground target detection and tracking system for a small unmanned helicopter. *Science in China Series F: Information Sciences*, Springer, 2009. 52:2201.
7. *Kogan I.M.* *Prikladnaya teoriya informatsii [Applied information theory]*. Moscow: Radio i svyaz'. 1981, 216 p.
8. *Gorelik A.L., Skripie V.A.* *Metody raspoznavaniya [Methods of recognition]*. Moscow: Nauka, 2004, 207 p.
9. *David A. Forssyth, Jean Ponce.* *Computer Vision: a Modern Approach, Prentice Hall, Ptr., Coperight, 2003 by Pearson Education, Inc.*
10. *Kim N., Bodunkov N.* «Computer Vision in Control Systems - 3: Aerial and Satellite Image Processing». Vol. 3, Editors M. Favorskaya, Lakhmi C. Jain, Springer 2018, 343 p.
11. *Kim N.V., Hyun Y.M. and Yang H.K.* Performance analysis of aircraft automatic landing system based on surface image processing, *Proceedings WCSE/UKC 2002, Seoul, 2002*.
12. *Kim N.V., Kuznetsov A.G.* Avtomaticheskaya posadka malogabaritnogo letatel'nogo apparata v osobykh situatsiyakh [Automatic landing of a small-sized aircraft in special situations], *Tr. mezhdunarodnoy konferentsii [Proceedings of the international conference]*, Saint Petersburg, 2010.
13. *Zagoruyko S.N., Kaz'min V.N., Noskov V.P.* Navigatsiya BPLA i 3D-rekonstruktsiya vneshney sredy po dannym bortovoy STZ [UAV Navigation and 3D reconstruction of the external environment according to the onboard STZ], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie [Mechatronics, automation, control]*, 2014, No. 8, pp. 62-68.
14. *Buyvolov G.A., Noskov V.P., Rurenko A.A., Raspopin A.N.* Apparato-algoritmicheskie sredstva formirovaniya modeli problemnoy sredy v usloviyakh peresechennoy mestnosti [Hardware-algorithmic means of forming a model of the problem environment in a rough terrain], *Sb. nauchnykh trudov «Upravlenie dvizheniem i tekhnicheskoe zrenie avtonomnykh transportnykh robotov» [Collection of scientific papers "Traffic control and technical vision of Autonomous transport robots"]*. Moscow: IFTP, 1989, pp. 61-69.
15. *Kalyaev A.V., Noskov V.P., Chernukhin Yu.V., Kalyaev I.A.* Odnorodnye upravlyayushchie struktury adaptivnykh robotov [Homogeneous control structures of adaptive robots]. Moscow: Nauka, 1990, 147 p.
16. *Noskov V.P., Rubtsov I.V.* Opyt resheniya zadachi avtonomnogo upravleniya dvizheniem mobil'nykh robotov [Experience in solving the problem of Autonomous motion control of mobile robots], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie [Mechatronics, automation, control]*, 2005, No. 12, pp. 21-24.5.
17. *Noskov A.V., Rubtsov I.V., Romanov A.Yu.* Formirovanie ob"edinennoy modeli vneshney sredy na osnove informatsii videokamery i dal'nomera [Formation of a unified model of the external environment based on information from a video camera and a rangefinder] *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie [Mechatronics, automation, control]*, 2007, No. 8, pp. 2-5.
18. *Vazaev A.V., Noskov V.P., Rubtsov I.V., TSarichenko S.G.* Raspoznavanie ob"ektov i tipov opornoj poverkhnosti po dannym kompleksirovannoy sistemy tekhnicheskogo zreniya [Recognition of objects and types of the reference surface according to the data of the integrated system of technical vision], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences]*, 2016, No. 2 (175), pp. 127-139.

19. Vazaev A.V., Noskov V.P., Rubtsov I.V., Tsarichenko S.G. Kompleksirovannaya STZ v sisteme upravleniya pozharnogo robota [Complexional STZ in the fire control system of the robot], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 1 (186), pp. 121-132.
20. Vazaev A.V., Noskov V.P., Rubtsov I.V. Neyrosetevoy modul' vybora etalonov dlya raspoznavaniya tipov opornoj poverkhnosti [Neural network module for selecting standards for recognizing types of reference surfaces], *Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya: Mater.XIV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii i X molodezhnoy shkoly-seminara «Upravlenie i obrabotka informatsii v tekhnicheskikh sistemakh»* [Perspective systems and management tasks: Materials of the XIV all-Russian scientific and practical conference and the X youth school-seminar "Management and processing of information in technical systems"]. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2019, pp. 29-33.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор М.Ю. Медведев.

Ким Николай Владимирович – Московский авиационный институт; e-mail: Nkim2011@list.ru; 125993, Москва, Волоколамское шоссе, 4; тел.: +79037208924; к.т.н.; профессор.

Носков Владимир Петрович – Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана; e-mail: noskov_mstu@mail.ru; 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5; тел.: +79166766057; кафедра специальной робототехника и мехатроники; к.т.н.; доцент; НИИ Специального машиностроения; зав. сектором.

Рубцов Иван Васильевич – e-mail: noskov_mstu@mail.ru; тел.: 84992636019; кафедра специальной робототехника и мехатроники; к.т.н.; доцент; НИИ Специального машиностроения; начальник отдела.

Аникин Виктор Андреевич – АО «Камов»; e-mail: rb@kamov.ru; 140070, Московская область, Люберецкий р-н, пос. Томилино, ул. Гаршина, 26/1; тел.: +74959944640; д.т.н.; гл. конструктор.

Kim Nikolay Vkadimirovich – Moscow Aviation Institute; e-mail: Nkim2011@list.ru; 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, 125993, Russia; phone: +79037208924; cand. of eng. sc.; professor.

Noskov Vladimir Petrovich – Bauman Moscow State Technical University; e-mail: noskov_mstu@mail.ru; 5, 2nd Baumanskaya street, Moscow, 105005, Russia; phone: +79166766057; the department of special robotics and mechatronics; cand. of eng. sc.; associate professor; NIISM; sector head.

Rubtsov Ivan Vasil'evich – e-mail: noskov_mstu@mail.ru; phone: +74992636019; the department of special robotics and mechatronics; cand. of eng. sc.; associate professor; NIISM; head of department.

Anikin Viktor Andreevich – Kamov Design Bureau; e-mail: rb@kamov.ru; 26/1, Garshin street, Tomilino, Lyubertsy district Moscow region, 140070, Russia; phone: +74959944640; dr. of eng. sc.; chief designer.

УДК 007:621.865.8

DOI 10.18522/2311-3103-2020-1-25-39

А.И. Наговицин, С.Н. Пестерев, Б.Б. Молоткова, И.В.Аксенов

**ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ОБУЧАЮЩИХ СИСТЕМ С ЭЛЕМЕНТАМИ
ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ
РАКЕТНЫХ ВОЙСК И АРТИЛЛЕРИИ, ПРИМЕНЯЮЩИХ
РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

Представлены задачи, решаемые перспективными РТК ВН в интересах РВиА. Сформулирован вывод о том, что проблема подготовки и повышения качества знаний специалистов РВиА применяющих робототехнические комплексы военного назначения остается одной из актуальных проблем высшего военно-профессионального образования и приобретает новые

аспекты рассмотрения. Показано, что одним из эффективных путей решения проблемы подготовки и повышения качества знаний специалистов РВиА является разработка и внедрение в образовательный процесс компьютерных обучающих систем с элементами виртуальной реальности и 3D визуализации изучаемых образцов техники и вооружения. Кратко изложены основные возможности, разработанной в Михайловской военной артиллерийской академии используемой в образовательном процессе компьютерной информационно-справочной системы «Компендиум РВиА». Приведены предварительные результаты проводимого педагогического эксперимента с применением «Компендиума РВиА», отмечены основные факторы, повышающие эффективность образовательного процесса. На основе результатов педагогического эксперимента сделан обоснованный вывод, что применение КИСС «Компендиум РВиА» позволяет повысить эффективность обучения, уменьшить сроки освоения техники, т.е. более эффективно использовать учебное время и как результат – сократить стоимость подготовки специалистов и количество моторесурсов.

Ракетные войска и артиллерия; робототехнический комплекс военного назначения; беспилотный летательный аппарат; ракетно-артиллерийское вооружение; обучающая система; эффективность обучения; педагогический эксперимент; военно-профессиональное образование; профессиональная компетенция; современные информационные технологии; виртуальная реальность; компендиум; информационно-справочная система; автоматизированный обучающий комплекс.

A.I. Nagovitsin, S.N. Pesterev, B.B. Molotkova, I.V. Aksenov

EXPERIENCE IN USING TRAINING SYSTEMS WITH VIRTUAL REALITY ELEMENTS FOR TRAINING SPECIALISTS OF MISSILE FORCES AND ARTILLERY USING ROBOTIC SYSTEMS FOR MILITARY PURPOSES

The paper presents the tasks to be solved by promising RTC VN in the interests of Rvi. The conclusion is formulated that the problem of training and improving the quality of knowledge of Rvi specialists using military robotic systems remains one of the urgent problems of higher military professional education and acquires new aspects of consideration. It is shown that one of the effective ways to solve the problem of training and improving the quality of knowledge of Rvi specialists is to develop and implement computer-based training systems with elements of virtual reality and 3D visualization of the studied samples of equipment and weapons in the educational process. The main features of the computer information and reference system "compendium of the Rvi" developed at the Mikhailovsky military artillery Academy and used in the educational process are briefly described. Preliminary results of the conducted pedagogical experiment with the use of the "Rvi compendium" are presented, and the main factors that increase the effectiveness of the educational process are noted. Based on the results of the pedagogical experiment made a reasonable inference that the use of KISS "compendium Rvia" allows to increase learning efficiency, to reduce terms of development of technology that is more efficient use of training time and as a result reduce the cost of training and the number of vehicles.

Rocket troops and artillery; military-purpose robotic complex; unmanned aerial vehicle; rocket and artillery weapons; training system; learning efficiency; pedagogical experiment; military professional education; professional competence; modern information technology; virtual reality; compendium; information and reference system; automated training complex.

Введение. Опыт локальных войн и вооруженных конфликтов последних десятилетий, а также проводимые мероприятия по строительству и развитию Вооруженных Сил Российской Федерации, свидетельствуют о возрастающей роли робототехнических комплексов военного назначения различных типов [1].

В настоящее время на снабжение Вооруженных Сил Российской Федерации приняты робототехнические комплексы различного назначения, в том числе робототехнические комплексы с беспилотными летательными аппаратами. За последнее время накоплен достаточно большой опыт применения РТК ВНи в интересах РВиА СВ, в особенности применения комплексов с БЛА для обслуживания стрельбы артиллерии [2]. Так уже успешно практически отработано выполнение нескольких вариантов огневых задач артиллерийской батареи 152 мм самоходных

гаубиц 2С3М с помощью комплекса воздушной разведки (КВР), оснащенного БЛА «Орлан-10» и "Орлан-30", с адаптированной для обслуживания стрельбы артиллерии версией специального математического и программного обеспечения. Кроме того, отработан вариант проведения пристрелки и осуществления контроля стрельбы на поражение кочующего миномета с помощью комплекса воздушной разведки и другие. Есть примеры применения БЛА типа «Форпост» для ведения воздушной разведки в интересах артиллерии.

Вместе с тем, анализ проведенный в ряде источников [3–9] подтверждает необходимость разработки и применения различных РТК ВН в интересах конкретных частей и подразделений Сухопутных войск.

За последнее время ученые Михайловской военной артиллерийской академии в ряде научно-исследовательских работ провели обоснование необходимости разработки и внедрения (принятия на вооружение) боевых робототехнических комплексов предназначенных специально для РВиА. Такие как РТК артиллерийской разведки (РТК АР), РТК воздушной артиллерийской разведки, РТК уничтожения бронеектов и отдельных целей (дистанционный управляемый самоходный противотанковый ракетный комплекс) и РТК огневого поражения (подвижная огневая точка).

При этом были заданы основные тактико-технические требования к ним и обоснованы рекомендации по их созданию и интеграции в систему робототехнических комплексов ВС РФ [12–20]. Становится очевидным, что помимо ограниченного применения в интересах РВиА СВ отдельных БЛА из состава робототехнических подразделений общевойсковых соединений, на вооружении рода войск будут приняты специальные РТК ВН, которые будут штатно входить в состав ракетных и артиллерийских частей и подразделений.

Анализ [10] показывает, что задачами, решаемыми перспективными РТК ВН в интересах РВиА, могут быть:

- ◆ освещение (вскрытие) наземной, надводной обстановок и выдачу целеуказания на применение оружия;
- ◆ наблюдение за полем боя (плацдармом высадки морского десанта) в реальном масштабе времени;
- ◆ выдача данных целеуказания ракетному (реактивному) оружию наземных комплексов,
- ◆ обслуживание применения высокоточных боеприпасов с лазерной системой наведения;
- ◆ борьба с танками противника;
- ◆ оперативная геодезическая привязка сил и средств (элементов боевых порядков войск (сил)), обеспечение получения высокоточной геопрограммной информации о местности и решение других задач топогеодезического и навигационного обеспечения;
- ◆ доставка (подвоз) боеприпасов и ряд других.

Учитывая сложность и многообразие перечисленных задач, проблема подготовки и повышения качества знаний специалистов РВиА применяющих робототехнические комплексы военного назначения остается одной из актуальных проблем высшего военно-профессионального образования и приобретает новые аспекты рассмотрения.

Опыт создания и применения обучающих систем с элементами виртуальной реальности. Одним из наиболее доступных, но чрезвычайно эффективных путей решения проблемы подготовки и повышения качества знаний специалистов РВиА является разработка и внедрение в образовательный процесс компьютерных обучающих систем с элементами виртуальной реальности и 3D визуализации изучаемых образцов техники и вооружения.

Мысль о том, что в повседневном обучении важно использовать самые передовые технологии, не покидает умы не только современных исследователей, но и практически каждого из нас. По данным специалистов в области лингвистики и психологии [11], самые благоприятные условия для усвоения новых знаний – в детском и юношеском возрасте.

Однако, отсутствие интереса, расщепленность и неумение концентрироваться на непростых вещах не позволяют нам эффективно получать образование в любом возрасте. А современная система образования конкурирует с развлекательной сферой и нуждается в механизмах восприятия, которые позволят вовлечь обучающихся в процесс усвоения новых знаний. Ведь эффективным обучением движет интерес, который нужно сначала сформировать, а затем поддержать. Вот только в XXI веке вряд ли можно увлечь обучающихся рисунками, просмотром старых фильмов или чтением стремительно устаревающей литературы. Поэтому сегодня в образовании всё популярнее устройства с поддержкой VR и AR.

В Михайловской военной артиллерийской академии разработана и проходит апробацию в ходе педагогического эксперимента компьютерная информационно-справочная система «Компендиум РВиА» (далее КИСС «Компендиум РВиА») (рис. 1).

Компендиум ракетных войск и артиллерии – это компьютерная информационно-справочная система с элементами виртуальной реальности.

Компендиум (Компендий) – (от лат. *compendium* – сокращение, путеводитель, прямой путь) – сокращенное изложение основных положений какой-либо дисциплины.



Рис. 1. Главное меню компьютерной информационно-справочной системы «Компендиум РВиА»

По сути это электронная интерактивная информационно-справочная тренажерная система с элементами виртуальной реальности ракетно-артиллерийского вооружения, в части наземного оборудования ракетных комплексов Сухопутных войск, противотанковых управляемых ракетных комплексов, реактивных систем залпового огня, наземной артиллерии и минометов, а также средств управления, разведки и обеспечения стрельбы.

Информационно-справочная система включает четыре раздела:

- ◆ общая информация;
- ◆ вооружение и военная техника;
- ◆ автоматизированный обучающий комплекс;
- ◆ тренажеры.

«Компендиум РВиА» позволяет не только быстро получить развернутую справочную информацию по отдельным образцам ракетно-артиллерийского вооружения, ознакомиться с внутренним пространством рассматриваемых образцов

вооружения в формате 3D (360 градусов) при помощи компьютера, но и с помощью встроенного автоматизированного обучающего комплекса (АОК) (рис. 2) изучить их назначение, состав и тактико-технические характеристики.



Рис. 2. Автоматизированный обучающий комплекс РВиА

С помощью технологий виртуальной реальности (virtualreality (VR) создана 3D-визуализация расположения образцов вооружения в местах постоянной дислокации, компоновки приборного состава в образцах вооружения и военной техники (3D-туры).

Продолжается создание обучающих курсов, позволяющих проводить занятия по изучению назначения, состава, тактико-технических характеристик, порядка подготовки к работе вооружения и военной техники, в том числе робототехнических комплексов военного назначения, используя персональные компьютеры и шлемы (очки) виртуальной реальности (рис. 3).



Рис. 3. Самостоятельная работа курсантов с применением автоматизированного обучающего комплекса РВиА с элементами виртуальной реальности

При просмотре внутреннего объема изучаемых объектов, а также видео материалов, снятых 360-градусной камерой, можно смотреть по сторонам, под ноги и над собой, используя курсор мыши или наклоняя и поворачивая голову в очках VR.

Встроенные в камеру микрофоны создают эффект присутствия при просмотре отснятого видео. Дикторский текст может комментировать изучаемые объекты (рис. 4, 5).



Рис. 4. Панорама 360 внутреннего объема самоходной пусковой установки ракетного комплекса «Точка-У»



Рис. 5. Панорама 360 внутреннего объема 152-ММ самоходной гаубицы 2С19М

При переводе взгляда на отдельные составные элементы они сопровождаются всплывающими баннерами, содержащими их подробные характеристики (рис. 6).

ЛАЗЕРНЫЙ ВИЗИР-ДАЛЬНОМЕР (1Д25) ✕

НАЗНАЧЕНИЕ

Лазерный визир-дальномер 1Д25 предназначен для:

- измерения полярных координат артиллерийских орудий;
- топогеодезической привязки элементов боевых порядков артиллерии;
- выдачи полярных координат на ЭВМ.

КОМПЛЕКТ ДАЛЬНОМЕРА

- приемопередатчик (визир-дальномер);
- комплект ЗИП (одноразовый);
- техническая документация: паспорт, ТО и ИЭ.

ОСНОВНЫЕ ТТХ

Пределы измерения дальности до орудия, м:	
- минимально	60
- максимально	2000
Дальность распознавания орудий в ночных условиях, м	не менее 500
Максимальная ошибка измерения дальности, м	± 10
Увеличение визира, крат.:	
- дневного	7,3/ 18
- ночного	4,8
Поле зрения визира, град.:	
- дневного	8/ 3,33
- ночного	11
Перисконичность, мм	345
Диапазон наведения, д.у.	
- в горизонтальной плоскости, угол α	0-00.. 60-00
- в вертикальной плоскости, угол β	-5-00.. 5-00
Максимальная ошибка измерения углов, д.у.	±0-01
Время готовности к измерению дальности, сек., не более	20
Масса дальномера, кг, не более	27

1. Тумблер "НОЧЬ".
2. Рукоятка "СЕТКА".
3. Кнопка "СТРОБ".
4. Тумблер "ОБОГРЕВ".
5. Механизм вертикального наведения.
6. Кнопка "ИЗМЕРЕНИЕ".
7. Тумблер "ЗАЩИТА".
8. Кнопка "ЗВУК".
9. Окуляр визира
10. Тумблер "ПИТАНИЕ".
11. Переключатель "ДЕНЬ/НОЧЬ".
12. Рукоятка "СТРОБ".
13. Кнопка "УГЛЫ".
14. Переключатель "ИНФОРМАЦИЯ".
15. Кнопка "ИЗМЕРЕНИЕ".
16. Механизм "УСТАНОВКА α ".
17. Окуляр.

Рис. 6. Баннер с характеристиками лазерного визира-дальномера

Можно приблизить или отдалить (масштабируемость объекта) интересующий объект для детального его изучения, и ряд других возможностей, позволяющих самостоятельно изучать образцы вооружения используя АОК.

Кроме того, входящие в «Компендиум РВиА» тренажеры (рис. 7), позволяют самостоятельно изучить и получить определенные навыки по подготовке к работе, включению и настройке основных средств связи командно-штабных машин, орудий, боевых машин и пусковых установок и наземных пунктов дистанционного управления РТК ВН, в том числе, беспилотных летательных аппаратов в режиме обучения, тренировки и контроля.

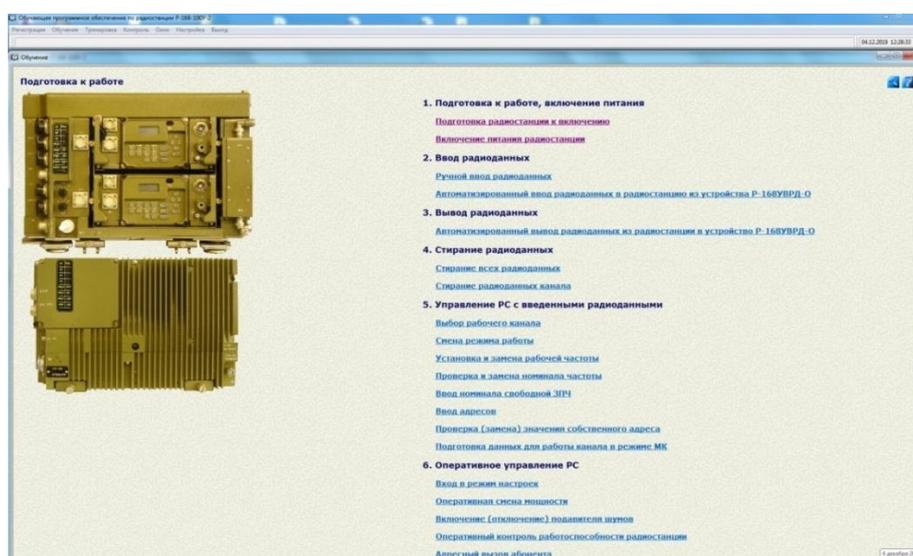


Рис. 7. Компьютерный тренажер радиостанции P-168-100-U2

К основным преимуществам компьютерной информационно-справочной системы «Компендиум РВиА» можно отнести:

- ◆ быстрый доступ к развернутой информации по назначению, составу, тактико-техническим характеристикам основных образцов вооружения в электронном виде;
- ◆ возможность «проникнуть» внутрь образца вооружения (с эффектом присутствия) для понимания состава и размещения элементов внутри объекта;
- ◆ интерактивность (возможность быстро находить, а при необходимости изменять и дополнять информацию);
- ◆ возможность получить определенные навыки по подготовке к работе, включению и настройке основных средств связи командно-штабных машин, орудий, боевых машин и пусковых установок и наземных пунктов дистанционного управления РТК ВН в режиме самостоятельного обучения, тренировки и контроля;
- ◆ интуитивно понятное меню.

При подготовке операторов БЛА, к примеру, с помощью камеры 360 можно снять видеоролик, построенный на основе фотореалистичных круговых панорам внутри наземного пункта дистанционного управления (НПДУ) – внутри КШМ (рис. 8) или снаружи – в окопе (рис. 9) и потом, надев очки виртуальной реальности наблюдать за работой расчета, как бы присутствуя внутри НПДУ.

Создается эффект полного погружения в пространство. На рис. 10 представлен скриншот видеофрагмента посадки БЛА "Орлан-10" снятый на камеру 360.



Рис. 8. Панорамы 360 внутреннего объема НПДУ БЛА «Орлан- 10»



Рис. 9. Панорамы 360 выносного (в окопе) НПДУ БЛА «Орлан- 10»



Рис. 10. Видеофрагмент «Посадка БЛА «Орлан-10» снятого камерой 360

В результате тестирования КИСС «Компендиум РВиА» удалось выявить основные преимущества применения данной технологии:

- ◆ возможность интегрировать любые объекты визуализации в виртуальное пространство;
- ◆ трехмерность (СФЕРА) по всему объему виртуального пространства;
- ◆ глубокая динамическая масштабируемость объекта;
- ◆ интерактивность с мгновенным обращением к любому объекту с целью получения различного рода информации;
- ◆ детализация любых объектов по всему объему виртуального пространства без искажения представляемой информации;

- ◆ позволяет создать эффект полного погружения обучающегося в область предметных знаний;
- ◆ единая программная среда;
- ◆ возможность самостоятельного управления туром.

Одним из ответов современной образовательной политики России на вопрос эффективного использования компьютера в образовательном процессе явилось создание современных образовательных технологий с элементами виртуальной реальности. Их внедрение потребовало проведения так называемых педагогических экспериментов в ходе которых осуществляется диагностика уровней усвоения знаний и умений по выбранным показателям и критериям. На рис. 11 представлена архитектура автоматизированного обучающего комплекса (АОК), включающего "Компендиум РВ и А" в которой компонента поддержки оценивания знаний и умений позволяет с достаточной степенью точности оценить уровень усвоения изучаемого материала и выработать рекомендации по дальнейшим действиям.



Рис. 11. Архитектура автоматизированного обучающего комплекса

Анализ результатов педагогического эксперимента. В настоящее время получены предварительные результаты педагогического эксперимента по применению в образовательном процессе Михайловской артиллерийской академии КИСС «Компендиум РВиА».

В ходе педагогического эксперимента проводился военно-экономический сравнительный анализ двух вариантов обучения.

Сравнение при проведении занятий в обычном варианте (без применения «Компендиума РВиА») и с применением КИСС «Компендиум РВиА» проводилось по показателям (*Затраты – Время – Эффект*) [20].

Затраты оценивались количеством энергоресурсов необходимых для проведения занятий – *Qэ*.

Кроме этого, оценивалось *Время* необходимое для освоения учебных вопросов по изучаемой теме – *Туч*.

Эффект применения КИСС «Компендиум РВиА» было принято оценивать качеством усвоения изучаемого материала слушателями – *Куэв*.

На рис. 12. приведена гистограмма, характеризующая *Затраты* энергоресурсов необходимых для проведения занятий с применением КИСС «Компендиум РВиА» и при проведении занятий в обычном варианте.

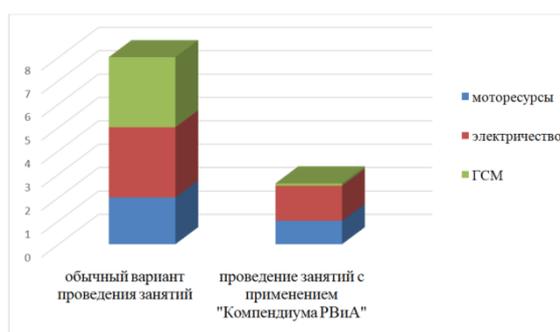


Рис. 12. Гистограмма, характеризующая затраты

Из приведенной гистограммы видно, что при проведении занятий без применения КИСС «Компендиум РВиА» расходуются и моторесурсы изучаемой техники, и электричество и горюче-смазочные материалы.

При применении КИСС «Компендиум РВиА» затраты значительно снижаются.

На рис. 13 приведена диаграмма временных затрат на изучение и усвоение материала различных тем занятий как с применением КИСС «Компендиум РВиА», так и без.

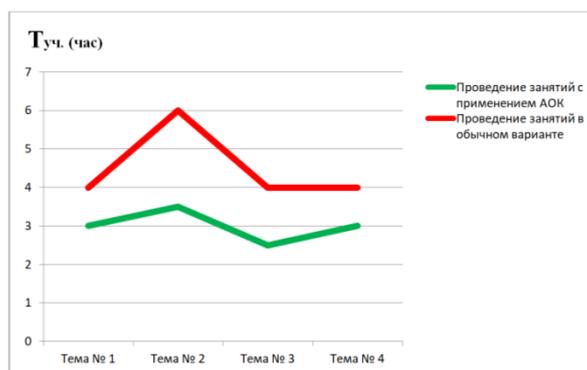


Рис. 13. Диаграмма временных затрат

Как видно из диаграммы, времени для изучения учебного материала, при применении «Компендиума РВиА» требуется меньше.

Теперь что касается оценки третьего показателя – качества усвоения учебного материала. Наиболее точно (корректно) качество усвоения материала можно оценить только по завершении педагогического эксперимента, однако есть предварительные результаты.

Несколько уже проведенных занятий с применением «Компендиума РВиА» показали, что качество усвоения материала **К_{ув}** выше, чем при проведении занятий в обычном варианте.

Это обстоятельство объясняется еще и тем, что молодые люди с большим интересом изучают учебный материал при помощи гаджетов и современных технологий, нежели просто по бумажному учебнику [20].

Приведенные результаты являются предварительными и получены на основании, в основном, отзывов и выводов преподавателей, участвующих в педагогическом эксперименте по дисциплинам «Эксплуатация автоматизированных систем специального назначения» и «Устройство и эксплуатация средств связи и радиоэлектронная борьба».

Но даже сейчас, учитывая пусть субъективные, но положительные оценки преподавателей, можно говорить о значительном снижении затрат энергоресурсов и повышении эффективности проводимых занятий с применением «Компендиума РВиА» в целом.

Предварительные результаты проводимого педагогического эксперимента с применением «Компендиума РВиА» позволяют утверждать, что основными факторами, повышающими эффективность образовательного процесса можно считать возможность:

- а) самостоятельного изучения назначения, состава, ТТХ образцов вооружения в режиме виртуального тура;
- б) создания эффекта присутствия в объекте;
- в) одновременного изучения большим количеством обучающихся объекта с ограниченным внутренним пространством;
- г) значительной экономии моторесурсов;
- д) высокой мотивации молодых людей на изучение и освоение новой техники на основе применения современных технологий и гаджетов.

Таким образом, применение КИСС «Компендиум РВиА» позволяет повысить эффективность обучения, уменьшить сроки освоения техники, т.е. более эффективно использовать учебное время и как результат – сократить стоимость подготовки специалистов и количество моторесурсов.

Заключение. Высокий уровень оснащения РВ и А роботизированными средствами обеспечит им возможность ведения современных сетевых войн в том числе и на основе группового применения РТК. Следовательно, подготовка высококлассных специалистов РТК в составе артиллерийских (реактивных) и разведывательных подразделений РВиА должна стать одним из основных направлений развития рода войск.

В заключение заметим, что формирование профессиональных компетенций с учетом специализации обучающихся и инструментов современных информационных технологий на основе деятельностного подхода позволяет изменить функции субъектов и объектов образовательного процесса.

То есть переход от простой передачи знаний обучаемым к управлению познавательной деятельностью обучающихся позволяет более эффективно готовить специалистов, способных самостоятельно вести поиск новых идей и способов их применения на практике.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Кравченко А.Ю., Стукало Ю.Е.* Проблемы и перспективы создания робототехнических комплексов военного назначения // Избранные Труды Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». – 2015. – Т. I. – С. 92-96.
2. *Карпович А.В.* Артиллерийские системы и беспилотные летательные аппараты в контр-террористических операциях // Тр. Восьмой Всероссийской научно-практической конференции (апрель 2013г.С-Пб). – СПб.: Университет ГПС МЧС России, 2013. – С. 75-93.
3. *Калыев И.А., Шеремет И.А.* Военная робототехника: выбор пути // Избранные Труды Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». – 2015. – Т. I. – С. 161-163.
4. *Рубцов И.В.* Вопросы состояния и перспективы развития отечественной наземной робототехники военного и специального назначения // Избранные Труды Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». – 2015. – Т. II. – С. 64-70.
5. *Шеремет И.Б., Рудянов В.С., Рябов А.В., Хрущев В.С.* Проблемы развития роботизированного вооружения Сухопутных войск // Избранные Труды Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». – 2015. – Т. II. – С. 71-73.
6. *Кудряшов В.Б., Латишов В.С., Носков В.П., Рубцов И.В.* Проблемы роботизации ВВТ в части наземной составляющей // Избранные Труды Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». – 2015. – Т. II. – С. 74-76.
7. *Анисимов В.Г., Ведерников Ю.В., Гарькушев А.Ю., Сазыкин А.М.* Научно-методическое сопровождение интеграции высокотехнологичных инноваций в процессы разработки высокоточного оружия // Вопросы оборонной техники. Сер. 16: Технические средства противодействия терроризму.
8. *Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Самоленков В.А.* Введение в теорию эффективности боевых действий ракетных войск и артиллерии: монография. Военная академия Генерального штаба Вооруженных Сил Российской Федерации. – М., 2008. – 180 с.
9. *Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Герцев В.Н.* Оценка эффективности системы ракетно-артиллерийского вооружения ракетных войск и артиллерии // Военная мысль. – 2001. – № 4. – С. 39-46.
10. *Наговицин А.И., Молоткова Б.Б.* Робототехнические комплексы военного назначения, перспективы их применения в РВиА СВ // Тр. Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». – 2017. – Т. I.
11. *Лейтес Н.С.* Умственные способности и возраст. – М.: Педагогика, 1971. – 277 с.
12. *Буренок В.М., Леонов А.В., Пронин А.Ю.* Военно-экономические и инновационные аспекты интеграции нетрадиционных видов оружия в состав системы вооружения. – М.: Издательская группа «Граница», 2014. – С. 53-58.
13. *Буренок В.М.* Системное проектирование развития вооружения и военной техники // Военная мысль. – 2004. – № 6.
14. *Буренок В.М.* Развитие системы вооружения и новый облик ВС РФ // Защита и безопасность. – 2009. – № 2.
15. *Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Кежаев В.А., Свертилов Н.И., Шатохин Д.В.* Методы имодели стандартизации и унификации в управлении развитием военно-технических систем. Военная академия Генерального штаба Вооруженных Сил Российской Федерации. – М., 2004.
16. *Корчак В.Ю., Леонов А.В., Борисенков И.Л.* Интеграция нетрадиционного вооружения в состав системы вооружения // Вооружение и экономика». – 2011. – Вып. № 2.
17. *Баканев С.А.* Опыт и перспективы применения робототехнических комплексов военного назначения в интересах ракетных войск и артиллерии Сухопутных войск // Матер. 19-й Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы защиты и безопасности». – 2016.
18. *Шеремет И.Б., Рудянов Н.А., Рябов А.В., Хрущев В.С.* Групповое применение наземных РТК при ведении боевых действий в составе общевойсковых формирований сухопутных войск // Сб. материалов X Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» и VI молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах». Т. I.

19. Лапинов В.С., Носков В.П., Рубцов И.В., Рудянов Н.А., Рябов А.В., Хрущев В.С. Бой в городе. Боевые и обеспечивающие роботы в условиях урбанизированной территории // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 3 (116). – С. 142-146.
20. Наговицин А.И. Молоткова Б.Б. и др. Формирование научно-исследовательской компетенции курсантов в инновационной работе военно-научного общества по приоритетным направлениям моделирования боевых действий // Вестник военного образования. – 2019. – № 1.– С.23.

REFERENCES

1. Kravchenko A.Yu., Stukalo Yu.E. Problemy i perspektivy sozdaniya robototekhnicheskikh kompleksov voennogo naznacheniya [Problems and perspectives of creating robototechnicsmilitary complexes], *Izbrannye Trudy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya»* [Chosen Works off the All Russian scientificpracticalconference “Perspectives system and tasks control”], 2015, Vol. I, pp. 92-96.
2. Karpovich A.V. Artilleriyskie sistemy I bespilotnye letatel'nye apparaty v kontrterroristicheskikh operatsiyakh [Artillery systems and unmanned flying apparatus in counterterrorismoperations], *Trudy Vos'moy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (aprel' 2013 g. S-Pb)* [Workes Eight off the All Russian scientific-practical conference (april2013y S-Pb)]. St. Petersburg: Universitet GPS MChSRossii, 2013, pp. 75-93.
3. Kalyaev I.A., Sheremet I.A. Voennaya robototekhnika: izbor puti [Military robototechnics: choice ways], *Izbrannye Trudy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Perspektivnye sistemy I zadachi upravleniya»* [Chosen Works off the All Russian scientific practical conference “Perspectives system and tasks control”], 2015, Vol. I, pp. 161-163.
4. Rubtsov I.V. Voprosy sostoyaniya i perspektivy razvitiya otechestvennoy nazemnoy robototekhniki voennogo i spetsial'nogo naznacheniya [Question form and Perspectives developmentnative ground robototechnics military and special-purpose], *Izbrannye TrudyVserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya»* [Chosen Works off the All Russia scientific-practical conference “Perspectivesystem and tasks control”], 2015, Vol. II, pp. 64-70.
5. Sheremet I.B., Rudianov V.S., Ryabov A.V., Khrushchev V.S. Problemy razvitiya robotizirovannogo vooruzheniya Cukhoputnykh voysk [Problems development robotic armedArmy], *Izbrannye Trudy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Perspektivnye sistemy I zadachi upravleniya»* [Chosen Works off the All Russian scientific-practical conference“Perspectives system and tasks control”], 2015, Vol. II, pp. 71-73.
6. Kudryashov V.B., Lapshov V.S., Noskov V.P., Rubtsov I.V. Problemy robotizatsii VVT v chaste nazemnoy sostavlyayushchey [Problems robotics AMT in patch ground component], *Izbrannye Trudy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya»* [Chosen Works off the All Russian scientific-practical conference “Perspectivesystem and tasks control”], 2015, Vol. II, pp. 74-76.
7. Anisimov V.G., VedernikovYu.V., Gar'kushevA.Yu., Sazykin A.M. Nauchno-metodicheskoe soprovozhdenie integratsii vysokotekhnologichnykh innovatsiy v protsessy razrabotki vysokotochnogo oruzhiya [Scientific and methodological support of integration of high-techinnovation in the design of precision-guided weapons], *Voprosy oboronnoy tekhniki. Ser. 16: Tekhnicheskie sredstva protivodeystviya terrorizmu* [Defense technology. Series 16: Technicalmeans for countering terrorism].
8. Anisimov V.G., Anisimov E.G., Samolenkov V.A. Vvedenie v teoriyu effektivnosti boevykh deystviy raketnykh voysk I artillerii: monografiya. Voennay akademiya General'nogo shtaba Vooruzhennykh Sil Rossiyskoy Federatsii [Introduction to the theory of efficiency of combatactions of rocket troops and artillery: Monograph. Military Academy of the General staff ofthe Armed Forces of the Russian Federation]. Moscow, 2008, 180 p.
9. Anisimov V.G., Anisimov E.G., Gertsev V.N. Otsenivanie effektivnosti sistemy raketnoartilleriyskogo vooruzheniya raketnykh voysk I artillerii [Evaluation of the effectiveness of thesystem of rocket and artillery armament of rocket troops and artillery], *Voennaya mys'* [Militarythought], 2001, No. 4, pp. 39-46.

10. Nagovitsin A.I., Molotkova B.B. Robototekhnicheskie komplekсы voennogo naznacheniya, perspektivy ikh primeneniya v RViASV [Robotic systems for military use, prospects for their application IN the Russian space Agency] *Izbrannye Trudy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Perspektivnye sistemy I zadachi upravleniya»* [Chosen Works off the All Russian scientificpractical conference “Perspectives system and tasks control”], 2017, Vol. I, pp. 6-20.
11. Leytes N.S. Umstvennyye sposobnosti I vozrast [Mental capacity and age]. Moscow: Pedagogika, 1971, 277 p.
12. Burenok V.M., Leonov A.V., Pronin A.Yu. Voenno-ekonomicheskie I innovatsionnyye aspekty integratsii netraditsionnykh vidov oruzhiya v sostav sistemy vooruzheniya [Military-economicand innovative aspects integration of non-traditional weapons in the weapons]. Moscow:Izdatel'skayagruppa «Granitsa», 2014, pp. 53-58.
13. Burenok V.M. Sistemnoe proektirovanie razvitiya vooruzheniyai voennoy tekhniki [Systems engineering development of weapons and military equipment], *Voennay amysl'* [Militarythought], 2004, No. 6.
14. Burenok V.M. Razvitie sistemy vooruzheniya I novyy oblik VS RF [Development of weaponssystems and a new image of the RF armed forces], *Zashchita I bezopasnost'* [The protectionand security], 2009, No. 2.
15. Anisimov V.G., Anisimov E.G., Kezhaev V.A., Svertilov N.I., Shatokhin D.V. Metody I modeli standartizatsii i unifikatsii v upravlenii razvitiem voenno-tekhnicheskikh sistem. Voennaya akademiya General'nogo shtaba Vooruzhennykh Sil Rossiyskoy Federatsii [Methods and modelsof standardization and unification in the management of the development of militarytechnicalsystems: Military Academy of the General staff of the Armed Forces of the RussianFederation]. Moscow, 2004.
16. Korchak V.Yu., Leonov A.V., Borisenkov I.L. Integratsiya netraditsionnogo vooruzheniya v sostav sistemy vooruzheniya [Integration of non-traditional weapons in the weapons], *Elektronnyy nauchnyy zhurnal «Vooruzhenie i ekonomika»* [The electronic scientific journal "Arms and the economy"], 2011, Issue No. 2.
17. Bakaneev S.A. Opyt I perspektivy primeneniya robototekhnicheskikh kompleksov voennogo naznacheniya v interesakh raketnykh voysk I artillerii Sukhoputnykh voysk [Experience andprospects of application of robotic systems for military purposes in the interests of missiletroops and artillery of the Land forces], *Materialy 19-y Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Aktual'nye problem zashchity i bezopasnosti»* [Materials of 19-th all-Russian scientific-practical conference "Actual problems of protection and security"], 2016.
18. Sheremet I.B., Rudianov N.A., Ryabov A.V., Khrushchev V.S. Grupповое primeneniye nazemnykh RTK pri vedenii boevykh deystviy v sostave obshchevoyskovykh formirovaniy sukhoputnykh voysk [Group the terrestrial RTK while conducting combat operations as part ofcombined arms formations of the army], *Sbornik materialov X Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya» i VI molodezhnoy shkoly-seminara «Upravlenie i obrabotka informatsii v tekhnicheskikh sistemakh»* [The collection of materials of X all-Russian scientific-practical conference "Advanced systems and control problems" and VI international school-seminar "Management and processing of informationin technical systems"]. Vol. I.
19. Lapshov V.S., Noskov V.P., Rubtsov I.V., Rudianov N.A., Ryabov A.V., Khrushchev V.S. Boy v gorode. Boevye i obespechivayushchie roboty v usloviyakh urbanizirovannoy territorii [Fightin the city. Combat and supporting robots in urban areas], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskije nauki* [IzvestiyaSFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 3 (116), pp. 142-146.
20. Nagovitsin A.I., Molotkova B.B. Formirovanie nauchno-issledovatel'skoy kompetentsii kursantov v innovacionnoy rabote voenno-nauchnogo obchestva po prioritnym napravleniyam modelirovaniya boevykh deystviy [Formation of research competence of cadets in the innovative work of the military scientific society in priority areas of combat simulation], *Vestnik voennogo obrazovaniya* [Bulletin of the military education"], 2019, No. 1.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор К.А. Злотников.

Наговицин Александр Иванович – Михайловская военная артиллерийской академия; e-mail: alexander@nagovitsin.ru; 195009, г. Санкт-Петербург, ул. Комсомола, 22; тел.: +79112160000; кафедра автоматизированного управления ракетными войсками и артиллерией; к.в.н.; доцент.

Пестерев Сергей Николаевич – e-mail: pestruy@inbox.ru; тел.: +79052221824; кафедра управления ракетными ударами и огнем артиллерии в бою и операции; начальник кафедры; к.в.н.; доцент.

Молоткова Баира Борисовна – e-mail: bbmolotkova@bk.ru; тел.: +79818035441; кафедра автоматизированного управления ракетными войсками и артиллерией; доцент; к.п.н.; доцент.

Аксенов Иван Владимирович – e-mail: alexander@nagovitsin.ru; тел.: +79112160000; курсант факультета артиллерийской разведки и АСУ.

Nagovicin Alexander Ivanovich – Mikhailovskaya Artillery Military Academy; e-mail: alexander@nagovitsin.ru; 22, Komsomol street, St. Petersburg, 195009, Russia; phone: +79112160000; the department of automated control of rocket troops and artillery; associate professor; cand. of mil. sc.; associate professor.

Pesterev Sergey Nikolaevich – e-mail: pestruy@inbox.ru; phone: +79052221824; the department of missile strikes and artillery fire control in combat and operations; head of the department; cand. of mil. sc.; associate professor.

Molotkova Baira Borisovna – e-mail: bbmolotkova@bk.ru; phone: +79818035441; the department of automated control of rocket troops and artillery; associate professor; cand. of ped. sc.; associate professor.

Aksenov Ivan Vladimirovich – e-mail: alexander@nagovitsin.ru; phone: +79112160000; cadet of the faculty of artillery intelligence and ACS.

УДК 004.896

DOI 10.18522/2311-3103-2020-1-39-51

А.Л. Ронжин, К.Т. Нго, В.В. Нгуен

ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ОБМЕНОМ ФИЗИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ МЕЖДУ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКОЙ РАЗНОЙ СТЕПЕНИ РОБОТИЗАЦИИ*

Рассматривается проблема управления взаимодействием беспилотных летательных аппаратов (БЛА) с наземными сервисными роботизированными платформами, осуществляющими функции транспортировки и передачи физических ресурсов, необходимых для выполнения сельскохозяйственных операций на открытом грунте. Совместное использование гетерогенных наземных и воздушных средств расширяет функциональные и сенсорные возможности роботизированной обработки сельскохозяйственных угодий. В ряде случаев, например, при обслуживании систем энергоснабжения и транспортировке воздушных средств возникает задача физического взаимодействия между беспилотным летательным аппаратом и наземной сервисной робототехнической платформой. Сложность решения данной задачи связана с проблемами посадки, фиксации и механизированной обработки аккумуляторов и аграрных ресурсов, размещаемых на летательном аппарате на сервисной платформе, а также управления очередностью сервисного обслуживания группы БЛА. По сравнению с наземной техникой использование БЛА в сельскохозяйственных задачах дает ряд основ преимуществ: отсутствие физического контакта с землей и уплотнения почвы, более широкая площадь мониторинга и обработки, более качественная

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-58-76001_ЭРА_а.

*обработка культур жидкими средствами за счет вращения роторов без применения дополнительных устройств. Имеющиеся прототипы сервисных роботизированных платформ отличаются сложностью внутренних механизмов, скоростью обслуживания, алгоритмами совместной работы платформы и летательного аппарата при посадке и обслуживании аккумулятора. Автономная посадка БЛА в современных исследованиях рассматривается не только на фиксированную площадку, но и на мобильную платформу, осуществляющую движение в различных средах. По результатам проведенного анализа существующих подходов составлена классификация существующих сервисных систем, установленных на роботизированных и механизированных платформах. Рассматриваются характеристики обработки некоторых распространенных сельскохозяйственных культур. Приводится перечень операций процесса сельскохозяйственного производства, их длительность и стоимость, а также возможности механизации. Делается вывод, что стоимость немеханизированной операцией значительно выше. Разработан метод оценивания необходимого состава и количества техники для обработки сельскохозяйственного угодья, отличающийся многокритериальной оценкой с использованием линейной комбинации трех основных критериев суммарного время обработки, израсходованной энергии, стоимости задействованной техники и обеспечивающий проведение численного моделирования и оптимизации объема привлекаемых гетерогенных робототехнических комплексов. Представлены результаты численного и имитационного моделирования количества робототехнической техники, необходимого для обработки сельскохозяйственного угодья, с использованием условных единиц и примерных диапазонов изменения значений входных параметров. Моделирование выполнено в разработанной программе *AgrobotModeling*, реализующей также визуализацию взаимодействия беспилотных летательных аппаратов с сельскохозяйственными наземными сервисными платформами, и обеспечивающих поддержку принятия решения об оптимальном количестве робототехнических средств, необходимых для обработки заданной площади сельскохозяйственного угодья.*

Беспилотные летательные аппараты; роботизированная сервисная наземная платформа; физическое взаимодействие гетерогенных роботов; сельскохозяйственное угодье.

A.L. Ronzhin, K.T. Ngo, V.V. Nguyen

TASKS OF CONTROLLING THE EXCHANGE OF PHYSICAL RESOURCES BETWEEN AGRICULTURAL MEANS WITH VARYING DEGREES OF ROBOTIZATION

The problem of controlling the interaction of unmanned aerial vehicles (UAVs) with ground-based robotic service platforms that perform the functions of transporting and transferring physical resources needed to perform agricultural operations on open ground is considered. The combined use of heterogeneous ground and air robotic means expands the functional and sensory capabilities of automatic processing of agricultural land. In a number of cases, for example, when servicing energy supply systems and transporting air means, the problem of physical interaction arises between an unmanned aerial vehicle and a ground service robotic platform. The complexity of solving this problem is associated with the problems of landing, fixing and mechanized processing of batteries and agricultural resources placed on an aircraft on a service platform, as well as managing the sequence of service of a UAV group. Compared with ground equipment, the use of UAVs in agricultural tasks provides a number of advantages: lack of physical contact with the ground and soil compaction, a wider monitoring and processing area, better treatment of crops with liquid means due to the rotation of rotors without the use of additional devices. Available prototypes of service robotic platforms are distinguished by the complexity of internal mechanisms, the speed of service, the algorithms for the joint operation of the platform and the aircraft during landing and maintenance of battery. Autonomous UAV landing in modern research is considered not only on a fixed site, but also on a mobile platform that carries out movement in various environments. Based on the results of the analysis of existing approaches, a classification of existing service systems installed on robotic and mechanized platforms has been compiled. The processing characteristics of some common crops are considered. A list of operations of the agricul-

tural production process, their duration and cost, as well as the possibility of mechanization. It is concluded that the cost of non-mechanized operations is much higher. A method has been developed for assessing the required composition and quantity of equipment for cultivating agricultural land, characterized by a multi-criteria assessment using a linear combination of three main criteria for the total processing time, energy consumed, the cost of the equipment involved and providing numerical modeling and optimization of the volume of involved heterogeneous robotic systems. The results of numerical and simulation modeling of the amount of robotic equipment required for processing agricultural land using arbitrary units and approximate ranges of input parameter values are presented. The simulation was performed in the developed AgrobotModeling software, which also implements visualization of the interaction of unmanned aerial vehicles with agricultural ground service platforms and provides decision support on the optimal number of robotic tools needed to process a given agricultural land area.

Unmanned aerial vehicles; robotic service ground platform; physical interaction of heterogeneous robots; farmland.

Введение. Рассмотрим существующие подходы и системы по загрузке/разгрузке физических ресурсов, которые используются сельскохозяйственной техникой, том числе роботизированной, при обработке сельскохозяйственных культур. Большинство работ посвящены загрузке жидкостей из стационарных емкостей в бак наземной сельскохозяйственной техники или же БЛА используются для съемки и составления картограмм, а наземная техника для обработки полей [1, 2].

Чтобы понимать с какими полезными ресурсами мы имеем дело при заправке контейнеров БЛА прежде всего рассмотрим множество обрабатываемых операций, которые производятся при выращивании различных культур. В табл. 1 описаны характеристики обработки некоторых распространенных сельскохозяйственных культур. В частности, отмечены такие особенности, как число обрабатываемых операций за год и стоимость их выполнения для каждого вида сельскохозяйственной культуры. При составлении нижеуказанных таблиц были использованы исходные данные, полученные при проведении опытных исследований, описанных в работах [3, 4].

Таблица 1

Стоимость и число операций при выращивании сельскохозяйственных культур

Культуры	Число обрабатываемых операций за год	Стоимость за 1,0 га, руб.
Озимые зерновые	25	12807,0
Проса	21	11441,0
Картофель	19	62196
Огурец	15	67025,0
Овёс	16	7749,6
Кукуруза	19	13810,0
Горох	12	7161,15
Гречиха	21	9462,5
Озимого ячменя	16	8818,5
Подсолнечника	24	10335
Соя	25	12807,0

В табл. 2 приведены операции процесса сельскохозяйственного производства, их длительность и стоимость, а также возможности механизации. Видно, что стоимость немеханизированных операций значительно выше.

Таблица 2

Характеристики операций процесса сельскохозяйственного производства

Наименование операций	Число обслуживающего персонала, чел.	Стоимость за 1,0 га, руб.	Степень механизации
Дисковое лушение стерни; см/га	1	600,0	Т-150
Транспортировка мин. удобр. на 5 км и внесение; кг/га	2	635,0	МТЗ-80
Вспашка зяби; см/га	1	1090,0	Т-150
Чизелевание (выравнивание) зяби; см/га	1	820,0	Т-150
Обработка семян ризоторфином с затариванием в мешки; кг	2	205,0	Эл. двигатель
Боронование зяби, см/га 4-6 см	1	550,0	Т-150
Культивация предпосевная, см/га	1	400,0	Т-150
Погрузка, транспортировка семян к посевным агрегатам, 5 км	2	350,0	МТЗ-80
Посев сплошной, кг/га	1	405,0	МТЗ-80
Боронование посевов с прикатыванием, см/га	1	360,0	Т-150
Довсходовое внесение Прометрина, л/га	1	455,0	МТЗ-80
Заделка Прометрина вслед за внесением, га	1	360,0	Т-150
Боронование посевов по всходам сои, см	1	355,0	МТЗ-80
Защита посевов от мышевидных грызунов, зерновая приманка с Клерат, Г	1	346,0	Вручную
Четырехкратное обследование посевов для выявления фитосанитарного состояния, га	1	1000,0	Вручную
Ручная прополка, руб./день, 3 раза	10	15000,0	Вручную
Ручной сбор, 3 раза	10	15000,0	Вручную
Приготовление рабочего раствора: Форте, КЭ	2	250,0	Эл. двигатель
Опрыскивание посевов против вредителей, согласно ЭПВ	1	305,0	МТЗ-80
Транспортировка рабочего раствора гербицидов, 5 км/л	1	210,0	МТЗ-80
Внесение рабочего раствора гербицидов; л/га	1	305,0	МТЗ-80
Нарезка временных оросителей, га	1	555,0	Т-150
1-й вегетационный полив, куб.м/га	1	1395,0	Т-150
2-й вегетационный полив, куб.м/га	1	1395,0	Т-150
Уборка семян с измельчением и сбором соломы, га	1	965,0	СК-5«Нива»
Транспортировка семян, 5 км/ц	1	345,0	САЗ-53А
Транспортировка измельченной массы, 5 км/т	1	200,0	МТЗ-80

При составлении вышеуказанных таблиц были использованы исходные данные, полученные при проведении опытных исследований, описанных в работах [3, 4]. Далее рассмотрим публикации последних лет, в которых описаны способы и системы пополнения ресурсов роботизированной и механизированной сельскохозяйственной техники, осуществляющих полив, внесение гербицидов, удобрений, семян из своего встроенного контейнера.

Наземная станция с автоматической дозаправкой жидких ресурсов на наземных роботов описана в работе [5]. Станция снабжена металлической штангой, в конце которой закреплен манипулятор с двумя степенями свободы, направляющий шланг в воронку подъехавшего в определенную позицию робота.

В работе [6] оценивается расход топлива и удобрений наземного робота в зависимости от типа маневра (Ω или U) при повороте, времени обслуживания при дозаправке.

В цикле работ [7, 8] описан технологический процесс внесения минеральных удобрений с применением сельскохозяйственной техники: самосвалов, загрузчиков и удобрителей. При этом учитывались общая площадь поля, расстояние до поля, норма высева удобрений, ширина захвата удобрителя, среднее время выгрузки самосвала, наполнения загрузчика, разгрузки в удобритель, грузоподъемности самосвала, загрузчика, удобрителей, средние скорости загрузчика, удобрителя и другие параметры. Предложенная математическая модель позволила определить затраты и время завершения процесса внесения минеральных удобрений, структуру и состав оптимальных звеньев «заправщик – удобритель».

Беспилотный летательный аппарат, выполняющий в автоматическом режиме полётные задания с дальностью до 5 км и полезной нагрузкой до 10 кг, описан в работе [9]. Бак с жидкостью для опрыскивания и распылители реализованы в виде быстросъёмных модулей. Одним из преимуществ применения БЛА в сельском хозяйстве является отсутствие уплотнения почвы поля, такого эффекта можно добиться при использовании кабельных роботов, а также крановых систем [10].

Возвращаясь к исследованиям Кубанского ГАУ, уже в последующей работе [11] авторы в явном виде ставят задачу совместной работы «летающих» опрыскивателей со специализированным транспортным средством, обеспечивающим в автоматическом режиме их заправку рабочим раствором, хранение и перевозку. Тем не менее способов автоматического пополнения ресурсов БЛА на наземной заправочной платформе в работе не предлагается.

В работе [12] рассматриваются особенности управления полетом БЛА при опрыскивании сельскохозяйственных полей жидкими средствами. Пестициды и химикаты должны распространяться на определенном расстоянии от растений, высота которых различается даже на одном поле. Культуры как правило высаживаются параллельными бороздами и облет над ними должен производиться равномерно с допустимой погрешностью.

Методика расчета маршрута полета БЛА при распылении пестицидов по полю зерновых культур с учетом погодных условий описана в работе [13]. За счет мониторинга произведенной обработки производится корректировка маршрута.

Преимущества и особенности применения БЛА в горных территориях при решении сельскохозяйственных задач рассматриваются в работе [14]. Большая часть фруктовых частных хозяйств расположены в горных территориях с полями до 2 га вдали от дорог. Поэтому БЛА вертикального взлета с полезной нагрузкой до 15 кг имеют наибольшую популярность для обследования и обработки небольших полей, расположенных в горах.

Экспериментальная оценка массы полезной нагрузки производится в работе [15]. Влияние скорости вращения винтов БЛА, скорости ветра учитывается при расчете максимальной массы пестицидов, заправляемой на борт БЛА.

Анализ условий при выборе местоположения взлетно-посадочной полосы проводится в работе [16]. Многокритериальная оценка качества места посадки производится по двенадцати входных параметров на основе байесовской сети и сводится к двум основным критериям: безопасность посадки и достижимость цели.

В работе [17] описан БЛА с полезной нагрузкой до 22 кг, оснащенный системой опрыскивания с резервуаром на 5 л, которого достаточно для обработки поля до 0.14 км².

Экспериментальные результаты снижения заряда аккумулятора и массы опрыскиваемой жидкости показаны в работе [18]. Объем резервуара подобран таким образом, чтобы с окончанием жидкости заряда аккумулятора хватало как раз чтобы только добраться до места посадки. При расчете экономических затрат учитывается амортизация техники, страховки, налоги, горюче-смазочные материалы, износ шин, затраты на ремонт, заработная плата операторов роботизированной и другой техники. Также обсуждаются перспективы использования БЛА не только для мониторинга и распыления жидкостей, но и для посевов и даже восстановления лесных угодий.

С учетом проведенного анализа существующие сервисные системы БЛА можно классифицировать по нескольким критериям, описывающих типы сервисных станций по степени мобильности, автономности управления и обслуживания самих станций, по типу обслуживания, по типу ресурсов, используемых в ходе обслуживания БЛА (рис. 1).



Рис. 1. Системы сервисного обслуживания сельскохозяйственных БЛА

Дополнительные критерии классификации свидетельствуют, что системы сервисного обслуживания контейнеров БЛА можно разделить:

- ◆ по степени мобильности на стационарные, прицепные и подвижные;
- ◆ по степени автономности управления, сервисные станции имеют типы телеуправляемые, автоматические и механизированные;

◆ по степени автономности обслуживания сервисные системы делятся на: с дозаправкой ресурсов трубопроводам, с дозаправкой ресурсов специальным транспортом и с возвращением на базу для дозаправки ресурсов;

◆ по типу ресурсов, системы классифицируются по агрегатному состоянию ресурсов и по назначению. По агрегатному состоянию ресурсы делятся на жидкие (например, растворы и эмульсии) и твердые (например, гранулированные и порошкообразные). По назначению ресурсы можно разделить на семена, удобрения и пестициды. Среди удобрений следует выделить такие типы как органические, минеральные и бактериальные. Среди пестицидов имеются следующие основные варианты: инсектициды (против насекомых), гербициды (против сорняков), фунгициды (против грибов) и зооциды.

Имитационное и численное моделирование количества робототехнической техники для обработки сельскохозяйственного угодья. Разработанное модельно-алгоритмическое обеспечение управления взаимодействием гетерогенных сельскохозяйственных робототехнических комплексов описано в работах [19–20].

Разработанный метод оценивания необходимого количества техники для обработки сельскохозяйственного угодья использует три основных критерия: 1) суммарное время обработки t^{sum} ; 2) суммарная израсходованная энергия e^{sum} ; 3) суммарная стоимость задействованной техники c^{sum} . При расчете суммарное время обработки t^{sum} будем считать, что сервисные платформы и находящиеся на них БЛА передвигаются к месту обработки сельскохозяйственного угодья одновременно, поэтому основные временные затраты складываются из времени движения платформ к угодью и назад, а также времени обработки угодья t^o и времени обслуживания БЛА t^u : $t^{sum} = 2t^{CP} + t^o + t^u$, где $t^o = \frac{S^o}{\Delta snm}$ – среднее время работы каждого задействованного БЛА на сельскохозяйственном угодье, число БЛА $n \in (0, N]$, число платформ $m \in (0, M]$. Для расчета времени обслуживания БЛА необходимо определить сколько раз за период t^o потребуется произвести пополнение БЛА физическими и энергетическими ресурсами:

$$t^u = \frac{t^o}{r_{max}^U \Delta t} (2t^{PS} + t_p^u) + \frac{t^o}{e_{max}^U \Delta t} (2t^{PS} + t_p^u), \text{ тогда:}$$

$$t^{sum} = 2t^{CP} + \frac{S^o}{\Delta snm} + \frac{S^o}{r_{max}^U \Delta t} (2t^{PS} + t_p^u) + \frac{S^o}{e_{max}^U \Delta t} (2t^{PS} + t_p^u) = 2 * t^{CP} + \frac{S^o}{\Delta snm} + \frac{S^o}{\Delta snm r_{max}^U \Delta t} (2t^{PS} + t_p^u) + \frac{S^o}{\Delta snm e_{max}^U \Delta t} (2t^{PS} + t_p^u).$$

При расчете суммарных энергетических ресурсов, необходимых для обработки сельскохозяйственного угодья O , также следует учесть передвижение платформ от центральной базы и обратно, а также обслуживание аккумуляторов всех БЛА в процессе работы: $e^{sum} = n2e_{min}^p + \frac{S^o}{\Delta snm e_{max}^U \Delta t} nm = n2e_{min}^p + \frac{S^o}{\Delta se_{max}^U \Delta t}$.

Суммарная стоимость задействованной техники будет складываться из стоимости платформ и БЛА, обслуживаемых на них: $c^{sum} = nc^p + mc^u$.

Для минимизации влияния конечных условий была произведена модификация вышеприведенных формул. Дополнительно были введены следующие временные переменные:

$$t_U^r = r_{max}^U \frac{\Delta t}{\Delta r} - \text{время, когда заканчиваются физические ресурсы БЛА;}$$

$$t_U^e = (e_{max}^U - 2e_{min}^U) \frac{\Delta t}{\Delta e} - \text{время, когда заканчиваются энергетические ресурсы}$$

БЛА.

С учетом соотношения времени расходования физических и энергетических ресурсов, расчет оценок времени обработки угодья и затрачиваемой энергии изменился следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} t^{sum} = 2t^{CP} + \frac{s_{max}^{oj} \Delta r}{nmr_{max}^U \Delta t} \left(2t^{PS} + t_p^u + \frac{r_{max}^U \Delta t}{\Delta r} \right) \\ e^{sum} = n2e_{min}^P + \frac{s_{max}^{oj} \Delta r}{r_{max}^U \Delta t} \left(2t^{PS} + \frac{r_{max}^U \Delta t}{\Delta r} \right) \Delta e, \\ \quad \text{если } t_U^r < t_U^e; \\ t^{sum} = 2t^{CP} + \frac{s_{max}^{oj} \Delta e}{nm(e_{max}^U - 2e_{min}^U) \Delta t} \left(t_p^u + \frac{e_{max}^U \Delta t}{\Delta e} \right), \\ e^{sum} = n2e_{min}^P + \frac{s_{max}^{oj} \Delta e}{(e_{max}^U - 2e_{min}^U) \Delta t} e_{max}^U, \\ \quad \text{иначе.} \end{array} \right. ,$$

Если $t_U^r < t_U^e$, это означает, что физические ресурсы закончились раньше, чем энергетические ресурсы. В случае если $t_U^r = t_U^e$, то физические и энергетические ресурсы заканчиваются одновременно $r_{max}^U \frac{\Delta t}{\Delta r} = (e_{max}^U - 2e_{min}^U) \frac{\Delta t}{\Delta e}$. Это позволяет увеличить коэффициент использования энергии для одного взлета, что сводит к минимуму общее количество взлетов для выполнения задания.

Многокритериальной оценкой, используемой при принятии решения о количестве необходимой техники для обработки сельскохозяйственного угодья, является линейная комбинация описанных выше критериев:

$$\varepsilon(S^o, n, m) = t^{sum} w_t + e^{sum} w_e + c^{sum} w_c,$$

где w_t , w_e , w_c весовые коэффициенты, отвечающие за приоритеты затрат по времени, энергии и стоимости соответственно. В результате сортировки значений многокритериальной оценки выбирается некоторый кортеж значений количества сервисных платформ и БЛА для заданной площади сельскохозяйственного угодья ε^{opt} , имеющий минимальную оценку: $Argmin_{n \in N, m \in M} (\varepsilon(S^o, n, m)) = \langle n^*, m^* \rangle$.

Далее представлена программа многокритериальной оценки необходимого количества робототехнической техники для обработки заданного сельскохозяйственного угодья AgroBotModeling, предназначенная для расчета количества беспилотных летательных аппаратов и наземных сервисных подвижных платформ, задействованных в обработке сельскохозяйственного угодья заданной площади. В программе производится имитационное моделирование функционирования выбранного количества робототехнических средств, а также расчет многокритериальной оценки на основе линейной комбинация трех основных критериев: суммарное время обработки, суммарная израсходованная энергия, суммарная стоимость задействованной техники. Значения весов выбираются экспертным путем в зависимости от заданного приоритета скорости обработки, например в случае прогнозирования ухудшения погоды и риска потери урожая, или приоритета снижения стоимости обработки угодья. Программа имеет наглядный пользовательский интерфейс и ориентирована на использование как малыми фермерскими хозяйствами, так и крупными агрохолдингами.

На рис. 2 показана структура модулей, а на рис. 3 пользовательский интерфейс разработанной программы AgroBotModeling, визуализирующей процесс моделирования обработки сельскохозяйственного угодья с различным числом платформ и БЛА. Интерфейс содержит 4 основных блока, отражающие параметры угодья, платформы и БЛА, а также элементы управления и индикации прошедшего времени.

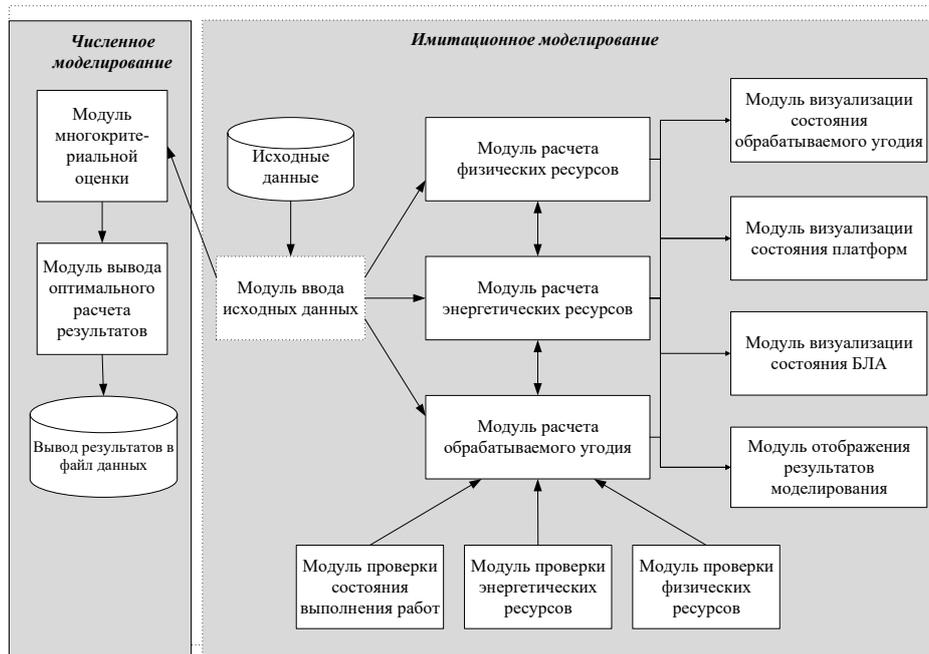


Рис. 2. Структура модулей программы AgrobotModeling

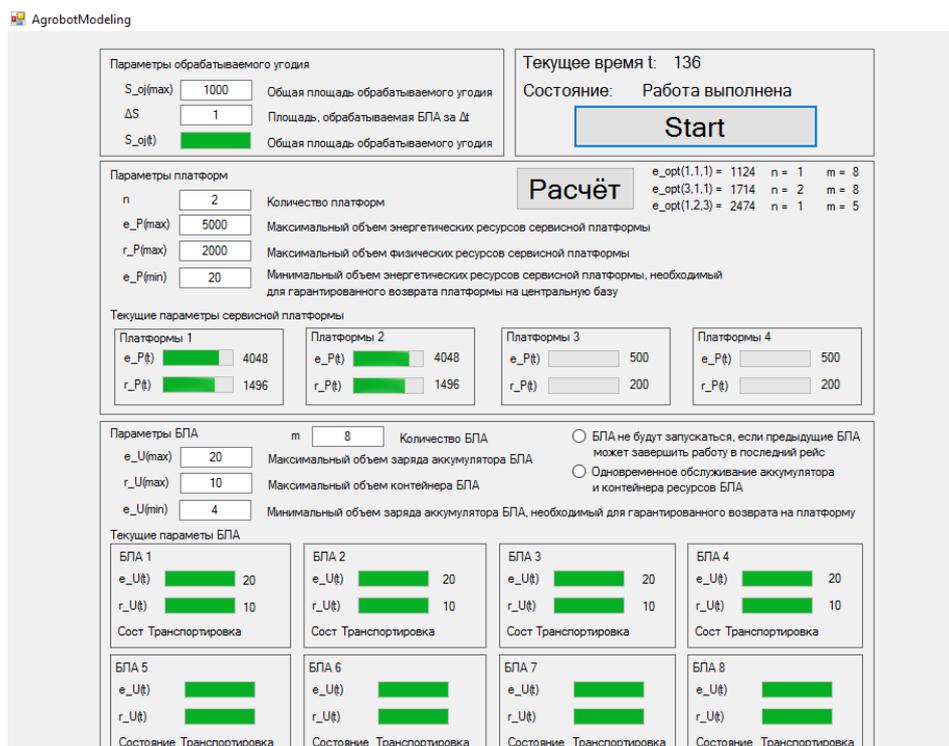


Рис. 3. Пользовательский интерфейс программы AgrobotModeling

Также были выполнены численные эксперименты по выбору оптимальных значений количества платформ и БЛА для обработки заданной площади сельскохозяйственного угодья при разных весовых коэффициентах необходимой скорости обработки и затрачиваемых ресурсов. На рис. 4 показан пример численных экспериментов по выбору оптимальных значений количества платформ и БЛА для обработки заданной площади сельскохозяйственного угодья при разных весовых коэффициентах необходимой скорости обработки и затрачиваемых ресурсов.

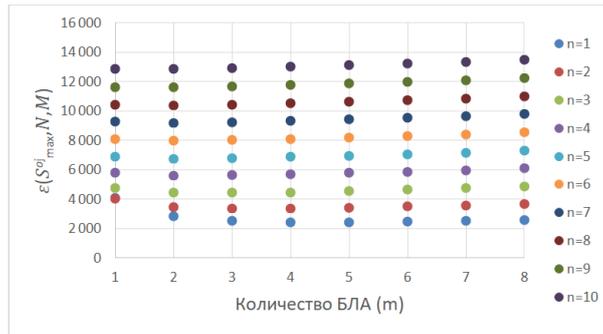


Рис. 4. Многокритериальная оценка количества задействованной техники при $M=8$, $S_{max}^{oj} = 1000$, $n_{opt}=1$, $m_{opt}=5$, $(w_b, w_e, w_c) = (1,2,3)$

При проведении серии экспериментов значения входных параметров изменялись в следующих диапазонах: число сервисных платформ $n = [1,2,\dots,10]$; число БЛА $m = [1,2,\dots,8]$; площадь угодья $s_{max}^{oj} = [1000, 10000]$; веса оценок $w_b, w_e, w_c = \{(1,1,1); (3,1,1); (1,2,3)\}$.

Заключение. На примере опытных исследований по выращиванию сельскохозяйственных культур показано, что число обрабатываемых операций сельскохозяйственного производства, как правило, превышает два десятка. Проанализированы их длительность и стоимость, а также возможности механизации. Наиболее затратные операции прополка, сбор плодов остаются без автоматизации. Рассмотрены существующие подходы и системы по загрузке/разгрузке физических ресурсов, которые используются сельскохозяйственной техникой, том числе роботизированной, при обработке сельскохозяйственных культур.

Разработанные модели и алгоритмы управления взаимодействием БЛА с сельскохозяйственной роботизированной платформой позволяют производить физические манипуляции с аккумулятором и физическими ресурсами при выполнении сельскохозяйственных задач и увеличить время автономного функционирования БЛА. Для оценивания необходимого состава и количества техники для обработки сельскохозяйственного угодья был разработан метод многокритериальной оценки с использованием линейной комбинации трех основных критериев суммарного время обработки, израсходованной энергии, стоимости задействованной техники, а весовые коэффициенты, отвечающие за приоритеты затрат по времени, энергии и стоимости выбираются экспертным путем в зависимости от заданного приоритета скорости обработки, например, в случае прогнозирования ухудшения погоды и риска потери урожая, или приоритета снижения стоимости обработки угодья. Разработанная программа AgrobotModeling обеспечивает расчет количества беспилотных летательных аппаратов и наземных сервисных подвижных платформ, задействованных в обработке сельскохозяйственного угодья заданной площади. Представленные результаты численного и имитационного моделирования количества робототехнической техники для обработки сельскохозяйственного угодья подтверждают достоверность разработанного модельного-алгоритмического и программного обеспечения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Pablo Gonzalez-de-Santos, Angela Ribeiro, Cesar Fernandez-Quintanilla, Francisca Lopez-Granados, Michael Brandstoeffer, Slobodanka Tomic, Stefania Pedrazzi, Andrea Peruzzi, Gonzalo Pajares, George Kaplanis, Manuel Perez-Ruiz, Constantino Valero, Jaime del Cerro, Marco Vieri, Gilles Rabatel, Benoit Debilde.* Fleets of robots for environmentally-safe pest control in agriculture // *Precision Agriculture.* – 2017. – Vol. 18, Issue 4. – P. 574-614. – DOI 10.1007/s11119-016-9476-3.
2. *Карсаев О.В., Шужлин И.И., Юценко С.П.* Самоорганизующееся В2В-предприятие рас-пределенной фотограмметрической обработки изображений местности в ЕТРИС // *Труды СПИИРАН.* – 2020. – № 1 (19). – С. 155-179.
3. *Нагоева О.В., Анчиков М.И.* Разработка программной модели системы управления робо-том-комбайном // *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН.* – 2019. – № 3 (89). – С. 15-22.
4. *Анчиков М.И., Кильчукова А.Л., Шалова С.Х.* Решение проблем автоматизации процесса сбора плодовоошной продукции // *Инженерный вестник Дона.* – 2016. – № 4 (43). – С. 73.
5. *David Ball, Patrick Ross, Andrew English, Peter Milani, Daniel Richards, Andrew Bate, Ben Uproft, Gordon Wyeth, and Peter Corke.* Farm Workers of the Future: Vision-Based Robotics for Broad-Acre Agriculture // *IEEE Robotics and Automation Magazine.* – 2017. – Vol. 24, No. 3. – P. 97-107. – DOI: 10.1109/MRA.2016.2616541.
6. *Mark Spekken, Sytze de Bruin.* Optimized routing on agricultural fields by minimizing maneu-ering and servicing time // *Precision Agriculture.* – 2013. – Vol. 14. – P. 224-244. – DOI 10.1007/s11119-012-9290-5.
7. *Щербаков Н.В., Ким С.А.* Моделирование технологического процесса внесения мине-ральных удобрений // *Вестник науки Костанайского государственного университета им. А. Байтурсынова.* – 2002. – № 3-4. – С. 31-35.
8. *Щербаков Н.В., Ким С.А.* Исследование технологического процесса внесения минеральных удобрений в зоне Северного Казахстана // *Известия ОГАУ.* – 2006. – № 11-1. – С. 75-77.
9. *Меркулов А.А.* Конструктивно-технологическая схема роботизированного комплекса для внесения рабочих растворов // *Научное обеспечение агропромышленного комплекса: Сб. статей по материалам XI Всероссийской конференции молодых ученых, посвящен-ной 95-летию Кубанского ГАУ и 80-летию со дня образования Краснодарского края. Ответственный за выпуск А. Г. Коцаев.* – 2017. – С. 402-403.
10. *Sierra N. Young, Erkan Kayacan, Joshua M. Peschel.* Design and field evaluation of a ground robot for high-throughput phenotyping of energy sorghum // *Precision Agriculture.* – 2019. – Vol. 20. – P. 697-722. – DOI 10.1007/s11119-018-9601-6.
11. *Куцев В.В., Меркулов А.А.* Подходы к роботизации химической защиты растений в се-лекционном процессе зерновых культур // *Инновационные технологии отечественной селекции и семеноводства: Сб. тезисов по материалам II научно-практической конфе-ренции молодых ученых Всероссийского форума по селекции и семеноводству. Ответ-ственный за выпуск А.Г. Коцаев.* – 2018. – С. 130-132.
12. *Ziming Wang, Dalei Song, Juntong Qi, Jianda Han, Yu Miao, Lijun Meng, Shuaike Zhao, and Ming Li.* A Full-functional Simulation and Test Platform for Rotorcraft Unmanned Aerial Ve- hicle Autonomous Control // *Robot Intelligence Technologies and Applications.* J.-H. Kim et al. (Eds.). – 2012, AISC. – Vol. 208. – P. 537-547. – DOI: 10.1007/978-3-642-37374-9_52.
13. *Bruno S. Faiçal, Gustavo Pessin, Geraldo P.R. Filho, Gustavo Furquim, André C.P.L.F. de Carvalho, and Jó Ueyama.* Exploiting Evolution on UAV Control Rules for Spraying Pesti- cides on Crop Fields // *EANN.* – 2014. – P. 49-58.
14. *Shulin Yang, Xiaobing Yang, Jianyou Mo.* The application of unmanned aircraft systems to plant protection in China // *Precision Agriculture.* – 2018. – Vol. 19. – P. 278-292. – DOI: 10.1007/s11119-017-9516-7.
15. *Koo Y.M., Hong J.G., Haider B.A. and Sohn C.H.* Practical payload assessment of a prototype blade for agricultural unmanned rotorcraft // *Journal of Mechanical Science and Technology.* – 2018. – Vol. 32(12). – P. 5659-5669. – DOI 10.1007/s12206-018-1113-9
16. *Marc Schmitt and Peter Stütz.* Multi-UAV Based Helicopter Landing Zone Reconnaissance. Infor- mation Level Fusion and Decision // *Support Springer International Publishing AG 2017.* D. Harris (Ed.): EPCE 2017, Part II, LNAI 10276. – P. 266-283. – DOI: 10.1007/978-3-319-58475-1_20.
17. *Huang Y., Hoffmann W.C., Lan Y., Wu, W., Fritz B.K.* Development of a spray system for an unmanned aerial vehicle platform // *Applied Engineering in Agriculture.* – 2009. – Vol. 25 (6). – P. 803-809.

18. *Jorge Martinez-Guanter, Pablo Agüera, Juan Agüera, Manuel Pérez-Ruiz.* Spray and economics assessment of a UAV-based ultra-low-volume application in olive and citrus orchards // *Precision Agriculture*. – P. 1-18. – DOI: 10.1007/s11119-019-09665-7.
19. *Ву Д.К., Соленая О.Я., Ронжин А.Л.* Обзор робототехнических захватов для физических манипуляций с аграрной продукцией // *Тракторы и сельхозмашины*. – 2017. – № 12.
20. *Ву Д.К., Нгуен В.В., Соленая О.Я., Ронжин А.Л.* Анализ задач аграрной робототехники, решаемых посредством беспилотных летательных аппаратов // *Агрофизика*. – 2017. – № 3. – С. 57-65.

REFERENCES

1. *Pablo Gonzalez-de-Santos, Angela Ribeiro, Cesar Fernandez-Quintanilla, Francisca Lopez-Granados, Michael Brandstötter, Slobodanka Tomic, Stefania Pedrazzi, Andrea Peruzzi, Gonzalo Pajares, George Kaplanis, Manuel Perez-Ruiz, Constantino Valero, Jaime del Cerro, Marco Vieri, Gilles Rabatel, Benoit Debilde.* Fleets of robots for environmentally-safe pest control in agriculture, *Precision Agriculture*, 2017, Vol. 18, Issue 4, pp. 574-614. DOI 10.1007/s11119-016-9476-3.
2. *Karsaev O.V., Shuklin I.I., Yushchenko S.P.* Samoorganizuyushcheesya B2B-predpriyatie raspredelennoy fotogrammetricheskoy obrabotki izobrazheniy mestnosti v ETRIS [Self-Organizing B2B Enterprise of Distributed Photogrammetric Processing of Terrain Images in ETRIS], *Trudy SPIIRAN [SPIIRAS Proceedings]*, 2020, No. 1 (19), pp. 155-179.
3. *Nagoeva O.V., Anchekov M.I.* Razrabotka programmnoy modeli sistemy upravleniya robotom-kombaynom [Development of a software model for a robot combine control system], *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo centra RAN [News of the Kabardin-Balkar scientific center of RAS]*, 2019, No. 3 (89), pp. 15-22.
4. *Anchikov M.I., Kil'chukova A.L., Shalova S.H.* Reshenie problem avtomatizatsii protsessa sbora plodoovoshchnoy produktsii [Solving the problems of automation of the process of collecting fruits and vegetables], *Inzhenernyy vestnik Dona [Engineering journal of Don]*, 2016, No. 4 (43), pp. 73.
5. *David Ball, Patrick Ross, Andrew English, Peter Milani, Daniel Richards, Andrew Bate, Ben Uproft, Gordon Wyeth, and Peter Corke.* Farm Workers of the Future: Vision-Based Robotics for Broad-Acre Agriculture, *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2017, Vol. 24, No. 3, pp. 97-107. DOI: 10.1109/MRA.2016.2616541.
6. *Mark Spekken, Sytze de Bruin.* Optimized routing on agricultural fields by minimizing maneuvering and servicing time, *Precision Agriculture*, 2013, Vol. 14, pp. 224-244. DOI 10.1007/s11119-012-9290-5.
7. *Shcherbakov N.V., Kim S.A.* Modelirovanie tekhnologicheskogo protsessa vneseniya mineral'nykh udobreniy [Modeling the technological process of applying mineral fertilizers], *Vestnik nauki Kostanayskogo gosudarstvennogo universiteta im. A. Baitursynova [Herald of KSU named after A. Baitursynov]*, 2002, No. 3-4, pp. 31-35.
8. *Shcherbakov N.V., Kim S.A.* Issledovanie tekhnologicheskogo protsessa vneseniya mineral'nykh udobreniy v zone Severnogo Kazakhstana [Study of the technological process of applying mineral fertilizers in the north kakhstan zone], *Izvestiya OGAU [ORENSAU News]*, 2006, No. 11-1, pp. 75-77.
9. *Merkulov A.A.* Konstruktivno-tekhnologicheskaya skhema robotizirovannogo kompleksa dlya vneseniya rabochikh rastvorov [Structural-technological scheme of a robotic complex for making working solutions], *Nauchnoe obespechenie agropromyshlennogo kompleksa: Sbornik statey po materialam XI Vserossiyskoy konferentsii molodykh uchenykh, posvyashchennoy 95-letiyu Kubanskogo GAU i 80-letiyu so dnya obrazovaniya Krasnodarskogo kraya [Scientific support of the agro-industrial complex: a Collection of articles based on the materials of the XI all-Russian conference of young scientists dedicated to the 95th anniversary of the Kuban state agrarian University and the 80th anniversary of the Krasnodar territory]*. Responsible for the release A.G. Koshchaev, 2017, pp. 402-403.
10. *Sierra N. Young, Erkan Kayacan, Joshua M. Peschel.* Design and field evaluation of a ground robot for high-throughput phenotyping of energy sorghum, *Precision Agriculture*, 2019, Vol. 20, pp. 697-722. DOI 10.1007/s11119-018-9601-6.

11. Kuceev V.V., Merkulov A.A. Podkhody k robotizatsii himicheskoy zashchity rasteniy v selektsionnom processe zemnykh kul'tur [Approaches to robotic chemical plant protection in the breeding process of crops], *Innovacionnye tekhnologii otechestvennoj selekcii i semenovodstva Sbornik tezisov po materialam II nauchno-prakticheskoy konferencii molodyh uchenyh Vserossijskogo foruma po selekcii i semenovodstvu* [Innovative technologies of domestic selection and seed production]. Responsible for the release A.G. Koshchaev, 2018, pp. 130-132.
12. Ziming Wang, Dalei Song, Juntong Qi, Jianda Han, Yu Miao, Lijun Meng, Shuaike Zhao, and Ming Li. A Full-functional Simulation and Test Platform for Rotorcraft Unmanned Aerial Vehicle Autonomous Control. *Robot Intelligence Technologies and Applications*. J.-H. Kim et al. (Eds.): 2012, AISC, Vol. 208, pp. 537–547. DOI: 10.1007/978-3-642-37374-9_52.
13. Bruno S. Faiçal, Gustavo Pessin, Geraldo P.R. Filho, Gustavo Furquim, André C.P.L.F. de Carvalho, and Jó Ueyama. Exploiting Evolution on UAV Control Rules for Spraying Pesticides on Crop Fields, *EANN*, 2014, pp. 49-58.
14. Shulin Yang, Xiaobing Yang, Jianyou Mo. The application of unmanned aircraft systems to plant protection in China, *Precision Agriculture*, 2018, Vol. 19, pp. 278-292. DOI: 10.1007/s11119-017-9516-7.
15. Koo Y.M., Hong J.G., Haider B.A. and Sohn C.H. Practical payload assessment of a prototype blade for agricultural unmanned rotorcraft, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2018, Vol. 32 (12), pp. 5659-5669. DOI 10.1007/s12206-018-1113-9.
16. Marc Schmitt and Peter Stütz. Multi-UAV Based Helicopter Landing Zone Reconnaissance. Information Level Fusion and Decision. Support Springer International Publishing AG 2017. D. Harris (Ed.): EPCE 2017, Part II, LNAI 10276, pp. 266-283. DOI: 10.1007/978-3-319-58475-1_20.
17. Huang Y., Hoffmann W.C., Lan Y., Wu W., Fritz B.K. Development of a spray system for an unmanned aerial vehicle platform, *Applied Engineering in Agriculture*, 2009, Vol. 25 (6), pp. 803-809.
18. Jorge Martinez-Guanter, Pablo Agüera, Juan Agüera, Manuel Pérez-Ruiz. Spray and economics assessment of a UAV-based ultra-low-volume application in olive and citrus orchards, *Precision Agriculture*, pp. 1-18. DOI: 10.1007/s11119-019-09665-7.
19. Vu D.K., Solenaya O.Ya., Ronzhin A.L. Obzor robototekhnicheskikh zakhvatov dlya fizicheskikh manipulyatsiy s agrarnoy produktsiey [Over-view of robotic grippers for physical manipulation with agricultural products], *Traktory i sel'khoz mashiny* [Tractors and agricultural machinery], 2017, No. 12.
20. Vu D.K., Nguen V.V., Solenaya O.Ya., Ronzhin A.L. Analiz zadach agrarnoy robototekhniki, reshaemykh posredstvom bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Analysis of agriculture robotics tasks solved by using unmanned aerial vehicles], *Agrofizika* [Agrophysics], 2017, No. 3, pp. 57-65.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.М. Башилов.

Ронжин Андрей Леонидович – Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук; e-mail: ronzhin@iias.spb.su; 199178, г. Санкт-Петербург, 14 линия, 39; тел.: +79112532432; лаборатория автономных робототехнических систем; д.т.н.; профессор; профессор РАН; г.н.с.; директор.

Нго Куок Тьен – e-mail: quoctienbn@gmail.com; тел.: +78123283311; лаборатория автономных робототехнических систем; соискатель.

Нгуен Ван Винь – Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; e-mail: nguyenvanvinhhvkt@gmail.com; 190000, г. Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 67; тел.: +792144912; кафедра электромеханики и робототехники; аспирант.

Ronzhin Andrey Leonidovich – St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences; e-mail: ronzhin@iias.spb.su; 39, 14 Line, Saint Petersburg, 199178, Russia; phone: +79112532432; laboratory of autonomous robotics systems, chief researcher; dr. of eng. sc.; professor; director.

Ngo Kuok Tien – e-mail: quoctienbn@gmail.com; phone: +78123283311; laboratory of autonomous robotics systems; applicant.

Vinh Nguyen Van – State University of Aerospace Instrumentation; e-mail: nguyenvanvinhhvkt@gmail.com; 8, Warsaw street, Saint Petersburg, 190000, Russia; phone: +79214491289; the department of electrical engineering and robotics; postgraduate student.

В.В. Чернышев, И.П. Вершинина, В.В. Арыканцев
УСТОЙЧИВОСТЬ ШАГАЮЩИХ МАШИН И РОБОТОВ
В ПОДВОДНЫХ УСЛОВИЯХ*

При проведении подводно-технических работ шагающие машины и роботы, передвигающиеся по дну существенно превосходят по тяговым свойствам и проходимости традиционные транспортные средства. Условия эксплуатации подводных шагающих робототехнических систем – сложный рельеф морского дна, уклоны, слабонесущий грунт и др., обуславливают актуальность проблемы их устойчивости. Обсуждаются результаты теоретических и экспериментальных исследований, направленных на обеспечение динамической устойчивости шагающих машин и роботов в подводных условиях. Новизна исследования обусловлена учетом специфических особенностей их условий эксплуатации. Исследования базируются на результатах испытаний опытного образца 6-ти ногого подводного шагающего аппарата МАК-1. Неустойчивость шагающего аппарата может быть обусловлена особенностью походки. Также потеря устойчивости шагающего аппарата может наступить при встрече с нераспознанным препятствием и при преодолении уклонов. Проведено математическое моделирование динамики статически неустойчивых походок. Проанализированы основные этапы фазы движения аппарата в неустойчивом положении. Показано, что в подводных условиях динамически устойчивая ходьба 6-ти ногого шагающего аппарата с цикловыми двигателями возможна и в случае независимого привода ног правого и левого борта. Рассмотрены методы автономного реагирования на встречу с нераспознанным препятствием. Проанализированы различные типовые ситуации, возникающие при движении по неорганизованной поверхности. Предложены методы самоадаптации и самоуправления ног на базе нечетких алгоритмов, исключая возникновение аварийных ситуаций, включая опрокидывание. Рассмотрены особенности преодоления уклонов шагающими аппаратами в подводных условиях. При движении традиционных транспортных средств возможно их опрокидывание или сползание под уклон. Показано, что на слабых грунтах сползание шагающих машин под уклон маловероятно. Это обусловлено значительными деформациями грунта под опорными элементами (стопами) шагающих машин. Рассмотрен способ повышения устойчивости к опрокидыванию при движении шагающего аппарата вдоль уклона за счет раздельного регулирования условного клиренса механизмов шагания. Определенное внимание уделено устойчивости буровых шагающих платформ, передвигающихся по дну. Их специфика – высокое расположение центра масс. Рассмотрены возможные этапы опрокидывания шагающих платформ. Показан стабилизирующий эффект завышенного расположения центра плавучести. Результаты работы могут быть востребованы при разработке шагающих машин и роботов, предназначенных для подводно-технических работ, для новых промышленных технологий освоения ресурсов морского дна, для обеспечения антитеррористической и техногенной безопасности объектов подводной инфраструктуры и др. работ.

Подводные роботы; машины передвигающиеся по дну; шагающий двигатель; динамическая устойчивость; взаимодействие с грунтом; динамика управляемого движения; подводные испытания.

V.V. Chernyshev, I.P. Vershinina, V.V. Arykantsev
STABILITY OF WALKING MACHINES AND ROBOTS
IN UNDERWATER CONDITIONS

When carrying out underwater technical works, walking machines and robots moving along the bottom significantly surpass traditional vehicles in terms of traction and cross-country ability. The exploitation conditions of underwater walking robotic systems - a rough terrain of the seabed, slopes, weakly bearing soil, etc., determine the urgency of the problem of their stability. The paper

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Волгоградской обл. в рамках научных проектов № 19-08-01180, № 19-48-340007.

discusses the results of theoretical and experimental studies aimed at ensuring the dynamic stability of walking machines and robots in underwater conditions. The novelty of the study is provided by the specific features of their operating conditions. The studies are based on the test results of the 6-legged underwater walking device MAK-1. The instability of the walking device may be caused by the gait features. Also, the loss of stability of the walking device can occur when meeting with an unrecognized obstacle and when overcoming slopes. Mathematical modeling of the dynamics of statically unstable gait is carried out. The main stages of the phase of movement of the device in an unstable position are analyzed. It is shown that underwater conditions, dynamically stable walking of a 6-legged walking device with cyclic movers is also possible in the case of independent legs drives of the right and left side. The methods of autonomous response to a meeting with an unrecognized obstacle are considered. Various typical situations that arise when moving along an unorganized surface are analyzed. The methods of self-adaptation and self-management of legs based on fuzzy algorithms, that exclude the occurrence of emergency situations, including rollover, are proposed. The features of overcoming slopes by walking vehicles in underwater conditions are considered. In traditional vehicles movement, rollover or slide downhill is possible. It is shown that on weak soils downhill slide of walking machine is unlikely. This is due to significant deformations of the soil under the supporting elements (feet) of walking machines. A method of increasing the resistance to tipping over when moving a walking device along a slope due to the separate tuning of the conditional clearance of the walking mechanisms is considered. Particular attention is paid to the stability of drilling walking platforms moving along the bottom. Their specificity is the high location of the center of mass. Possible stages of walking platforms rollover are considered. The stabilizing effect of an increased location of the center of floatation is shown. The results of the work can be demanded in the development of walking machines and robots designed for underwater technical works, for new industrial technologies for the development of the seabed resources, to ensure the antiterrorist and technological safety of underwater infrastructure objects and other works.

Underwater robots; seabed moving machines; walking mover; dynamic stability; interaction with soil; controlled movement dynamics; underwater tests.

Введение. При проведении подводно-технических работ находят применение необитаемые робототехнические системы передвигающихся по дну [1–6]. Существующие машины и роботы, передвигающиеся по дну (подводные бульдозеры, самоходные донные добычные агрегаты, глубоководные экскаваторы, кабелеукладчики и др.) имеют, как правило, гусеничный или колесный движитель. Однако низкая несущая способность подводных грунтов, уклоны и сложный рельеф морского дна существенно ограничивают возможности традиционных движителей в подводных условиях [7–8]. Шагающие движители более подходят для подводных работ, так как они обладают более высокими тяговыми свойствами и лучшей грунтовой и профильной проходимостью [9–11]. Условия эксплуатации подводных шагающих робототехнических систем обуславливают актуальность проблемы их устойчивости к опрокидыванию. Вопросы, связанные с обеспечением статической и динамической устойчивости шагающих аппаратов уже рассматривались неоднократно [12–14]. В работе обсуждаются результаты теоретических и экспериментальных исследований, направленных на обеспечение статической и динамической устойчивости донных шагающих машин и роботов. Новизна исследования обусловлена учетом специфических особенностей подводных условий.

Материалы и методы. Исследования базируются на результатах подводных испытаний опытного образца 6-ти ногого шагающего аппарата (модульно-аппаратного комплекса) МАК-1 (рис. 1). Аппарат специально разработан на факультете автоматизированных систем, транспорта и вооружений Волгоградского государственного технического университета для исследования шагающего способа передвижения в подводных условиях [9–13, 15].



Рис. 1. Подводный шагающий робот МАК-1 (ВолгГТУ, Россия)

Конструктивно аппарат МАК–1 (рис. 2) включает в себя 2 шагающих модуля соединенных сменной рамой. Шагающие модули выполнены в виде несущих балок, на которых установлены механизмы шагания и бортовой силовой привод. Бортовой привод – электрический, на базе асинхронных электродвигателей с частотным регулированием скорости вращения. Электропитание и управление аппарата осуществляется по кабелю. Питание привода осуществляется по кабелю с берега или судна. Управление также осуществляется по кабелю по видеоинформации, поступающей с бортовых цветных видеокамер с инфракрасной подсветкой. Поворот аппарата осуществляется либо за счет разных скоростей бортов либо за счет разной длины шага движителей правого и левого борта.

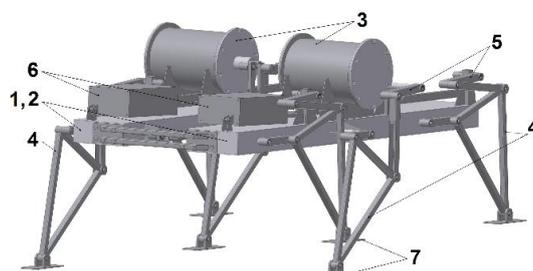


Рис. 2. Конструктивная схема шагающего робота МАК-1: 1 – шагающие модули; 2 – несущие балки; 3 – электропривод в водозащищенных боксах; 4 – механизмы шагания; 5, 6 – механизм корректировки параметров шага и его линейный электропривод, соответственно; 7 – стопы

Двигатель каждого борта аппарата состоит из 3-х механизмов шагания. Схема механизма шагания приведена на рис. 3,а. Механизмы шагания – цикловые, на базе 4-х звенных плоских механизмов, с шарнирно прикрепленными сменными стопами. Входящие в состав двигателя механизмы шагания кинематически взаимосвязаны и работают в противофазе (первый и последний механизм работают синфазно, а средний в противофазе). В результате в каждый момент времени хотя бы одна из ног шагающего движителя находится в опорной фазе.

В аппарате реализована система пассивной адаптации стопы к опорной поверхности – разработана методика синтеза траектории опорной точки механизма шагания, обеспечивающая за счет его кинематики и трения в шарнире стопы, подъем носка стопы в фазе переноса [16, 17]. Причем система работает как при прямом, так и при реверсивным (задним ходом) движении (рис. 3,б,в). Здесь точки на траекториях распо-

ложены через $1/24$ периода цикла, точки с заливкой соответствуют опорной фазе. В последнем случае носок и пятка стопы меняются местами. Самоадаптация стопы повышает возможности подводного аппарата по приспособляемости к неровностям дна. Также, для более полной реализации возможностей движителя по профильной проходимости и маневренности в механизмах шагания аппарата реализована возможность корректировки программных движений ног [18–20]. Она позволяет в достаточно широких пределах менять длину и высоту шага.

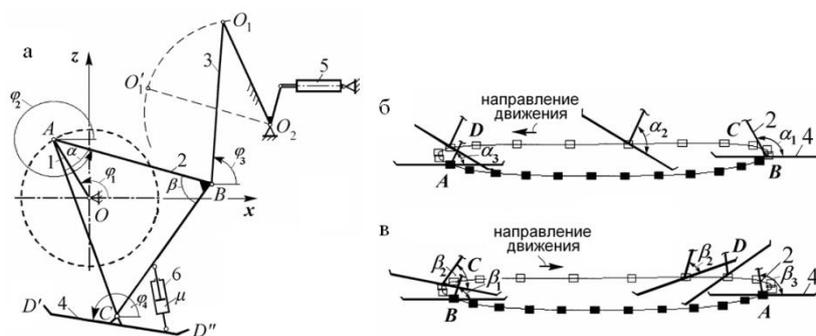


Рис. 3. Механизм шагания робота МАК-1 (а) и траектория его опорной точки с характерными положениями стопы при прямом (б) и реверсивном (в) движении: 1 – кривошип; 2 – опорное звено; 3 – коромысло; 4 – стопа; 5 – линейный электропривод механизма корректировки параметров шага; 6 – демпфер

Цикловой движитель позволяет не заботиться о сохранении походки шагающего аппарата и облегчает решение задачи обеспечения его устойчивости при движении. Так же исключается необходимость адаптивного управления ногами шагающего аппарата. В результате аппарат имеет всего лишь 2 управляемые степени свободы и становится существенно проще аналогов с адаптивным управлением ног. Например, у корейского подводного робота Crabster CR200 шагающие движители адаптивного типа насчитывают 32 управляемых приводов, что существенно усложняет задачу согласованного управления ногами [21].

Шагающий аппарат МАК-1 превосходит лучшие зарубежные аналоги, например подводный шагающий робот Crabster CR200 (Корея), по скорости и маневренности. Рекорд скорости подводной ходьбы робота Crabster CR200 – 0,5 узлов (около 0,9 км/ч) [22]. Максимальная скорость передвижения робота МАК-1 [23] под водой уже сейчас составляет 3–5 км/ч и может быть увеличена, при необходимости, до 7–10 км/ч. Аппарат не требует энергозатрат на удержание веса машины, его грузоподъемность, в отличие от Crabster CR200, не зависит от мощности привода и ограничена лишь прочностью ног. Также аппарат проще в управлении и превосходит аналоги по длине и высоте шага и по тяговым возможностям. По приспособляемости к рельефу дна он несколько уступает роботам адаптивного типа, так как адаптация к неорганизованной опорной поверхности у него происходит только за счет изменения длины и высоты шага и хорошей поворотливости. Также МАК-1 пока уступает роботу Crabster по сенсорным и навигационным возможностям.

Неустойчивость шагающего аппарата обусловленная особенностью походки. В роботе МАК-1, с целью повышения маневренности и снижения момента сопротивления повороту, использована 6-и ногая схема движителя с независимыми приводами ног правого и левого борта. Такая схема позволяет реализовать поворот с малыми радиусами на любых грунтах [9, 12, 15]. Поэтому при движении возможны ситуации, когда аппарат будет находится в опоре только на две точки –

на средние ноги. Такой режим движения не обеспечивает статической устойчивости. Вместе с тем, как показали подводные испытания, и в этом случае возможна динамически устойчивая ходьба. Математическое моделирование позволило изучить особенности динамики статически неустойчивых режимов движения. На рис. 4 показаны основные этапы фазы движения аппарата в неустойчивом положении.

Первую часть цикла шагающий аппарат движется в статически устойчивом положении – 1-я и 3-я ноги находятся в опоре на грунт, а средняя переносится вперед к точке смены стоп (рис. 4,а). После смены стоп 2-я нога находится в опоре на грунт, а 1-я и 3-я в переносе – аппарат находится в опоре только на средние ноги. Под действием силы тяжести и гидравлического сопротивления воды корпус аппарата поворачивается по часам до контакта 3-й стопы с грунтом (рис. 4,б). Центр масс подводного аппарата МАК-1 находится приблизительно в центре корпуса, а центр плавучести несколько смещен вперед. В следующую часть цикла 3-я стопа отрывается от грунта (рис. 4,в). Корпус под действием средних ног движется вперед и вверх, а под действием сил тяжести и гидравлического сопротивления воды продолжает поворачиваться по часовой стрелке. Моделирование показывает, что в маршевых режимах движения (при скоростях 3–5 км/ч) движение корпуса под действием ног более «быстрое» в сравнении с «медленным» поворотом корпуса. Поэтому возможны ситуации, когда 3-я стопа не успевает коснуться грунта. После того как опорная точка 2-й ноги окажется правее центра масс аппарата (рис. 4,г), момент сил тяжести относительно опорной точки меняет знак и корпус в заключительной части фазы начинает поворачиваться против часов (рис. 4,д, рис. 5) до контакта 1-й стопы с грунтом. Причем вода существенно сглаживает ударное взаимодействие стопы с грунтом в этой части фазы. После контакта 1-й ноги с грунтом снова начинается статически устойчивая часть цикла (рис. 4,е).

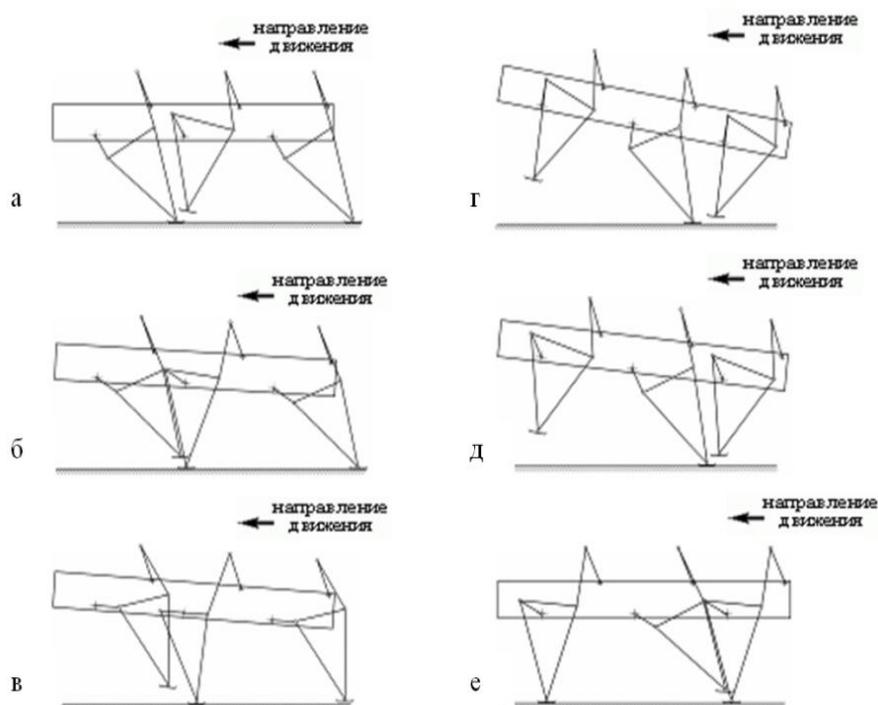


Рис. 4. Фазы статически неустойчивых режимов движения



Рис. 5. Заключительная часть фазы неустойчивого движения робота

Таким образом, динамически устойчивая ходьба 6-ти ногого шагающего аппарата с независимым приводом цикловых механизмов шагания правого и левого борта возможна и в статически неустойчивых режимах движения, когда аппарат находится в опоре только на 2 средние ноги.

Потеря устойчивости шагающего аппарата при движении по неорганизованной поверхности. Подводные испытания выявили ряд проблем связанных с управлением аппарата. При управлении движением использовался следующий подход. Оператор находился вне рабочего пространства (на берегу или судне сопровождения) и контролировал работу автономно работающего аппарата по визуальной информации поступающей по кабелю с бортовых видеосенсоров. Оператор может менять скорость и направление движения, а также имеет определенные возможности по корректировке параметров шага. Задача согласованного управления ногами в маршевых режимах движения решалась без участия оператора. Оператор вмешивался в управление движением ног лишь при необходимости, например, при преодолении локальных препятствий. Однако, как показали испытания, из-за плохой видимости под водой (как правило, не более 1–3 м) в маршевых режимах движения (при скоростях порядка 1,5–2 м/с) оператор не успевал принимать адекватных решений в случае появления препятствия по ходу движения (время принятия решения составляло от 0,5 до 2 с). В результате имели место случаи потери устойчивости и опрокидывание аппарата. В подобных условиях особую значимость приобретают информационно-измерительные и управляющие системы ближнего действия. В подводном шагающем роботе Crabster CR200 стопы выполняют функции тактильных датчиков. При разработке системы управления робота МАК-1 также прорабатывалась возможность использовать информацию о положении шарнирно закрепленной стопы при встрече с неизвестным препятствием для принятия правильных решений по управлению.

Датчики внутренней информации аппарата МАК-1 позволяют однозначно определять «программные» угловые скорости стоп и звеньев механизмов шагания, а также положение и скорости узловых точек механизмов в системе отсчета жестко связанной с корпусом аппарата. Шарнирно закрепленная стопа при этом совершает в фазе переноса строго определенное «программное» движение. В конце опорной фазы – участок BC траектории (рис. 3,б), стопа 4 расположена под углом α_1 к опорному звену 2. В фазе переноса – участок CD траектории, стопа движется вместе с опорным звеном и угол α_1 не изменяется. Если стопа лыжеобразной формы, то в начале фазы переноса – в точке C траектории, пятка стопы D'' контактирует с грунтом. В этом случае угол α_1 уменьшится до α_2 , но и при этом носок стопы D' в фазе переноса остается приподнятым. После переноса – на участке DA , стопа при-

нимает горизонтальное положение. Угол α_2 при этом уменьшается до α_3 . В опорной фазе – на участке AB траектории, угол наклона стопы не изменяется, а угол между стопой и опорным звеном постепенно увеличивается до α_1 . Затем цикл повторяется. Похожая ситуация имеет место и при реверсивном движении. Здесь носок и пятка стопы меняются местами. Любое отклонение поведения стопы от «программного» при движении шагающего аппарата позволяет определить некоторую информацию о рабочем пространстве и текущей ситуации.

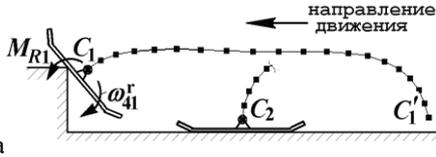
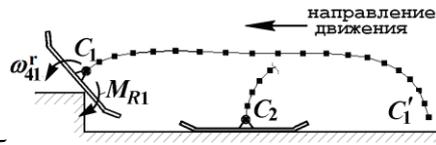
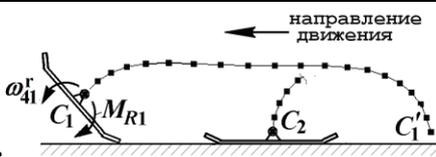
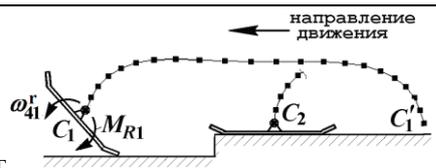
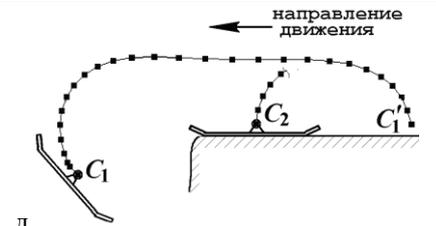
Рассмотрим, например, ситуации представленные в табл. 1, где U_k – единичная функция, описывающая состояние k -го механизма шагания ($k = 1, 2$), равная 1 в опорной фазе и 0 при переносе; ω'_{4k} – относительная угловая скорость k -ой стопы по отношению к опорному звену; z_{Ck} – вертикальные координаты опорных точек (шарниров стопы) в системе отсчета связанной с корпусом; z_{Dk} и $z_{D''k}$ – координаты носка и пятки стопы, соответственно. Путем комбинирования перечисленных условий и введя ряд лингвистических переменных (препятствие высокое, невысокое, глубокое, неглубокое, широкое, неширокое и др.), на базе информации о движении стопы можно сформулировать правила поведения робота в форме нечетких условных суждений типа «Если A ..., то B ...». Например, для ситуации табл. 1,а, «если 1-я стопа в переносе, 2-я в фазе опоры и носок и пятка 1-ой стопы выше опорной точки 2-ой стопы и имеется положительная относительная угловая скорость 1-ой стопы, по отношению к опорному звену той же ноги, то препятствие «высокое»», его нельзя преодолеть в маршевом режиме движения. Возможные решения по управлению в этом случае – экстренная остановка, шаг назад, переход на режим с повышенной высотой шага, повторная попытка преодоления препятствия на малой скорости в автономном режиме или передача управления оператору. Если, при тех же условиях, относительная угловая скорость 1-ой стопы по отношению к опорному звену отрицательная табл. 1,б, то препятствие «невысокое» и движение может быть продолжено в маршевом режиме. Для ситуации табл. 1,в, «если 1-я стопа в переносе, 2-я в фазе опоры и носок 1-ой стопы выше опорной точки 2-ой стопы, пятка 1-ой стопы на уровне опорной точки 2-ой стопы и имеется положительная относительная угловая скорость 1-ой стопы по отношению к опорному звену, то препятствия нет», имеет место «программное» движение стопы. Для ситуации табл. 1,г, «если 1-я стопа в переносе, 2-я в фазе опоры и носок 1-ой стопы выше опорной точки 2-ой стопы, пятка 1-ой стопы ниже уровня опорной точки 2-ой стопы и имеется положительная относительная угловая скорость 1-ой стопы, то препятствие «неглубокое»» и можно продолжать движение в маршевом режиме.

Если при тех же условиях 1-ая стопа не вращается по отношению к опорному звену, табл. 1,д, то препятствие «глубокое» и необходима экстренная остановка аппарата и передача управления оператору. Дальнейшие возможные решения по управлению – шаг назад, переход на режим с повышенной длиной шага, повторная попытка преодоления препятствия на малой скорости в автономном режиме или передача управления оператору.

Таким образом, по относительному движению шарнирно закрепленных стоп шагающего аппарата с движителями циклового типа, характер которого полностью определяется датчиками внутренней информации, можно получить некоторую информацию о внешнем рабочем пространстве и текущей ситуации. Несмотря на то, что информация, как правило, носит неполный и неоднозначный характер, она может быть использована при принятии правильных решений по управлению. В частности, на базе нечетких алгоритмов управления, возможна реализация типовых рефлекторных движений, автономно выполняемых подводным шагающим роботом для исключения аварийных ситуаций.

Таблица 1

Примеры ситуаций, возникающих при встрече с препятствием

Возможные ситуации	Характеристика ситуации
 <p>а</p>	$U_1 = 0$ и $U_2 = 1$; $z_{D'1} > z_{C2}$, $z_{D''1} > z_{C2}$; $\omega_{41}^r > 0$
 <p>б</p>	$U_1 = 0$ и $U_2 = 1$; $z_{D'1} > z_{C2}$, $z_{D''1} > z_{C2}$; $\omega_{41}^r < 0$
 <p>в</p>	$U_1 = 0$ и $U_2 = 1$; $z_{D'1} > z_{C2}$, $z_{D''1} = z_{C2}$; $\omega_{41}^r > 0$
 <p>г</p>	$U_1 = 0$ и $U_2 = 1$; $z_{D'1} > z_{C2}$, $z_{D''1} < z_{C2}$; $\omega_{41}^r > 0$
 <p>д</p>	$U_1 = 0$ и $U_2 = 1$; $z_{D'1} > z_{C2}$, $z_{D''1} < z_{C2}$; $\omega_{41}^r = 0$

Устойчивость шагающих машин при преодолении уклонов. При движении традиционных колесных и гусеничных транспортных средств вдоль уклонов возможно их опрокидывание или сползание под уклон [24–25]. Опрокидывание и сползание под уклон возможно и при шагающем способе передвижения.

В общем случае устойчивость аппарата зависит от отношения высоты его центра масс h_C к ширине колеи B . Для уточнения критериев оптимизации механизмов шагания, отвечающих за устойчивость к опрокидыванию, были проведены испытания шагающего робота МАК-1 на слабонесущих грунтах. В ходе испытаний преодолевались уклоны и осуществлялось движение вдоль уклонов (рис. 6).

Было выяснено, что на слабых грунтах сползание шагающих машин под уклон маловероятно. Как правило силы сцепления F_k стопы с грунтом были существенно больше нормальных реакций N_k (рис. 7). Это обусловлено значительными деформациями грунта под опорными элементами (стопами) шагающих машин.



Рис. 6. Исследования устойчивости шагающего аппарата к опрокидыванию при преодолении уклонов

Рассмотрен способ повышения устойчивости к опрокидыванию при движении шагающего аппарата вдоль уклона за счет отдельного регулирования условного клиренса механизмов шагания правого и левого бортов. Механизмы шагания аппарата МАК-1 позволяют изменять условный клиренс в пределах $\Delta h = 0-0,2$ м. Такой диапазон изменения клиренса позволяет изменять угол наклона корпуса по отношению к опорной поверхности до $\beta = 10^\circ$ (рис. 7,а). В результате угол наклона опорной поверхности α как бы уменьшается на угол β .

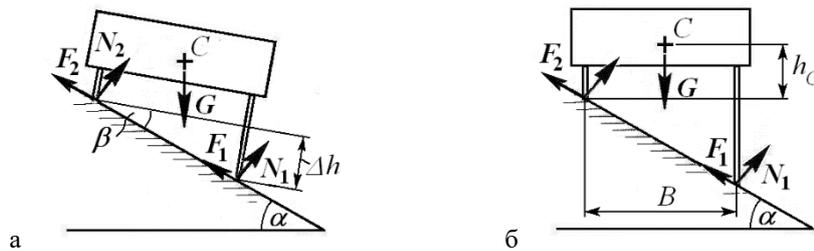


Рис. 7. Схема сил при движении вдоль уклона

Наибольший запас устойчивости при движении вдоль уклонов будет иметь место, если диапазон возможного изменения клиренса Δh механизмов шагания позволяет обеспечивать горизонтальное положение корпуса (рис. 7,б). В этом случае устойчивость аппарата уже не зависит от отношения h_c/B . Для обычных шагающих аппаратов в этом, во-первых, нет особой потребности, а во-вторых, это трудно достичь из-за используемых механизмов шагания. Это актуально для буровых и добычных шагающих платформ, передвигающихся по дну. Уже есть примеры выполнения шагающих платформ передвигающихся по дну. Известна, например, 8-ми ногая шагающая платформа компании «Namibia De Beers» (рис. 1,а), предназначенной для прибрежной добычи алмазов [26]. В России также ведутся разработки подобных систем. В частности, на АО «ФНПЦ «Титан-Баррикады»» прорабатывается конструкция роботизированной подводной буровой установки на базе двух шагающих платформ, предназначенной для освоения подводных месторождений нефти и природного газа на Арктическом шельфе [14]. Специфика шагающих платформ – высокое расположение центра масс. Рассмотрим случай преодоления уклонов платформами с ортогональным типом шагающего движителя. При ее решении задачи определения запаса устойчивости шагающих машин свойства грунта, как правило, не учитываются. В подводных условиях необходимо

учитывать специфические особенности подводных грунтов (пльвунных свойств, «компрессионного эффекта» препятствующего отрыву стопы от грунта и др.). Пльвунные свойства донных грунтов (пльвун – насыщенный водой грунт, разжижающийся при механическом воздействии на него) обуславливают необходимость ограничения максимальных опорных реакций с целью недопущения опрокидывания платформы вследствие потери несущей способности грунта под стопами шагающего движителя. Максимальные опорные реакции имеют место в момент смены стоп (при переступании). На их величину существенное влияние оказывает «компрессионная» сила – при отрыве ноги от грунта, из-за разрежения, возникающего под стопой, появляется сила, препятствующая ее отрыву. Штамповые испытания в условиях реальных водных объектов, показывают, что компрессионная сила на вязких донных грунтах может достигать значительной величины [11, 27]. Величина компрессионной силы существенно зависит от скорости отрыва стопы от грунта. Для «быстрых» движений стопы требуется большая сила. При «малой» силе отрыв стопы от грунта происходит с некоторой задержкой (после фильтрации воды в зону разрежения под стопой).

Если шагающая машина не имеет управляемой стопы, то для статически устойчивой ходьбы минимальное число ног, одновременно находящихся в фазе опоры, равно трем. Минимальное число ног статически устойчивой машины равно четырем. Четырехногая машина использует только один тип статически устойчивых походок, при этом ноги перемещаются по очереди одна за другой. На рис. 8 также приведено наихудшее с точки зрения устойчивости к опрокидыванию расположение стоп 6-ти ногой (при движении «тройками») и 8-ногой (при движении «четверками») шагающей машины. На рис. 8,б – 2, 4 и 6 стопа в опорной фазе, а 1, 3 и 5 отрываются от грунта, на (рис. 8,в) – 1, 3, 5 и 7 стопа в опорной фазе, а 2, 4 и 6 отрываются от грунта.

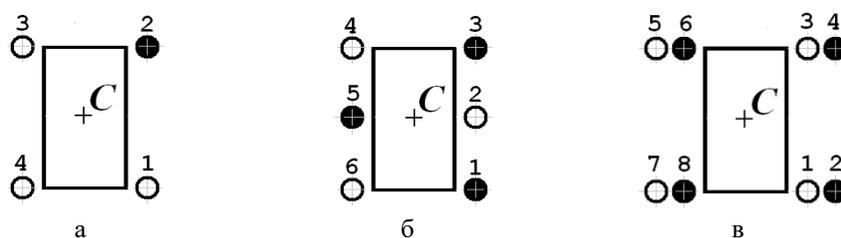


Рис. 8. Наихудшее с точки зрения устойчивости к опрокидыванию расположение стоп 4-х ногой (а), 6-ти ногой (б) и 8-ногой (в) шагающей платформы

При разрушении грунта под 1-й стопой (рис. 9,б), будет иметь место опрокидывание шагающей платформы вокруг точки O – грани опорного многоугольника проходящей через 3 и 4 стопы (рис. 9,а). При этом величина опорной реакции N_1 будет определяться пределом текучести грунта.

Процесс опрокидывания включает в себя несколько этапов. На начальном этапе вследствие потери несущей способности грунта под 1-й стопой она вместе с корпусом платформы поворачивается вокруг точки O и погружается в грунт. При этом 2-я стопа еще находится на опорной плоскости и пытается оторваться от грунта. Ее скорость в относительном движении по отношению к корпусу определяет угловую скорость платформы на этом этапе $\omega_0 = v_{1r}/B$, где v_{1r} – относительная скорость 1-й стопы; B – ширина колеи. В момент отрыва 2-й стопы от грунта платформа будет иметь угловую скорость ω_0 и уже отклонится от вертикали на угол $\varphi_0 = \omega_0 t$ (при $v_{1r} = const$). После отрыва 2-й стопы от грунта платформа будет продолжать вращаться вокруг точки O_1

под действием силы G . Очевидно, что для обеспечения динамической устойчивости угол поворота платформы $\varphi = \varphi_0 + \varphi_1$ должен быть меньше критического угла $\varphi_{кр}$, при котором платформа будет опрокидываться вокруг стоп правого борта (рис. 9,б). Угол φ_1 можно уменьшить, обеспечив плавучесть верхней части вышки (рис. 9). В этом случае выталкивающая сила F_A будет оказывать стабилизирующее действие на устойчивость платформы. Таким образом, потеря статической устойчивости шагающей платформы из-за потери несущей способности грунта под опорами одного из бортов не обязательно приведет к ее опрокидыванию.

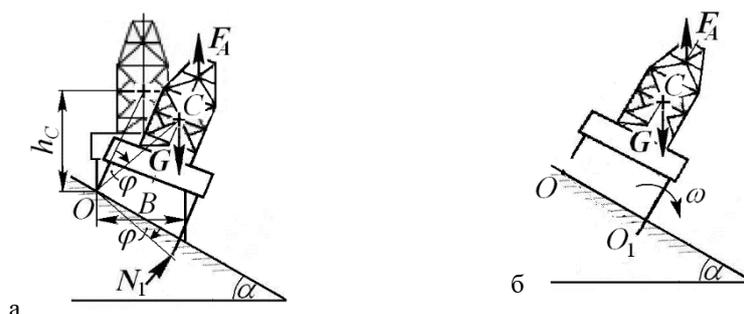


Рис. 9. Опрокидывание 4-х ногой шагающей платформы из-за потери несущей способности грунта под опорами правого борта

Заключение. Таким образом, исследования показали, что проблемы связанные с неустойчивостью шагающего аппарата обусловленная особенностью походки, потеря устойчивости шагающего аппарата при движении по неорганизованной поверхности и потеря устойчивости шагающих машин при преодолении уклонов может быть решена.

Результаты работы могут быть востребованы при разработке как простейших шагающих машин, например шагающих тракторов сельскохозяйственного назначения, так и для сложных шагающих робототехнических систем предназначенных для проведения грунтовых работ при дефиците сцепного веса, например, в подводных условиях либо в условиях ослабленной гравитации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ляхов Д.Г. Современные задачи подводной робототехники // Подводные исследования и робототехника. – 2012. – № 1. – С. 15-23.
2. Илларионов Г.Ю. Некоторые аспекты военного применения подводных роботов за рубежом // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 3 (128). – С. 65-75.
3. Илларионов Г.Ю., Сидоренко В.В., Смирнов С.В. Автономные необитаемые подводные аппараты для поиска и уничтожения мин // Подводные исследования и робототехника. – 2006. – № 1. – С. 31-39.
4. Сиденко К.С., Лаптев К.З., Илларионов Г.Ю. Управляемые по кабелю необитаемые подводные аппараты для поиска и уничтожения мин // Двойные технологии. – 2009. – № 3. – С. 28-31.
5. Сиденко К.С., Илларионов Г.Ю. Новые подходы к проблеме защиты объектов морской инфраструктуры от подводных диверсантов и террористов // Морская радиоэлектроника. – 2008. – № 4. – С. 2-9.
6. Андреев С.И., Казакова В.Е., Бабаева С.Ф., Черкашён Г.А. Твердые полезные ископаемые мирового океана: история открытий, геологическое изучение, перспективы освоения // Горный журнал. – 2013. – № 11. – С. 65-72.
7. Verichev S., Laurens de Jonge, Wiebe B., Rodney N. Deep mining: from exploration to exploitation // Minerals of the Ocean – 7 & Deep-Sea Minerals and Mining – 4: abstracts of International Conference / VNIIOkeangeologia. – St. Petersburg, 2014. – P. 126-138.

8. Подводно-технические работы. – Режим доступа: ptr.akva-eko.pf/content/podvodnyu-transheekoratel. – Загл. с экрана.
9. Арыканцев В.В., Чернышев В.В. Подводные исследования тягово-сцепных свойств и проходимости шагающего аппарата МАК-1 // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 10. – С. 169-178.
10. Chernyshev V.V., Arykantsev V.V., Kalinin Ya.V. Underwater Tests of The Walking Robot МАК-1 // Human-Centric Robotics: Proc. of the 20th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines CLAWAR 2017 (Portugal). – 2017. – P. 571-578.
11. Чернышев В.В., Арыканцев В.В., Гаврилов А.Е., Калинин Я.В. Исследования динамики взаимодействия движителя подводного шагающего аппарата с донным грунтом // Исследования наукограда. – 2015. – № 1. – С. 32-36.
12. Chernyshev V.V., Pryanichnikov V.E., Arykantsev V.V., Verzhinina I.P., Kalinin Ya.V. Research of the walking type of movement in underwater conditions // OCEANS 2019 – Marseille (Marseille, France, 17-20 June, 2019): Conference proceedings / Marine Technology Society, IEEE Oceanic Engineering Society. – 2019. – 6 p. – DOI: 10.1109/OCEANSE.2019.8867233. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8867233>.
13. Чернышев В.В., Арыканцев В.В. Испытания подводного шагающего аппарата в условиях водных объектов Волго-Ахтубинской поймы // Системы контроля окружающей среды. – 2017. – № 8 (28). – С. 24-29.
14. Чернышев В.В., Вершинина И.П., Арыканцев В.В. Динамическая устойчивость шагающих платформ передвигающихся по дну // Робототехника и искусственный интеллект: материалы XI всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием; Сибирский федеральный ун-т, Межинститутская базовая кафедра «Прикладная физика и космические технологии». – Красноярск, 2019. – С. 108-113.
15. Чернышев В.В., Арыканцев В.В. Структура энергозатрат шагающих машин и роботов при реализации больших тяговых усилий // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 1 (203). – С. 6-18.
16. Chernyshev V.V., Arykantsev V.V., Kalinin Ya.V. Passive foot control in cyclic walking mechanism // Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2017) (Saint Petersburg, Russia, 16-19 May 2017): International Conference: Proceedings. St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great, IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). – Publisher: IEEE, 2017. – 5 p. – DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076189. – URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8076189/>.
17. Арыканцев В.В., Пряничников В.Е., Чернышев В.В. Алгоритм адаптации подводного шагающего аппарата по информации о встрече стоп с препятствиями // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2018. – № 12. – С. 24-32.
18. Чернышев В.В., Арыканцев В.В. Цикловой механизм шага с трансформируемой траекторией опорной точки // Теория механизмов и машин. – 2017. – Т. 15, № 2 (34). – С. 71-79. – Режим доступа: <http://tmm.spbstu.ru/34/Chernyshev.pdf>.
19. Чернышев В.В., Арыканцев В.В. МАК-1 – подводный шагающий робот // Робототехника и техническая кибернетика. – 2015. – № 2. – С. 45-50.
20. Chernyshev V.V., Arykantsev V.V., Verzhinina I.P. Minimization of Energy Costs for Movement Resistance of Ground for Walking Device by the Control of Support Points Motion // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019) (Sochi, Russian Federation, March 25-29, 2019). Vol. II, part 2, Springer Nature Switzerland AG, 2020. – P. 839-848. – URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-22063-1>. – (Book ser.: Lecture Notes in Mechanical Engineering – LNME).
21. Yoo S.Y., Jun B.H., Shim H. Design of static gait algorithm for hexapod subsea walking robot: Crabster, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, A. – September 2014. – Vol. 38, Issue 9. – P. 989-997.
22. Bong Huan Jun. Crabster CR200: New Record of Underwater Walking Speed – 0.5 knots. – <https://youtu.be/O8361Uq97DQ>.
23. Underwater walking machine МАК-1 movement in underwater conditions with velocity about 2.5 knots. – <https://youtu.be/FrynJTHeuE>.
24. Hong S., Kim H.W., Choi J.S. Transient Dynamic Analysis of Tracked Vehicles on Extremely Soft Cohesive soil // The 5th ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium. – 2002. – P. 100-107.

25. Kim H.W., Hong S., Choi J.S. Comparative Study on Tracked Vehicle Dynamics on Soft Soil: Single-Body Dynamics vs. Multi-body Dynamics, ISOPE, OMS-2003, Tsukuba, Japan, 2003. – P. 132-138.
26. Nautilus Minerals. – Режим доступа: www.nautilusminerals.com. – Загл. с экрана.
27. Chernyshev V.V., Goncharov A.A., Arykantsev V.V. Modeling of vibroimpact processes which occurs in feet changing of the walking units at viscoelastic grounds // Procedia Engineering. – Vol. 176, June 29 – July 01, 2016. Samara, Russia / ed. by Viktor Sverbilov and Andrew Plummer. – Elsevier publishing, 2017. – P. 387-393.

REFERENCES

1. Lyakhov D.G. Sovremennye zadachi podvodnoy robototekhniki [Modern problems of underwater robotics], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater research and robotics], 2012, No. 1, pp. 15-23.
2. Illarionov G.Yu. Nekotorye aspekty voennogo primeneniya podvodnykh robotov za rubezhom [Some aspects of the military use of underwater robots abroad], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 3 (128), pp. 65-75.
3. Illarionov G.Yu., Sidorenko V.V., Smirnov S.V. Avtonomnye neobitaemye podvodnye apparaty dlya poiska i unichtozheniya min [Autonomous uninhabited underwater vehicles for searching and destroying mines], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater research and robotics], 2006, No. 1, pp. 31-39.
4. Sidenko K.S., Laptev K.Z., Illarionov G.Yu. Upravlyаемые по кабелю neobitaemye podvodnye apparaty dlya poiska i unichtozheniya min [Cable-operated uninhabited underwater vehicles for searching and destroying mines], *Dvoynye tekhnologii* [Dual technology], 2009, No. 3, pp. 28-31.
5. Sidenko K.S., Illarionov G.Yu. Novye podkhody k probleme zashchity ob"ektov morskoy infrastruktury ot podvodnykh diversantov i terroristov [New approaches to the problem of protection of marine infrastructure objects from underwater saboteurs and terrorists], *Morskaya radioelektronika* [Marine radio electronics], 2008, No. 4, pp. 2-9.
6. Andreev S.I., Kazakova V.E., Babaeva S.F., Cherkashev G.A. Tverdye poleznye iskopaemye mirovogo okeana: istoriya otkrytiy, geologicheskoe izuchenie, perspektivy osvoeniya [Solid minerals of the world ocean: the history of discoveries, geological study, prospects for development], *Gornyy zhurnal* [Mining journal], 2013, No. 11, pp. 65-72.
7. Verichev S., Laurens de Jonge, Wiebe B., Rodney N. Deep mining: from exploration to exploitation, *Minerals of the Ocean – 7 & Deep-Sea Minerals and Mining – 4: abstracts of International Conference, VNIIOkeangeologia*. St. Petersburg, 2014, pp. 126-138.
8. Podvodno-tekhnicheskie raboty [Underwater technical work]. Available at: ptr.akva-eko.rf/content/podvodnyy-transheekopatel.
9. Arykantsev V.V., Chernyshev V.V. Podvodnye issledovaniya tyagovo-stsepnnykh svoystv i prokhodimosti shagayushchego apparata MAK-1 [Underwater research of traction-coupling properties and cross-country walking device MAK-1], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 10, pp. 169-178.
10. Chernyshev V.V., Arykantsev V.V., Kalinin Ya.V. Underwater Tests of The Walking Robot MAK-1, *Human-Centric Robotics: Proc. of the 20th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines CLAWAR 2017 (Portugal)*, 2017, pp. 571-578.
11. Chernyshev V.V., Arykantsev V.V., Gavrillov A.E., Kalinin Ya.V. Issledovaniya dinamiki vzaimodeystviya dvizhitelya podvodnogo shagayushchego apparata s donnym gruntom [Research on the dynamics of interaction between the propulsion system of an underwater walking vehicle and the bottom soil], *Issledovaniya naukoigrada* [Research of the science city], 2015, No. 1, pp. 32-36.
12. Chernyshev V.V., Pryanichnikov V.E., Arykantsev V.V., Vershinina I.P., Kalinin Ya.V. Research of the walking type of movement in underwater conditions, *OCEANS 2019 – Marseille (Marseille, France, 17-20 June, 2019): Conference proceedings*, Marine Technology Society, IEEE Oceanic Engineering Society, 2019, 6 p. DOI: 10.1109/OCEANSE.2019.8867233. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8867233>.
13. Chernyshev V.V., Arykantsev V.V. Ispytaniya podvodnogo shagayushchego apparata v usloviyakh vodnykh ob"ektov Volgo-Akhtubinskoy poymy [Tests of underwater walking apparatus in the conditions of water bodies of the Volga-Akhtuba floodplain], *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy* [Environmental monitoring systems], 2017, No. 8 (28), pp. 24-29.

14. Chernyshev V.V., Vershinina I.P., Arykantsev V.V. Dinamicheskaya ustoychivost' shagayushchikh platform peredvigayushchikhsya po dnu [Dynamic stability of walking platforms moving on the bottom], *Robototekhnika i iskusstvennyy intellekt: materialy XI vseros. nauch.-tekh. konf. s mezhdunar. Uchastiem* [Robotics and artificial intelligence: proceedings of the XI all-Russian scientific and technical conference with international participation]; Sibirskiy federal'nyy un-t, Mezhhinstitutskaya bazovaya kafedra «Prikladnaya fizika i kosmicheskie tekhnologii». Krasnoyarsk, 2019, pp. 108-113.
15. Chernyshev V.V., Arykantsev V.V. Struktura energozatrat shagayushchikh mashin i robotov pri realizatsii bol'shikh tyagovykh usiliiy [Structure of energy consumption of walking machines and robots when implementing large traction forces], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 1 (203), pp. 6-18.
16. Chernyshev V.V., Arykantsev V.V., Kalinin Ya.V. Passive foot control in cyclic walking mechanism, *Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2017) (Saint Petersburg, Russia, 16-19 May 2017): International Conference: Proceedings. St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great, IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)*. Publisher: IEEE, 2017, 5 p. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076189. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8076189/>.
17. Arykantsev V.V., Pryanichnikov V.E., Chernyshev V.V. Algoritm adaptatsii podvodnogo shagayushchego apparata po informatsii o vstreche stop s prepyatstviyami [Algorithm of adaptation of underwater walking apparatus based on information about the meeting of stops with obstacles], *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy* [Information-measuring and control systems], 2018, No. 12, pp. 24-32.
18. Chernyshev V.V., Arykantsev V.V. TSiklovoy mekhanizm shaganiya s transformiruemoy traektoriey opomoy tochki [Cyclical mechanism of walking with a transformable trajectory of the reference point], *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Theory of mechanisms and machines], 2017, Vol. 15, No. 2 (34), pp. 71-79. Available at: <http://tmm.spbstu.ru/34/Chernyshev.pdf>.
19. Chernyshev V.V., Arykantsev V.V. MAK-1 – podvodnyy shagayushchiy robot [MAK-1-underwater walking robot], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and technical Cybernetics], 2015, No. 2, pp. 45-50.
20. Chernyshev V.V., Arykantsev V.V., Vershinina I.P. Minimization of Energy Costs for Movement Resistance of Ground for Walking Device by the Control of Support Points Motion, *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019) (Sochi, Russian Federation, March 25-29, 2019)*. Vol. II, part 2, Springer Nature Switzerland AG, 2020, pp. 839-848. Available at: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-22063-1>. (Book ser.: Lecture Notes in Mechanical Engineering – LNME).
21. Yoo S.Y., Jun B.H., Shim H. Design of static gait algorithm for hexapod subsea walking robot: Crabster, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, A*. September 2014, Vol. 38, Issue 9, pp. 989-997.
22. Bong Huan Jun. Crabster CR200: New Record of Underwater Walking Speed – 0.5 knots. Available at: <https://youtu.be/O8361Uq97DQ>
23. Underwater walking machine MAK-1 movement in underwater conditions with velocity about 2.5 knots. Available at: <https://youtu.be/FrynJTHeuE>
24. Hong S., Kim H.W., Choi J.S. Transient Dynamic Analysis of Tracked Vehicles on Extremely Soft Cohesive soil, *The 5th ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium*, 2002, pp. 100-107.
25. Kim H.W., Hong S., Choi J.S. Comparative Study on Tracked Vehicle Dynamics on Soft Soil: Single-Body Dynamics vs. Multi-body Dynamics, *ISOPE, OMS-2003*, Tsukuba, Japan, 2003, pp. 132-138.
26. Nautilus Minerals. Available at: www.nautilusminerals.com.
27. Chernyshev V.V., Goncharov A.A., Arykantsev V.V. Modeling of vibroimpact processes which occurs in feet changing of the walking units at viscoelastic grounds, *Procedia Engineering*, Vol. 176, June 29 – July 01, 2016. Samara, Russia, ed. by Viktor Sverbilov and Andrew Plummer. Elsevier publishing, 2017, pp. 387-393.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. И.А. Несмиянов.

Чернышев Вадим Викторович – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ВолгГТУ»); e-mail: vad.chernyshev@mail.ru; 400005, г. Волгоград, пр-т им. Ленина, 28; тел.: +78442248099; д.т.н.; доцент; профессор.

Вершинина Ирина Петровна – e-mail: i_vershinina@vstu.ru; к.т.н.; доцент.

Арыканцев Владимир Владимирович – e-mail: arvstu@mail.ru; м.н.с.

Chernyshev Vadim Viktorovich – Volgograd State Technical University (VSTU); e-mail: vad.chernyshev@mail.ru; 28, Lenin avenue, Volgograd, 400005, Russia; phone: +78442248099; dr. of eng. sc.; associate professor; professor.

Vershinina Irina Petrovna – e-mail: i_vershinina@vstu.ru; cand. of eng. sc.; associate professor.

Arykantsev Vladimir Vladimirovich – e-mail: arvstu@mail.ru; junior researcher.

УДК 004.021: 004.512.4

DOI 10.18522/2311-3103-2020-1-66-78

**Я.А. Туровский, С.С. Харченко, Р.В. Мещеряков, А.Ю. Исхаков,
А.О. Исхакова**

**АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНТЕРФЕЙСА УПРАВЛЕНИЯ
РОБОТ-ЧЕЛОВЕК ПРИ ВЫДЕЛЕНИИ ЗРИТЕЛЬНЫХ ВЫЗВАННЫХ
ПОТЕНЦИАЛОВ НА ОСНОВЕ МНОГОМЕРНОГО ИНДЕКСА
СИНХРОНИЗАЦИИ***

Целью исследования является построения систем человеко-машинного управления. Основные способы построения таких систем, способы выделения вызванных потенциалов в электроэнцефалограммах. В статье приведены исследования сигналов электроэнцефалограмм с устоявшимися зрительными вызванными потенциалами для разных частот фотостимуляции, на основе метода многомерного индекса синхронизации. Рассматривается влияние длины обрабатываемого окна на точность распознавания частоты исследуемого сигнала. Так же в ходе исследований авторы проверяют необходимость предобработки исходных сигналов посредством полосовой фильтрации сигнала. Кроме того, рассматривается возможность использования многомерного индекса синхронизации в многоканальном режиме. Результатом исследования авторов является рекомендации по используемым параметрам для выделения устоявшихся зрительных вызванных потенциалов в методе многомерного индекса синхронизации. Показана возможность использования алгоритмов на основе многомерного индекса синхронизации в режиме реального времени. Полученные результаты имеют практическую значимость, так как могут применяться для построения нейрокомпьютерных интерфейсов на основе зрительных вызванных потенциалов и могут быть в дальнейшем использованы в формировании теории управления робототехнических систем различного назначения и в реализации решений по организации взаимодействия человека и машины в узких практических задачах.

Зрительные вызванные потенциалы; ЭЭГ; интерфейс мозг-компьютер; многомерный индекс синхронизации; человеко-машинное взаимодействие.

* Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты № 19-08-00331, № 19-29-01156.

Y.A. Turovskij, S.S. Kharchenko, R.V. Meshcheryakov, A.Y. Iskhakov,
A.O. Iskhakova

**ALGORITHMIC SUPPORT OF THE INTERFACE OF MANAGEMENT
OF ROBOT-HUMAN WITH THE STEADY STATE VISUAL EVOKED
POTENTIALS BASED ON THE MULTIVARIATE SYNCHRONIZATION
INDEX**

The aim of the study is to build human-machine control systems. The main methods for constructing such systems, methods for isolating evoked potentials in electroencephalograms. The article presents studies of electroencephalogram signals with steady state visual evoked potentials for different frequencies of photostimulation, based on the method of multivariate synchronization index. The influence of the length of the processed window on the accuracy of recognition of the frequency of the studied signal is considered. In the course of research, the authors verify the need for pre-processing of the original signals by means of bandpass signal filtering. In addition, the possibility of using a multi-dimensional synchronization index in multi-channel mode is being considered. The result of the authors study is recommendations on the parameters used to highlight the established visual evoked potentials in the method of multivariate synchronization index. The possibility of using algorithms based on a multivariate synchronization index in real time is shown. The results obtained are of practical importance, since they can be used to build neurocomputer interfaces based on visual evoked potentials and can be further used in the formation of control theory of robotic systems for various purposes and in the implementation of solutions for the organization of human-machine interaction in narrow practical problems.

Visual evoked potentials; EEG; brain-computer interface; multidimensional synchronization index; human-machine interaction.

Введение. Начиная с 70-х годов XX века направление человеко-машинного взаимодействия стало активно развиваться после того, как в 1977 году Жак Видаль провел эксперимент, в рамках которого на основе зрительных вызванных потенциалов было осуществлено управление курсором на экране монитора [6]. Совместное использование нейропротезирования и интерфейса человек-компьютер уже сегодня помогают восполнять утрату зрения, слуха, нарушений опорно-двигательного аппарата. Интерфейс «мозг-компьютер» – это мостик, который способен соединять нейронные структуры моторной коры с роботизированными руками или экзоскелетами. Для управления роботизированными устройствами используются двунаправленные системы «мозг-компьютер» с биологической обратной связью [11, 14]. Использование электроэнцефалографии (ЭЭГ) получило широкое распространение за счет неинвазивности, однако до сих пор существует и ряд проблем, такие как низкое пространственное разрешение, отсутствие возможности использовать высокочастотные сигналы [8, 12]. Кроме того, в ЭЭГ кроме полезного сигнала присутствуют шумы – спонтанной активности мозга, которые затрудняют распознавание сигналов [9]. Одним из способов реализации таких систем на основе ЭЭГ является использование устоявшихся зрительных вызванных потенциалов (УЗВП) [5, 18–20]. Регистрация зрительных вызванных потенциалов мозга является объективным и неинвазивным методом тестирования функций ЦНС. Вызванные потенциалы – это электрические отклики мозга на зрительные, слуховые, сенсорные и другие стимулы. Важным является тот факт, что сигналы вызванных потенциалов на какой-либо раздражитель схожи с сигналами, генерируемыми в случае, когда человек представляет раздражитель.

С каждым годом количество публикаций по данной тематике и изделий, реализующих человеко-машинное взаимодействие, представляемых на выставках и научно-технических конференциях, неуклонно растет [7, 10, 15, 17]. Использование таких систем имеет самое широкое применение от развлекательных систем дополненной реальности до медицинских изделий, изделий военной промышленности, роботизированных устройств.

Классические способы обработки сигналов ЭЭГ. Существует различные способы для обработки сигналов ЭЭГ, наиболее популярные из них на сегодняшний день: частотный анализ на основе преобразования Фурье и вейвлетов, канонический корреляционный анализ, методы синхронного когерентного накопления и/или усреднения, индекс многомерной синхронности.

Методы когерентного накопления и усреднения направлены на увеличение соотношения сигнал/шум, однако при низком исходном соотношении сигнал/шум требуется огромное количество суммаций. Как правило методы когерентного накопления и усреднения реализованы на аппаратном уровне в устройствах съема ЭЭГ. Для определения состояний синхронизации и десинхронизации сенсомоторных ритмов ЭЭГ переходят от представления сигналов как функции времени, к представлению сигнала в частотной области. Переход к частотной области осуществляется путем разложения сигнала на гармонические составляющие при помощи дискретного преобразования Фурье либо вейвлет-преобразования [13], которое в отличие от дискретного преобразования Фурье, рассматривающего сигнал, как стационарный, позволяет отследить динамику изменения гармонических составляющих сигнала.

Канонический корреляционный анализ [16] представляет собой многопараметрический статистический метод для поиска линейных комбинаций, которые максимизируют корреляцию между двумя наборами данных (формула 1). В качестве первого набора данных используется сигнал ЭЭГ, в качестве второго набор сигналов, удовлетворяющих формуле 2.

$$\max_{W_x, W_y} p(x, y) = \frac{W_x^T X Y^T W_y}{\sqrt{W_x^T X X^T W_x W_y^T Y Y^T W_y}} \quad (1)$$

$$Y(t) = \begin{bmatrix} \sin(2\pi ft) \\ \cos(2\pi ft) \\ \dots \\ \sin(2\pi Nft) \\ \cos(2\pi Nft) \end{bmatrix}, t = \frac{1}{F_s}, \frac{2}{F_s}, \dots, \frac{K}{F_s} \quad (2)$$

где N – порядковый номер гармоники, K – количество отсчетов, F_s – частота дискретизации, $Y(t)$ – опорный сигнал, $X(t)$ – исходный сигнал ЭЭГ.

Многомерный индекс синхронизации для выделения устойчивых зрительных вызванных потенциалов. В основе многомерного индекса синхронизации [1] используется принцип синхронизации многоканальной ЭЭГ и опорных сигналов, которые должны соответствовать частоте зрительного стимула (частоте фотостимуляции) и выбираются на основе формулы 2. Первоначально корреляционная матрица между двумя сигналами рассчитывается с использованием формул 3–8.

$$D_{11} = \left(\frac{1}{M}\right) X X^T. \quad (3)$$

$$D_{22} = \left(\frac{1}{M}\right) Y Y^T. \quad (4)$$

$$D_{21} = D_{12} = \left(\frac{1}{M}\right) X Y^T. \quad (5)$$

Чтобы как можно сильнее снизить влияние автокорреляции на меру синхронизации, рассчитывается линейное преобразование (6):

$$T = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{D_{11}}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{D_{22}}} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

После этого строится корреляционная матрица, которая вычисляется в соответствии с (10):

$$S = \begin{bmatrix} I_{1 \times 1} & \frac{1}{\sqrt{D_{11}}} D_{12} \frac{1}{\sqrt{D_{22}}} \\ \frac{1}{\sqrt{D_{22}}} D_{21} \frac{1}{\sqrt{D_{11}}} & I_{2N_h \times 2N_h} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Мера многомерного индекса синхронизации определяется в соответствии с формулой 11:

$$R_i = 1 + \frac{\sum \lambda'_i \log(\lambda'_i)}{\log(P)}, \quad (8)$$

где λ'_i – нормированные собственные значения S , $P = N + Nh$ и Nh обозначают число строк в опорном сигнале $B(t)$. Частота фотостимуляции, определяется как частота, соответствующая максимальному значению R .

Это метод позволяет выделять устоявшиеся зрительные вызванные потенциалы на основе нескольких каналов, что в теории должно способствовать точности распознавания и созданию более совершенных, систем «мозг-компьютер» для управления робототехническими устройствами (рис. 1).

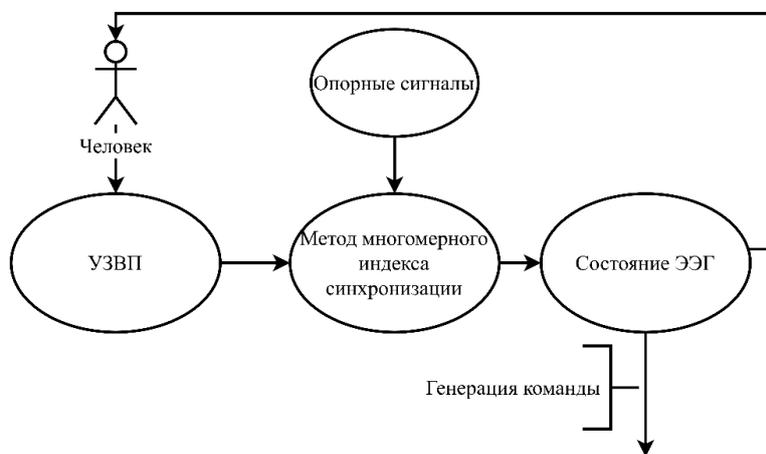


Рис. 1. Схема использования многомерного индекса синхронизации для выделения устоявшихся зрительных вызванных потенциалов в человеко-машинном взаимодействии

Одноканальный режим использования многомерного индекса синхронизации. На основе метода многомерного индекса синхронизации [1] был разработан алгоритм и реализован в пакете прикладных программ MATLAB (рис. 2).

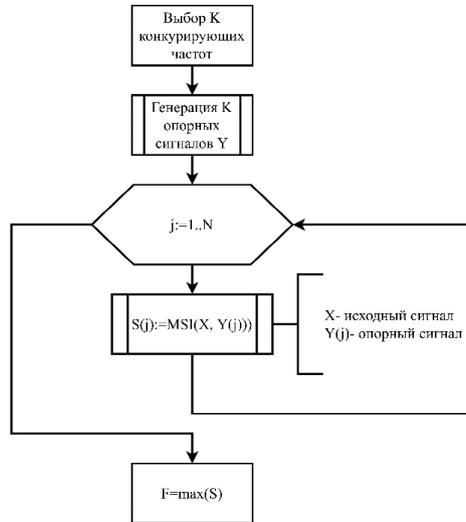


Рис. 2. Блок-схема алгоритма определения частоты УЗВП на основе многомерного индекса синхронизации

Программная реализация скрипта MATLAB для определения индекса многомерной синхронизации представлена ниже, здесь x – сигнал ЭЭГ, в общем случае матрица размером N на M , где N – число каналов, M – число отсчетов; y – матрица размером $4N$ на M , представляющая набор опорных сигналов, по 4 на каждый из каналов изначального сигнала.

```

function S = MSI(x, y)
[N, M]=size(x);
[NH, ~] = size(y);
P = N + NH;
c12=(1/M)*x*y';
c21=c12';
c11=(1/M)*(x*x');
c22=(1/M)*(y*y');
C=[c11 c12;c21 c22];
C11=c11^-0.5;
C22=c22^-0.5;
[a, b]=size(C22);
U=zeros(b+N,b+N);
U(1:N,1:N)=C11;
U(N+1:b+N,N+1:b+N)=C22;
R=U*C*U';
e=eig(R);
E=e/sum(e);
S=1+(sum(E.*log(E)))/log(P);
  
```

Программная реализация скрипта Matlab для генерации опорных сигналов представлена ниже. Входные данные: f – исходная частота, для которой необходимо сгенерировать опорные сигналы; sampling_freq – частота дискретизации, она должна соответствовать частоте дискретизации исходного сигнала ЭЭГ; signal_size – количество отсчетов.

```

function tr = refer_signals(f, sampling_freq, signal_size)
ref=[];
fr = [];
y=[1 2 3 4];
Y=y*f;
for value = Y
    fr = [fr value];
end
n=length(fr);
tr=zeros(2*n,signal_size);
for i=1:n
    for t=1:signal_size;
        ref(1,t)=sin(2*pi*fr(i)*t/sampling_freq);
        ref(2,t)=cos(2*pi*fr(i)*t/sampling_freq);
    end
    for t=1:signal_size;
        tr((2*i)-1,t)=ref(1,t);
        tr(2*i,t)=ref(2,t);
    end
end
end

```

Используя разработанное программное обеспечение были изучены 60 сигналов ЭЭГ с устоявшимися зрительными вызванными потенциалами 30 взрослых людей мужчин и женщин без противопоказаний к снятию ЭЭГ и фото стимуляции. Частота фотостимуляции составляла 8 и 14 Гц. Частота дискретизации снятия сигнала составляла 5 кГц. Каждый из сигналов разбивался на окна размером 500, 750 и 1000 отсчетов, что соответствует эпохе анализа в 100, 150 и 200 миллисекунд соответственно. Перед применением непосредственно поиска частоты УЗВП сигналы подвергались фильтрации с использованием полосового фильтра Баттерворта [2]. После этого определение частоты УЗВП происходило на том же наборе сигналов, но уже без использования предварительной фильтрации сигнала. Границы фильтра были установлены в 4 и 30 Гц. Точность распознавания определялась как количество эпох, в которых была распознана искомая частота при конкурирующих частотах 6-24 Гц с шагом в 2 герца. Результаты по каждому из набора сигналов с частотой фотостимуляции 14 Гц для всех описанных ситуаций представлены в табл. 1. Каждый набор сигналов соответствует отдельному человеку, данные о лице кому принадлежит исходная ЭЭГ были обезличены.

Таблица 1

Результаты исследования для набора сигналов частотой 14 Гц

14 Гц						
Идентификатор	Без фильтрации			Полосовая фильтрация (4-30 Гц)		
	500	750	1000	500	750	1000
B_Ery	0,73	0,97	0,95	0,00	0,93	0,95
B_Bel	0,98	0,97	0,95	0,00	0,70	0,95
B_Bun	0,53	0,83	0,95	0,00	0,73	0,95
B_Vas	0,00	0,73	0,95	0,00	0,93	0,95
B_Kra	0,98	0,97	0,95	0,00	0,93	0,95

B_Ryb	0,98	0,97	0,95	0,00	0,93	0,95
B_Sid	0,98	0,97	0,95	0,00	0,93	0,95
B_Tag	0,98	0,97	0,95	0,00	0,93	0,95
B_Ush	0,00	0,60	0,95	0,00	0,93	0,95
B_Fis	0,98	0,97	0,95	0,00	0,90	0,95
B_gaj	0,98	0,97	0,95	0,00	0,93	0,95
B_gus	0,98	0,97	1,00	0,00	0,50	0,85
B_dem	0,95	0,97	0,95	0,00	0,93	0,95
B_der	0,72	0,90	0,95	0,00	0,93	0,95
B_zap	0,95	0,97	1,00	0,00	0,60	0,90
B_zue	0,98	0,97	1,00	0,00	0,47	0,85
B_kar	0,97	0,97	1,00	0,00	0,50	0,85
B_kolm	0,98	0,97	0,95	0,00	0,93	0,95
B_kolo	0,77	0,93	0,95	0,00	0,93	0,95
B_kry	0,98	0,97	0,95	0,00	0,93	0,95
B_mak	0,95	0,90	0,93	0,05	0,90	0,86
B_mel	0,53	0,93	0,95	0,00	0,90	0,95
B_nik	0,95	0,97	1,00	0,00	0,53	0,85
B_pet	0,83	0,97	1,00	0,00	0,43	0,80
B_pol	0,98	0,97	1,00	0,00	0,50	0,85
B_pri	0,05	0,83	0,95	0,00	0,43	0,85
B_smi	0,83	0,97	0,95	0,00	0,93	0,95
B_tol	0,98	0,97	1,00	0,00	0,43	0,75
B_sht	0,98	0,97	0,95	0,00	0,93	0,95
B_yas	0,98	0,97	0,95	0,00	0,93	0,95
Среднее значение	0,82	0,93	0,96	0,00	0,78	0,91

Как видно из таблицы с увеличением размера окна количество состояний распознанных верно увеличивается, кроме того, при использовании предварительной фильтрации на малых размерах окна (500 отсчетов) количество правильно распознанных состояний было равно 2, что составляет 0,05 для одного сигнала, а для всей выборки на уровне статистической погрешности. Для того чтобы установить направленность изменений доли, верно, распознанных состояний и их выраженность при использовании предварительной фильтрации сигнала был проведен расчет t-критерия Вилкоксона [3, 4]. Проверка гипотезы установила, что показатели использования многомерного индекса синхронизации без фильтрации превышают значения использования многомерного индекса синхронизации с предварительной фильтрацией исследуемого сигнала. Влияние размера окна и наличие предварительной фильтрации при анализе сигналов на данном наборе данных подтвердилось. Для второго набора сигналов, ЭЭГ снятых у той же группы людей, на

том же самом оборудовании, но с частотой фотостимуляции 8 Гц, на аналогичных размерах окон с фильтрацией и без наблюдается аналогичная ситуация, с увеличением размера окна доля правильно распознанных состояний увеличивается и при этом, для одних и тех же эпох анализа более высокие результаты показывает алгоритм без предварительной фильтрации сигналов. Дальнейшее увеличение эпохи анализа показывает что доля, верно, распознанных состояний увеличивается и при размере окна в 1500 отсчетов (300 мс) уже составляет 1, такие результаты сохраняются вплоть до размера окна 5000 отсчетов (1 секунда).

Все представленные выше результаты были получены в одноканальном режиме вычисления многомерного индекса синхронизации, когда опорный сигнал сравнивается с одним каналом ЭЭГ, разработанный алгоритм на основе многомерного индекса синхронизации позволяет сравнивать опорные сигналы сразу с несколькими каналами ЭЭГ. Поскольку исследования показали, что, применение полосовой фильтрации не дает положительных результатов, дальнейшие исследования по влиянию количества используемых каналов проводились без предварительной фильтрации сигналов. Для исследования многоканального режима использования для набора сигналов 14 Гц и 8 Гц, без предварительной фильтрации в двухканальном и четырехканальном режимах выявлялась доля, верно, распознанных состояний для окон размером 500, 750 и 1000 отсчетов без перекрытия. Результаты определения состояния для сигналов с частотой фотостимуляции 14 Гц представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты исследования для набора сигналов частотой 14 Гц
в многоканальном режиме**

14 Гц						
Идентификатор	Двухканальный режим			Четырехканальный режим		
	500	750	1000	500	750	1000
B_Ery	0,03	1,00	1,00	0,00	0,05	1,00
B_Bel	0,73	1,00	1,00	0,00	0,00	1,00
B_Bun	0,17	0,90	1,00	0,00	0,15	1,00
B_Vas	0,00	0,65	1,00	0,03	0,75	1,00
B_Kra	0,93	1,00	1,00	0,47	0,80	1,00
B_Ryb	0,87	1,00	1,00	0,00	0,60	1,00
B_Sid	0,77	1,00	1,00	0,13	0,60	1,00
B_Tag	0,07	1,00	1,00	0,07	0,95	1,00
B_Ush	0,00	0,60	1,00	0,00	0,95	1,00
B_Fis	0,07	1,00	1,00	0,00	0,40	1,00
B_gaj	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	1,00
B_gus	0,23	1,00	1,00	0,00	0,95	1,00
B_dem	0,00	0,80	1,00	0,00	0,95	1,00
B_der	0,37	0,95	1,00	0,00	0,70	1,00
B_zap	0,43	1,00	1,00	0,23	0,90	1,00
B_zue	0,87	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00

<u>B_kar</u>	0,07	1,00	1,00	0,00	0,90	1,00
<u>B_kolm</u>	0,00	0,95	1,00	0,00	0,50	1,00
<u>B_kolo</u>	0,07	0,60	1,00	0,00	0,50	1,00
<u>B_kry</u>	0,43	0,73	1,00	0,13	0,50	1,00
<u>B_mak</u>	0,57	0,90	1,00	0,00	0,60	1,00
<u>B_mel</u>	0,13	0,90	1,00	0,13	0,60	1,00
<u>B_nik</u>	0,13	1,00	1,00	0,00	0,55	1,00
<u>B_pet</u>	0,00	1,00	1,00	0,00	0,80	1,00
<u>B_pol</u>	1,00	1,00	1,00	0,27	0,85	1,00
<u>B_pri</u>	0,13	0,90	1,00	0,00	0,15	1,00
<u>B_smi</u>	0,83	1,00	1,00	0,07	1,00	1,00
<u>B_tol</u>	0,63	1,00	1,00	0,00	0,60	1,00
<u>B_sht</u>	0,43	1,00	1,00	0,00	0,55	1,00
<u>B_yas</u>	0,97	1,00	1,00	0,27	0,80	1,00
Среднее значение	0,40	0,93	1,00	0,06	0,62	1,00

Как видно из табл. 2 использование многоканального режима положительно влияет на качество выделения устоявшихся зрительных вызванных потенциалов. Однако при длине окна анализа 500 и 750 отсчетов, что равно 100 и 150 мс соответственно, в некоторых случаях доля, верно, распознанных образов меньше либо равна 0,5. С увеличением эпохи анализа до 1000 отсчетов (200 мс) для обоих наборов сигналов (8 Hz и 14 Hz) исходная частота была, верно, распознана алгоритмом. При дальнейшем увеличении окна анализа двухканальный и четырехканальный режимы показывают одинаковые результаты.

Использования методов биологической обратной связи в интерфейсах человек-робот, невозможно если в их основе не лежат алгоритмы и программы позволяющие работать в режиме реального времени. Под режимом реального времени в данной работе подразумевается способность системы определять состояние за промежуток времени меньше либо равный длине исследуемого сигнала. Таким образом если разработанное программное обеспечение позволяет определять частоту сигналов ЭЭГ длиной T , за время t , такое что $t < T$, работа в режиме реального времени имеет место быть.

При исследовании сигналов в одноканальном и многоканальном режимах, кроме всего прочего каждый раз вычислялось время работы t , которое необходимо для определения частоты сигнала, в это время входят и затраты процессорного времени на генерацию опорных сигналов, результаты для одноканального режима представлены на рис. 3.

Среднее время работы скрипта для определения частоты сигнала в одноканальном режиме для сигнала длиной 1 секунда составило 28,1 мсек, медиана 27,4 мсек, для сигнала длиной 200 мсек среднее время работы составило 9,27 мсек, медиана 8,3 мсек. Для многоканального режима время определения частоты сигнала длиной 1 секунда среднее 31,3, медиана 30,1. Для сигнала длиной 200 мсек среднее 7,66 медиана 6,5. Представленные результаты получены на персональном компьютере под управлением операционной системы Windows 10, с процессором

Intel Core i7-8565U, вычислительная мощность данного процессора, согласно официальной документации, составляет 150 ГФлопс. Полученные результаты говорят о том что использование алгоритма на основе многомерного индекса синхронизации в 4-х канальном режиме возможно в режиме реального времени.

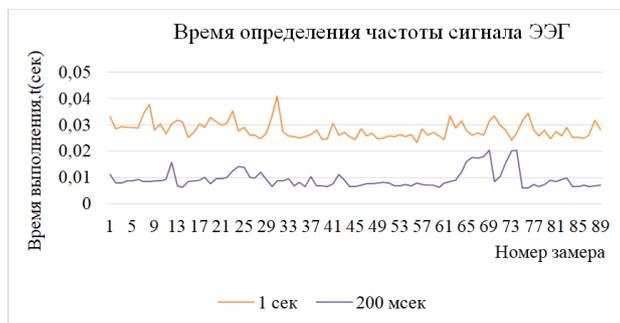


Рис. 3. Скорость работы алгоритма на основе метода многомерного индекса синхронизации в одноканальном режиме.

Для многоканального режима (4 канала) результаты замера скорости работы представлены на рис. 4.

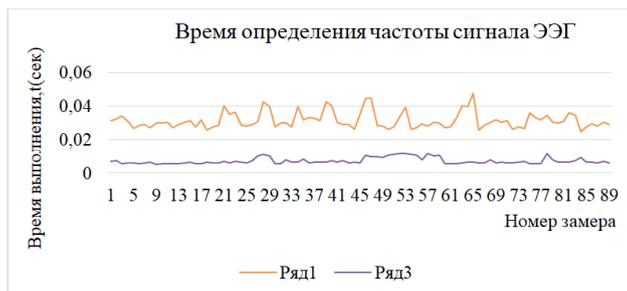


Рис. 4. Скорость работы алгоритма на основе метода многомерного индекса синхронизации в 4-х канальном режиме

Заключение. Было проведено исследование влияния длительности эпохи анализа и актуальности использования предварительной полосовой фильтрации сигнала при использовании многомерного индекса синхронизации для выделения устойчивых зрительных потенциалов. Показано что в одноканальном режиме использование предварительной фильтрации сигнала уменьшает долю верно распознанных состояний, а увеличение окна анализа напротив повышает долю верно распознанных состояний. Также рассмотрено положительное влияние увеличения эпохи анализа в многоканальном режиме. Показана возможность использования алгоритмов на основе многомерного индекса синхронизации в 4-х канальном режиме в системах реального времени.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zhang Y., Xu P., Cheng K. and Yao D. Multivariate synchronization index for frequency recognition of SSVEP-based brain-computer interface // Journal of Neuroscience Methods. – 2014. – Vol. 221. – P. 32-40.
2. Miroslav D. Lutovac. Filter Design for Signal Processing using MATLAB© and Mathematica©. – New Jersey, USA.: Prentice Hall, 2001. – ISBN 0-201-36130-2.

3. *Wilcoxon F.* Individual comparisons by ranking methods // *Biometrics*. – 1945. – No. 1. – P. 80-83.
4. *Гмурман В.Е.* Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для вузов. – 10-е изд. стереотипное. – М.: Высшая школа, 2004. – 479 с.
5. *Гнездицкий В.В.* Вызванные потенциалы в клинической практике. – Таганрог: М.: МЕД-пресс-информ, 2003. – 264 с.
6. *Vidal J.J.* Real-time detection of brain events in EEG // *Proceedings of the IEEE*. – 1977. – Vol. 65 (5). – P. 633-641. – Doi:10.1109/proc.1977.10542.
7. *Pfurtscheller G., Neuper N., Guger C., Harkam W., Ramoser H., Schlogl A., Obermaier B. and Pregenzer M.* Current trends in Graz Brain-Computer Interface (BCI) research // *IEEE Trans Rehabil Eng.* – 2000. – Vol. 8 (2). – P. 216-219.
8. *Tyagi A., Semwal S. and Shah G.* A Review of Eeg Sensors used for Data Acquisition // *Journal of Computer Applications (IJCA)*. – 2012. – P. 13-17.
9. *Ma W., Tran D., Le T., Lin H. and Zhou S.* Using EEG artifacts for BCI applications // 2014 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), Beijing, 2014. – P. 3628-3635.
10. *Han J., Ji S., Shi C., Yu S. and Shin J.* Recent progress of non-invasive optical modality to brain computer interface: A review study // *The 3rd International Winter Conference on Brain-Computer Interface*. – Sabuk, 2015. – P. 1-2.
11. *Chueshev A., Melekhova O. and Meshcheryakov R.* Cloud robotic platform on basis of fog computing approach // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. – 2018. – Vol. 11097 LNAI. – P. 34-43.
12. *Wan X. et al.* A Review on Electroencephalogram Based Brain Computer Interface for Elderly Disabled // *IEEE Access*. – 2019. – Vol. 7. – P. 36380-36387.
13. *Turovsky Y.A., Kurgalin S.D., Vahtin A.A., Borzunov S.V. and Belobrodsky V.A.* Event-related brain potential investigation using the adaptive wavelet recovery method // *Biophysics (Russian Federation)*. – 1 May 2015. – Vol. 60, issue 3, article № A018. – P. 443-448.
14. *Shepelenko M. and Meshcheryakov R.* Algorithm for automated calculation of a segmented electromechatronic module of robotic system motion // *MATEC Web of Conferences*. – 20 June 2017. – Vol. 113, article № 02005.
15. *Friman O., Volosyak I. and Graser A.* Multiple channel detection of steady-state visual evoked potentials for brain-computer interfaces // *IEEE Trans Biomed Eng.* – 2007. – Vol. 54 (7). – P. 42-50.
16. *Lin Z., Zhang C., Wu W. and Gao X.* Frequency recognition based on canonical correlation analysis for SSVEP-based BCIs // *IEEE Trans Biomed Eng.* – 2007. – Vol. 54, No. 6. – P. 1172-1176.
17. *Bartneck C., Belpaeme T., Eyssel F., Kanda T., Keijsers M., & Sabanovic S.* Human-Robot Interaction – An Introduction. – Cambridge: Cambridge University Press, 2019.
18. *Chuang C., Lee C., Yeng C. et al.* Convolutional denoising autoencoder based SSVEP signal enhancement to SSVEP-based BCIs // *Microsyst Technol.* – 2019. – <https://doi.org/10.1007/s00542-019-04654-2>.
19. *Liu P. et al.* An SSVEP-BCI in Augmented Reality // 2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), Berlin, Germany, 2019. – P. 5548-5551.
20. *Sankardoss V., Geethanjali P.* Analysis of Multichannel SSVEP for Different Stimulus Frequencies. In: Das K., Bansal J., Deep K., Nagar A., Pathipooranam P., Naidu R. (eds) *Soft Computing for Problem Solving // Advances in Intelligent Systems and Computing*. – Vol. 1057. – Springer, Singapore, 2020.

REFERENCES

1. *Zhang Y., Xu P., Cheng K. and Yao D.* Multivariate synchronization index for frequency recognition of SSVEP-based brain-computer interface, *Journal of Neuroscience Methods*, 2014, Vol. 221, pp. 32-40.
2. *Miroslav D. Lutovac.* Filter Design for Signal Processing using MATLAB© and Mathematica©. New Jersey, USA: Prentice Hall, 2001. ISBN 0-201-36130-2.
3. *Wilcoxon F.* Individual comparisons by ranking methods, *Biometrics*, 1945, No. 1, pp. 80-83.

4. *Gmurman V.E.* Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika: ucheb. posobie dlya vuzov [Probability Theory and Mathematical Statistics: Textbook for universities]. 10th ed., stereotyped. Moscow: Vysshaya shkola, 2004, 479 p.
5. *Gnezditskiy V.V.* Vyzvannye potentsialy v klinicheskoy praktike [Evoked potentials in clinical practice]. Taganrog: Moscow: MED-press-inform, 2003, 264 p.
6. *Vidal J.J.* Real-time detection of brain events in EEG, *Proceedings of the IEEE*, 1977, Vol. 65 (5), pp. 633-641. Doi:10.1109/proc.1977.10542.
7. *Pfurtscheller G., Neuper N., Guger C., Harkam W., Ramoser H., Schlogl A., Obermaier B. and Pregenzer M.* Current trends in Graz Brain-Computer Interface (BCI) research, *IEEE Trans Rehabil Eng.*, 2000, Vol. 8 (2), pp. 216-219.
8. *Tyagi A., Semwal S. and Shah G.* A Review of Eeg Sensors used for Data Acquisition, *Journal of Computer Applications (IJCA)*, 2012, pp. 13-17.
9. *Ma W., Tran D., Le T., Lin H. and Zhou S.* Using EEG artifacts for BCI applications, *2014 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), Beijing, 2014*, pp. 3628-3635.
10. *Han J., Ji S., Shi C., Yu S. and Shin J.* Recent progress of non-invasive optical modality to brain computer interface: A review study, *The 3rd International Winter Conference on Brain-Computer Interface*. Sabuk, 2015, pp. 1-2.
11. *Chueshev A., Melekhova O. and Meshcheryakov R.* Cloud robotic platform on basis of fog computing approach, *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2018, Vol. 11097 LNAI, pp. 34-43.
12. *Wan X. et al.* A Review on Electroencephalogram Based Brain Computer Interface for Elderly Disabled, *IEEE Access*, 2019, Vol. 7, pp. 36380-36387.
13. *Turovsky Y.A., Kurgalin S.D., Vahtin A.A., Borzunov S.V. and Belobrodsky V.A.* Event-related brain potential investigation using the adaptive wavelet recovery method, *Biophysics (Russian Federation)*, 1 May 2015, Vol. 60, issue 3, article № A018, pp. 443-448.
14. *Shepelenko M. and Meshcheryakov R.* Algorithm for automated calculation of a segmented electromechatronic module of robotic system motion, *MATEC Web of Conferences*, 20 June 2017, Vol. 113, article № 02005.
15. *Friman O., Volosyak I. and Graser A.* Multiple channel detection of steady-state visual evoked potentials for brain-computer interfaces, *IEEE Trans Biomed Eng.*, 2007, Vol. 54 (7), pp. 42-50.
16. *Lin Z., Zhang C., Wu W. and Gao X.* Frequency recognition based on canonical correlation analysis for SSVEP-based BCIs, *IEEE Trans Biomed Eng.*, 2007, Vol. 54, No. 6, pp. 1172-1176.
17. *Bartneck C., Belpaeme T., Eyssel F., Kanda T., Keijsers M., & Sabanovic S.* Human-Robot Interaction – An Introduction. Cambridge: Cambridge University Press, 2019.
18. *Chuang C., Lee C., Yeng C. et al.* Convolutional denoising autoencoder based SSVEP signal enhancement to SSVEP-based BCIs, *Microsyst Technol*, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00542-019-04654-2>.
19. *Liu P. et al.* An SSVEP-BCI in Augmented Reality, *2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), Berlin, Germany, 2019*, pp. 5548-5551.
20. *Sankardoss V., Geethanjali P.* Analysis of Multichannel SSVEP for Different Stimulus Frequencies. In: Das K., Bansal J., Deep K., Nagar A., Pathipooranam P., Naidu R. (eds) *Soft Computing for Problem Solving, Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol. 1057. Springer, Singapore, 2020.

Статью рекомендовала к опубликованию д.т.н. доцент О.М. Гергет.

Туровский Ярослав Александрович – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет»; e-mail: yaroslav_turovsk@mail.ru; 394051, г. Воронеж, ул. Янониса 9-22; к.т.н.; доцент.

Харченко Сергей Сергеевич – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»; e-mail: ss.kharchenko@gmail.com; г. Томск, просп. Ленина, 40; тел.: 89832336644; к.т.н.; младший научный сотрудник ЛМБИ ТУСУР.

Мещеряков Роман Валерьевич – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук; e-mail: mrv@ieee.org; 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 65; д.т.н.; профессор РАН; г.н.с.

Исхакова Анастасия Олеговна – e-mail: iao@ipu.ru; к.т.н.; с.н.с.

Исхаков Андрей Юнусович – e-mail: iay@ipu.ru; к.т.н.; с.н.с.

Turovsky Yaroslav Aleksandrovich – Federal State-Funded Institution of Higher Education “Voronezh State University”; e-mail: yaroslav_turovsk@mail.ru; 9-22, Janonis street, Voronezh, 394051, Russia; cand. of eng. sc.; associate professor.

Kharchenko Sergey Sergeevich – Federal State-Funded Institution of Higher Education “Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics”; e-mail: ss.kharchenko@gmail.com; 40, Lenin ave., Tomsk, Russia; phone: +79832336644; cand. of eng. sc.; junior researcher.

Meshcheryakov Roman Valerevich – V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences; e-mail: mrv@ieee.org; 65, Profsoyuznaya street, Moscow, 117997, Russia; dr. of eng. sc.; professor of RAS; chief researcher.

Iskhakova Anastasia Olegovna – e-mail: iao@ipu.ru; cand. of eng. sc.; senior researcher.

Iskhakov Andrey Yunusovich – e-mail: iay@ipu.ru; cand. of eng. sc.; senior researcher.

Раздел II. Системы управления и моделирования

УДК 681.518

DOI 10.18522/2311-3103-2020-1-79-90

А.В. Зуев, А.Н. Жирабок

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ДВИЖИТЕЛЕЙ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ*

Целью исследования является повышение эффективности эксплуатации подводных аппаратов (ПА) за счет использования систем функционального диагностирования их двигателей, обеспечивающих обнаружение, локализацию и идентификацию возникающих незначительных дефектов. Для решения этой задачи в статье предложен новый метод, содержащий два основных этапа. На первом этапе осуществляется построение банка диагностических наблюдателей для обнаружения и локализации возникающих дефектов. При этом каждый наблюдатель строится по специальной процедуре таким образом, чтобы быть чувствительным к различному набору возможных дефектов. На втором этапе синтезируются дополнительные наблюдатели, работающие в скользящем режиме, для точной оценки величин дефектов. При этом, в отличие от существующих решений, предлагается использовать редуцированную (имеющую меньшую размерность) модель исходной системы при построении указанных наблюдателей. Это дает возможность уменьшить сложность получаемых наблюдателей по сравнению с известными работами, где строятся наблюдатели полного порядка. Результаты проведенных исследований показали работоспособность и высокое качество всех синтезированных наблюдателей. Во всех рассмотренных случаях удалось своевременно обнаружить факт появления типовых дефектов, а также обеспечить идентификацию их величин. На основе рассмотренного метода построения систем диагностирования двигателей могут быть созданы высоконадежные системы управления ПА.

Двигатель ПА; дефект; переменные параметры; диагностирование; идентификация; скользящий наблюдатель.

A.V. Zuev, A.N. Zhirabok

DEVELOPMENT OF A FUNCTIONAL DIAGNOSTIC SYSTEM FOR THRUSTERS OF UNDERWATER VEHICLES

The aim of the study is to increase the efficiency of operation of underwater vehicles (UVs) by using systems of functional diagnosis of their thrusters, by providing detection, localization and identification of minor faults. To solve this problem, the article proposes a new method containing two main stages. At the first stage, a bank of diagnostic observers is built to detect and localize emerging faults. At the same time, each observer is constructed according to a special procedure in such a way to be sensitive to different set of possible faults. At the second stage, additional observers working in the sliding mode are synthesized to accurately estimate the fault values. At the same time, in contrast to existing solutions, it is proposed to use a reduced (having a smaller dimension) model of the original system when constructing these sliding mode observers. This makes it possible to reduce the complexity of the obtained observers in comparison with the known meth-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-79-00143).

ods, where full-order observers are built. The results of the research showed the efficiency and high quality of all synthesized observers. In all the considered cases, it was possible to detect the occurrence of typical faults, as well as to ensure the identification of their values. Highly reliable UV control systems can be created on the basis of the considered method.

UVs thruster; fault; variable parameters; diagnosis; identification; sliding mode observer.

Введение. Одной из важнейших задач, возникающих при выполнении подводными аппаратами (ПА) различных миссий, является обеспечение их сохранности и неизменной работоспособности. К числу компонентов ПА, от которых в существенной степени зависит их способность выполнять поставленные задачи, относятся их движители, обеспечивающие отработку предписанных траекторий движения. Появление любых дефектов, вызывающих отказ или изменение параметров движителей, приводит к существенному снижению показателей качества управления ПА, различным аварийным ситуациям или даже потере дорогостоящих аппаратов.

Одним из перспективных путей повышения эффективности эксплуатации ПА является использование методов функционального диагностирования [1, 2] для обнаружения и локализации возникающих дефектов, а также методов идентификации [3], обеспечивающих точную оценку величин ошибок в сигналах, получаемых от датчиков, и оценку отклонений параметров движителей от их номинальных значений, обусловленных возникновением указанных дефектов. В дальнейшем полученные оценки могут быть использованы для устранения последствий возникающих дефектов [4, 5] (аккомодации к ним).

В настоящее время для оценки технического состояния различных элементов ПА оснащаются контрольно-аварийными системами, в задачи которых входит выявление критических и аварийных ситуаций [6, 7]. Однако, как правило, существующие системы обеспечивают только общий контроль работоспособности и не позволяют осуществлять обнаружение дефектов, а также проводить оценку ошибок в показаниях датчиков и отклонение параметров движителей от номинальных значений.

В настоящее время существует несколько подходов к построению специальных систем диагностирования движителей ПА. В частности, в работах [8–11] представлены методы, основанные на построении наблюдателей с использованием моделей динамики ПА. Однако поскольку ПА описываются очень сложными многосвязными нелинейными дифференциальными уравнениями с переменными и неопределенными параметрами, то получаемые наблюдатели являются громоздкими и не позволяют обеспечить качественное обнаружение и идентификацию дефектов при высокоскоростном движении аппаратов. Кроме того, многие из этих методов требуют использования специальных тестовых режимов движения ПА [11].

Можно выделить методы диагностирования, основанные на использовании нейронных сетей [12, 13]. Недостатком этих методов является необходимость сложной процедуры обучения при использовании специальных тестовых движений ПА.

В работе [14] рассмотрен подход к построению систем диагностирования и аккомодации к дефектам в движителях ПА, предполагающий отключение неисправного движителя с последующим распределением его тяги между оставшимися движителями. Недостатком такого подхода является необходимость наличия избыточного количества движителей у ПА.

В настоящее время, одним из перспективных подходов к обнаружению и идентификации дефектов является использование диагностических наблюдателей, работающих в скользящем режиме [15]; для простоты будем далее называть такие наблю-

датели скользящими. Сейчас скользящие наблюдатели (СН) используются для решения задач идентификации дефектов в линейных [16] и нелинейных [17] системах, для обеспечения отказоустойчивого управления [18]. Однако во всех этих работах на исходную систему накладывается ряд существенных ограничений, а также предполагается построение наблюдателей полного порядка, что усложняет процедуру точной идентификации дефектов в двигателях ПА. Кроме того, существующие СН, как правило, могут быть построены для обнаружения только одиночных дефектов.

Проведенный анализ показал, что ввиду высокой сложности реализации получаемых наблюдателей или низкой точности идентификации дефектов большинство из указанных методов и подходов не может быть эффективно использовано при синтезе системы функционального диагностирования двигателей ПА.

Описание объекта диагностирования и постановка задачи. Рассмотрим модель двигателя ПА, построенного на основе электропривода постоянного тока, имеющего датчики угловой скорости и тока. Предполагается, что при автономном функционировании ПА в их двигателях возможно возникновение следующих типовых дефектов: 1) дефект в датчике угловой скорости, приводящий к появлению постоянной или переменной ошибки $\tilde{\omega}(t)$ в его показаниях; 2) перегрев двигателя или замыкание нескольких витков обмотки цепи якоря, что приводит к изменению номинального значения электрического сопротивления R на величину $\tilde{R}(t)$; 3) появление дополнительного внешнего моментного воздействия $\tilde{M}(t)$ на валу двигателя, обусловленного, например, намоткой травы на винт.

Наличие указанных дефектов существенно снижает качественные показатели работы двигателей и точность движения ПА по предписанным траекториям. При наличии этих дефектов разомкнутую цепь каждого электродвигателя в матричной форме можно описать дифференциальным уравнением вида:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + W(t) + Dd(t), \\ y(t) &= Cx(t) + D_s d_s(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где

$$A = \begin{bmatrix} -k_b/J & k_m/J \\ -k_w/L & -R/L \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ k_y/L \end{bmatrix}; \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad W(t) = \begin{bmatrix} -M(t)/J \\ 0 \end{bmatrix}; \quad D = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$D_s = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad x(t) = \begin{bmatrix} \omega(t) \\ I(t) \end{bmatrix}; \quad y(t) = \begin{bmatrix} \omega(t) \\ I(t) \end{bmatrix}; \quad u(t) = U(t); \quad d(t) = \begin{bmatrix} d_1(t) \\ d_2(t) \end{bmatrix};$$

$$d_1(t) = -\tilde{M}(t)/J; \quad d_2(t) = -\tilde{R}(t)I(t)/L; \quad d_s(t) = \tilde{\omega}(t);$$

k_b – коэффициент вязкого трения; J – момент инерции вращающихся частей двигателя с учетом присоединенного момента инерции жидкости; $I(t)$, L – ток и индуктивность цепи якоря электродвигателя, соответственно; k_w – коэффициент противо-э.д.с.; k_y – коэффициент усиления; k_m – коэффициент крутящего момента; $\omega(t)$ – скорость вращения ротора; $M(t) = (k_1 + k_2\lambda + k_3\lambda^2 + k_4\lambda^3)\rho|\omega(t)|\omega(t)D^5$ – момент нагрузки, обусловлен-

ный воздействием вязкой среды на винт; ρ – плотность воды; D – диаметр винта; $\lambda = \eta(t) / \omega(t)D$; $\eta(t)$ – скорость движения ПА; k_1, k_2, k_3, k_4 – известные постоянные коэффициенты; $U(t)$ – напряжение на входе усилителя мощности.

При функционировании ПА (особенно в автономных режимах) каждый дефект в любом из движителей независимо от причины его появления должен быть своевременно обнаружен, а его влияние на качественную работу движителя устранено.

Таким образом, в данной работе ставится и решается задача создания метода синтеза систем функционального диагностирования для движителей ПА, обеспечивающих своевременное обнаружение и локализацию возникающих дефектов (т.е. определение факта и времени появления в системе (1) конкретных функций $d_1(t)$, $d_2(t)$ и $d_s(t)$), а также идентификацию величины ошибки $\tilde{\omega}(t)$ в сигнале, получаемом от датчика угловой скорости движителя, и величин отклонений параметров движителей от их номинальных значений $\tilde{R}(t)$ и $\tilde{M}(t)$. Причем программная реализация создаваемой системы должна обладать минимальной вычислительной сложностью.

Для решения поставленной задачи в работе предложен новый метод, включающий два основных этапа.

1. Построение банка диагностических наблюдателей (ДН) для обнаружения и локализации возникающих дефектов. При этом каждый наблюдатель здесь строится по специальной процедуре таким образом, чтобы быть чувствительным к различному набору функций $d_1(t)$, $d_2(t)$ и $d_s(t)$.

2. Построение дополнительных СН для точной оценки величины ошибки в сигнале, получаемом от датчика угловой скорости, и величин отклонений параметров движителей от их номинальных значений, обусловленных появлением дефектов. При этом, в отличие от существующих решений, предлагается использовать редуцированную (имеющую меньшую размерность) модель исходной системы (1) при построении указанных наблюдателей. Это дает возможность уменьшить сложность СН по сравнению с известными работами [16, 18], где строятся наблюдатели полного порядка. Далее последовательно будут рассмотрены указанные этапы синтеза.

Построение ДН для обнаружения и локализации дефектов. Для обнаружения и локализации возникающих дефектов строится банк ДН, имеющих следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{x}_*(t) &= A_*x_*(t) + B_*u(t) + W_*(t) + J_*y(t) + K_*e_y(t), \\ y_*(t) &= C_*x_*(t), \end{aligned} \quad (2)$$

где x_* – вектор состояния ДН; $e_y(t) = R_*y(t) - y_*(t)$ – ошибка по выходу (при отсутствии дефектов $e_y(t) = 0$, а при их появлении $e_y(t) \neq 0$); A_* , B_* , C_* , W_* , K_* , R_* и J_* – вектора и матрицы, подлежащие определению; y_* – вектор выхода ДН.

Предполагается [2], что при отсутствии дефектов выполняются равенства $x_*(t) = \Phi x(t)$ и $y_*(t) = R_*y(t)$ для некоторых матриц Φ и R_* , удовлетворяющих условиям

$$\Phi A = A_*\Phi + J_*C, \quad R_*C_* = C\Phi, \quad B_* = \Phi B, \quad W_*(t) = \Phi W(t). \quad (3)$$

Далее рассмотрим процедуру построения ДН (2), чувствительных различного набору функций $d_1(t)$, $d_2(t)$ и $d_s(t)$. Отметим, что чувствительность к функциям $d_1(t)$ и $d_2(t)$ задается условием $\Phi D_j \neq 0$ ($j = \overline{1,2}$), чувствительность к ошибкам в показаниях датчика скорости – условием $J_* D_s \neq 0$ или $R_* D_s \neq 0$.

Для решения задачи матрицы A_* и C_* размеров $k \times k$ и $1 \times k$ (где k – размерность ДН) соответственно ищутся в канонической форме:

$$A_* = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}, \quad C_* = [1 \quad 0 \quad \dots \quad 0].$$

В этом случае, как показано в [2], уравнения (3) могут быть приведены к одному уравнению

$$R_* C A^k = J_{*1} C A^{k-1} + J_{*2} C A^{k-2} + \dots + J_{*k} C, \quad (4)$$

где J_{*i} – i -я строка матрицы J_* .

Для дальнейшего построения ДН необходимо определить матрицы B_* , W_* , J_* , Φ и вектор R_* по следующему алгоритму.

1. Принять $k = 1$.

2. Решить уравнение (4). Отметим, что фактически это уравнение является системой линейных алгебраических уравнений, при этом количество переменных может быть больше количества уравнений. В таком случае некоторые элементы вектора R_* и матрицы J_* будут являться свободными переменными и могут быть подобраны исходя из необходимости обеспечения чувствительности либо нечувствительности ДН к определённым функциям $d_1(t)$, $d_2(t)$ и $d_s(t)$.

Если решения уравнения (4) не существует, положить $k := k + 1$ и вернуться к п.1.

3. Определить строки матрицы Φ по соотношениям

$$\Phi_1 = R_* C, \quad \Phi_{i+1} = \Phi_i A - J_{*i} C, \quad i = 1, 2, \dots, k.$$

4. Определить матрицы B_* и W_* по соотношениям:

$$B_* = \Phi B, \quad W_*(t) = \Phi W(t).$$

5. Выбрать матрицу K_* так, чтобы $A_{**} = A_* - K_* C_*$ стала устойчивой матрицей. Поскольку матрицы A_* и C_* ищутся в каноническом виде, матрица K_* всегда существует.

В результате использования предложенной процедуры для модели ПА (1) были синтезированы следующие ДН, описанные ниже матрицами:

1) ДН₁ первого порядка, чувствительный к $d_2(t)$ и $d_s(t)$ и инвариантный к $d_1(t)$:

$$\begin{aligned} A_* = 0, \quad C_* = 1, \quad R_* = \Phi = [0 \quad 1], \quad J_* = [-k_w/L \quad -R/L], \\ B_* = k_y/L, \quad W_*(t) = 0, \quad K_* = 0.1; \end{aligned} \quad (5)$$

2) ДН₂ первого порядка, чувствительный к $d_1(t)$ и $d_s(t)$ и инвариантный к $d_2(t)$:

$$\begin{aligned} A_* = 0, \quad C_* = 1, \quad R_* = \Phi = [1 \quad 0], \quad B_* = 0, \\ J_* = [-k_b/J \quad k_m/J], \quad W_*(t) = -M(t)/J, \quad K_* = 0.1; \end{aligned} \quad (6)$$

3) ДН₃ второго порядка, чувствительный к $d_1(t)$ и $d_2(t)$ и инвариантный к $d_s(t)$:

$$\begin{aligned} A_* = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad C_* = [1 \quad 0], \quad R_* = [0 \quad 1], \quad J_* = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{k_b}{J} - \frac{R}{L} \\ 0 & -\frac{k_m k_w}{JL} - \frac{k_b R}{JL} \end{bmatrix}, \quad K_* = \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \end{bmatrix}, \\ K_* = \begin{bmatrix} 200 \\ 100 \end{bmatrix}, \quad B_* = \begin{bmatrix} k_y/L \\ k_b k_y/JL \end{bmatrix}, \quad \Phi = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k_w/L & k_b/J \end{bmatrix}, \\ W_*(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ M(t)k_w/LJ \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (7)$$

Построенные наблюдатели ДН₁, ДН₂ и ДН₃ позволяют осуществлять определение факта и времени появления неизвестных ненулевых функций $d_1(t)$, $d_2(t)$ и $d_s(t)$ в системе (1). Решение о локализации конкретного дефекта принимается на основе матрицы синдромов S , значениями которой являются символы 0 и 1. Если ошибка по выходу конкретного ДН чувствительна к определенному дефекту, то на пересечении строки, соответствующей этой невязке матрицы S и ее столбца, соответствующего выявленному дефекту, ставится 1. В противном случае – 0 [2]:

$$S = \begin{matrix} & \begin{matrix} d_1(t) & d_2(t) & d_s(t) \end{matrix} \\ \begin{matrix} e_{y1}(t) \\ e_{y2}(t) \\ e_{y3}(t) \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}.$$

Построение дополнительных СН. Решение задачи точной оценки величины ошибки в сигнале, получаемом от датчика угловой скорости движителя, и отклонений параметров движителей от их номинальных значений, обусловленных появлением дефектов, предлагается осуществлять с помощью дополнительных СН. При этом указанные наблюдатели должны строиться на основе редуцированных моделей [19–21] исходной системы (1), что позволит снизить сложность реализации СН по сравнению с известными работами [16, 18].

Анализ матрицы синдромов S показывает, что величины неизвестных функций $d_1(t)$ и $d_2(t)$ могут быть определены с использованием ДН₂ и ДН₁, соответственно. Таким образом, целесообразно осуществлять построение редуцированных моделей исходной системы, беря за основу именно эти наблюдатели. В общем виде полученные модели первого порядка будут иметь вид [20]

$$\begin{aligned}\dot{x}_*(t) &= B_*u(t) + J_*y(t) + W_*(t) + \Phi Dd(t), \\ y_*(t) &= x_*(t).\end{aligned}\quad (8)$$

СН для модели (8) ищется как

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}_*(t) &= B_*u(t) + J_*y(t) + W_*(t) + \Phi Dv(t) + K_*\hat{e}_y(t), \\ \hat{y}_*(t) &= \hat{x}_*(t),\end{aligned}\quad (9)$$

где

$$v(t) = \begin{cases} g \frac{\hat{e}_y(t)}{\|\hat{e}_y(t)\|}, & \text{если } \hat{e}_y(t) \neq 0, \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

$$\hat{e}_y(t) = y_*(t) - \hat{y}_*(t).$$

В работе [20] показано, что при выборе скаляра $g > \|d(t)\|$ уравнение для ошибки оценивания асимптотически устойчиво, т.е. ошибка оценивания $\hat{e}(t) = x_*(t) - \hat{x}_*(t) \rightarrow 0$ за конечное время. При этом величина $d(t)$ оценивается с высокой степенью точности с помощью следующего выражения:

$$d(t) = v_3(t) = g \frac{\hat{e}_y(t)}{\|\hat{e}_y(t)\| + \delta},$$

где δ – малое положительное число [16].

Таким образом, с учетом (5) и (6) были получены следующие СН:

1) СН₁ для идентификации величины $\tilde{M}(t)$:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}_*(t) &= -\frac{k_B}{J} y_1(t) + \frac{k_M}{J} y_2(t) - \frac{M(t)}{J} + 0.1\hat{e}_y(t) + v_3(t), \\ \hat{y}_*(t) &= \hat{x}_*(t), \quad \hat{e}_y(t) = y_1(t) - \hat{y}_*(t), \\ g &= 100, \quad \delta = 0.01, \quad \tilde{M}(t) = -v_3(t)J;\end{aligned}\quad (10)$$

2) СН₂ для идентификации величины $\tilde{R}(t)$:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}_*(t) &= -\frac{k_w}{L} y_1(t) - \frac{R}{L} y_2(t) + \frac{k_y}{L} u(t) + 0.1\hat{e}_y(t) + v_3(t), \\ \hat{y}_*(t) &= \hat{x}_*(t), \quad \hat{e}_y(t) = y_2(t) - \hat{y}_*(t), \\ g &= 5000, \quad \delta = 1, \quad \tilde{R}(t) = -\frac{v_3(t)L}{I(t)}.\end{aligned}\quad (11)$$

Идентификация величины функции $d_s(t)$, а следовательно, и оценка ошибки в показаниях датчика скорости движителя ПА может быть проведена с использованием следующей редуцированной модели [21], построенной на основе ДН₁:

$$\begin{aligned}\dot{x}_*(t) &= B_*u(t) + J_*y(t) + W_*(t) - J_*D_s d_s(t), \\ y_*(t) &= x_*(t).\end{aligned}\quad (12)$$

По аналогии СН₃ для модели (12), обеспечивающий оценку величины $\tilde{\omega}(t)$ имеет вид:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}_*(t) &= -\frac{k_w}{L} y_1(t) - \frac{R}{L} y_2(t) + \frac{k_y}{L} u(t) + 0.1 \hat{e}_y(t) + \frac{k_w}{L} v_3(t), \\ \hat{y}_*(t) &= \hat{x}_*(t), \quad \hat{e}_y(t) = y_2(t) - \hat{y}_*(t), \\ g &= 10, \quad \delta = 1, \quad \tilde{\omega}(t) = v_3(t).\end{aligned}\quad (13)$$

Таким образом, за счет использования СН₁, СН₂ и СН₃ удается обеспечить оценку величин ошибок в сигналах, получаемых от датчиков, и отклонений параметров движителей от их номинальных значений, обусловленных появлением дефектов. Важно отметить, что использование редуцированных моделей (8) и (12) позволило обеспечить построение простых наблюдателей первого порядка.

Структурная схема синтезированной системы функционального диагностирования движителей ПА (см. (5)–(7), (10), (11) и (13)) представлена на рис. 1.

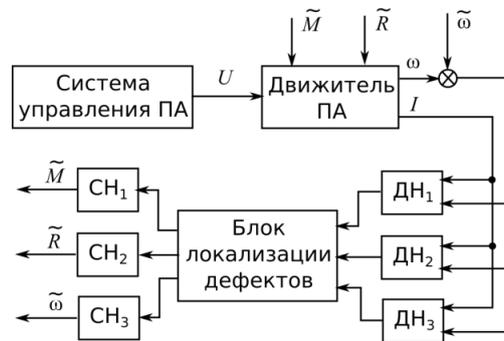


Рис. 1. Структурная схема системы функционального диагностирования движителей ПА

Результаты численных исследований. Для проверки работоспособности и эффективности предлагаемого метода синтеза было проведено моделирование работы системы функционального диагностирования движителя ПА со следующими параметрами: $k_b = 67.5610 \cdot 10^{-5}$ Нмс/рад; $J = 0,025$ кгм²; $R = 0.65$ Ом; $L = 0.00026$ Гн; $k_w = 0.135$ Вс/рад; $k_y = 27.71$; $k_m = 0.135$ Нм/А; $D = 0.178$ м; $k_1 = 0.015$; $k_2 = 0.02$; $k_3 = 0.0002$; $k_4 = -0.02$.

На движитель подавалось управление $U(t) = 1,5 + \sin(t)$, а одиночные дефекты имитировались введением внешнего момента $\tilde{M}(t) = 0.2 \sin((t-3)\pi/4)$ Нм в период времени 3÷7 с, плавным изменением величины активного сопротивления на 0.1 Ом в период времени 5÷10 с, а также введением постоянной ошибки $\tilde{\omega}(t) = 0.2$ рад/с в показания датчика скорости в период времени 4÷10 с.

На рис. 2 представлены графики функции $\tilde{M}(t)$ (кривая 1) и ее оценки (кривая 2) с помощью предложенных наблюдателей.

На рис. 3 и 4 представленные аналогичные графики для функций $\tilde{R}(t)$ и $\tilde{\omega}(t)$. Из представленных рисунков можно видеть, что построенные наблюдатели позволяют своевременно определить моменты времени появления ошибок $\tilde{M}(t)$, $\tilde{R}(t)$ и $\tilde{\omega}(t)$, а также обеспечить достаточно точную оценку величин этих ошибок. Ошибка идентификации во всех трех случаях не превышала 0.1 %

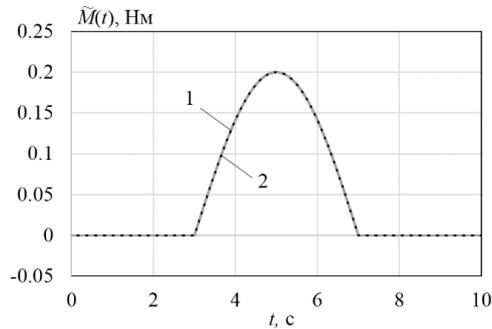


Рис. 2. Функция $\tilde{M}(t)$ (кривая 1) и результат ее идентификации (кривая 2)

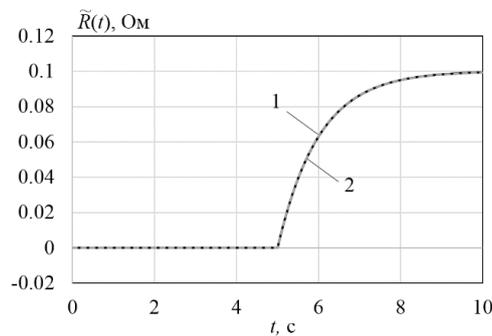


Рис. 3. Функция $\tilde{R}(t)$ (кривая 1) и результат ее идентификации (кривая 2)

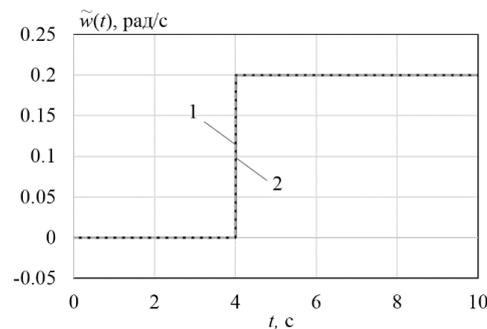


Рис. 4. Функция $\tilde{\omega}(t)$ (кривая 1) и результат ее идентификации (кривая 2)

Таким образом, результаты проведенных исследований показали безусловную работоспособность и высокое качество синтезированных наблюдателей. Во всех рассмотренных случаях удалось своевременно обнаружить факт появления дефекта, а также обеспечить определение его величины. На основе рассмотренного подхода к построению систем диагностирования двигателей ПА могут быть созданы высоконадежные системы управления ПА.

Заключение. Резюмируя изложенное, можно сделать следующие выводы. Синтезированные с помощью предложенного в работе двухэтапного метода системы функционального диагностирования двигателей ПА достаточно просты и обладают невысокой вычислительной сложностью, что позволяет обеспечить их реализацию на типовых бортовых вычислителях ПА.

Построенные системы обеспечивают не только своевременное обнаружение и локализацию возникающих типовых дефектов с помощью банка ДН, но также точную оценку величин ошибок в сигналах, получаемых от датчиков, и отклонений параметров движителей от их номинальных значений, обусловленных появлением этих дефектов. Результаты моделирования подтверждают работоспособность и высокое качество синтезированных наблюдателей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Мироновский Л.А.* Функциональное диагностирование динамических систем. – М.-СПб.: МГУ-ГРИФ, 1998.
2. *Шумский А.Е., Жирабок А.Н.* Методы и алгоритмы диагностирования и отказоустойчивого управления динамическими системами. – Владивосток: ДВГТУ, 2009.
3. *Simani S., Fantuzzi C., Patton R.* Model-based Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Identification. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2002.
4. *Blanke M., Kinnaert M., Lunze J., Staroswiecki M.* Diagnosis and Fault-Tolerant Control. – Berlin: Springer-Verlag, 2006.
5. *Filaretov V.F., Zhirabok A.N., Zuev A., Protchenko A.* The development of the faults accommodation system for actuators of multilink manipulators // Proc. of the 23rd DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation. – 2012. – P. 575-578.
6. *Chirikjian G.S.* Robotic Self-replication, Self-diagnosis, and Self-repair: Probabilistic Considerations // Distributed Autonomous Robotic Systems. – 2009. – No. 8. – P. 273-281.
7. *Инзарцев А.В., Грибова В.В., Клеуцев А.С.* Интеллектуальная система для формирования адекватного поведения автономного подводного робота в аварийных ситуациях // Подводные исследования и робототехника. – 2015. – № 2 (20). – С. 4-11.
8. *Zhang M., Wu J., Wang Y.* Simultaneous Faults Detection and location of Thrusters and Sensors for Autonomous Underwater Vehicle // Proc. of the Fourth International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. – 2011. – P. 504-507.
9. *Zhu D., Sun B.* Information fusion fault diagnosis method for unmanned underwater vehicle thrusters // IET Electrical Systems in Transportation. – 2013. – Vol. 3, No. 4. – P. 102-111.
10. *Wang J.* Fault Diagnosis of Underwater Vehicle with FNN // Proc. of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation. – 2012. – P. 2931-2934.
11. *Zhao B., Skjetne R., Blanke M., Dukan F.* Particle Filter for Fault Diagnosis and Robust Navigation of Underwater Robot // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2014. – Vol. 22, No. 6. – P. 2399-2407.
12. *Wang J., Wu G., Wan L., Sun Y., Jiang D.* Recurrent Neural Network Applied to Fault Diagnosis of Underwater Robots // Proc. of the IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems. – 2009. – P. 593-598.
13. *Wang J.-G.* Fault Diagnosis of Underwater Vehicle with Neural Network // Proc. of the 24th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). – 2012. – P. 1613-1617.
14. *Sarkar N., Podder T.K., Antonelli G.* Fault-Accommodating Thruster Force Allocation of an AUV Considering Thruster Redundancy and Saturation // IEEE Transactions on Robotics and Automation. – 2002. – Vol. 18, No. 2. – P. 223-233.
15. *Уткин В.И.* Скользящие режимы и их применение в системах с переменной структурой. – М.: Наука, 1974.
16. *Edwards C., Spurgeon S., Patton R.* Sliding Mode Observers for Fault Detection and Isolation // Automatica. – 2000. – Vol. 36. – P. 541-553.
17. *He J., Zhang C.* Fault Reconstruction Based on Sliding Mode Observer for Nonlinear Systems // Mathematical Problems in Engineering. – 2012. – Vol. 2012. – P. 1-22.
18. *Alwi H., Edwards C.* Fault Tolerant Control Using Sliding Modes with On-line Control Allocation // Automatica. – 2008. – Vol. 44. – P. 1859-1866.
19. *Жирабок А.Н., Зувев А.В., Шумский А.Е.* Методы диагностирования линейных систем на основе скользящих наблюдателей // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2019. – № 6. – С. 73-89.

20. Жирабок А.Н., Зуев А.В., Шумский А.Е. Диагностирование линейных динамических систем: подход на основе скользящих наблюдателей // Автоматика и телемеханика. – 2020. – № 2. – С. 18-35.
21. Жирабок А.Н., Зуев А.В., Шумский А.Е. Идентификация дефектов в датчиках технических систем с использованием скользящих наблюдателей // Измерительная техника. – 2019. – № 10. – С. 21-28.

REFERENCES

1. Mironovskiy L.A. Funktsional'noe diagnostirovanie dinamiceskikh system [Functional diagnosis of dynamic systems]. Moscow – Saint Petersburg: MGU-GRIF, 1998.
2. Shumskiy A.E., Zhirabok A.N. Metody i algoritmy diagnostirovaniya i otkazoustoychivogo upravleniya dinamiceskimi sistemami [Methods and algorithms of diagnosis and fault tolerant control of dynamic systems]. Vladivostok: DVG TU, 2009.
3. Simani S., Fantuzzi C., Patton R. Model-based Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Identification. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2002.
4. Blanke M., Kinnaert M., Lunze J., Staroswiecki M. Diagnosis and Fault-Tolerant Control. – Berlin: Springer-Verlag, 2006.
5. Filaretov V.F., Zhirabok A.N., Zuev A., Protchenko A. The development of the faults accommodation system for actuators of multilink manipulators, *Proc. of the 23rd DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation*, 2012, pp. 575-578.
6. Chirikjian G.S. Robotic Self-replication, Self-diagnosis, and Self-repair: Probabilistic Considerations, *Distributed Autonomous Robotic Systems*, 2009, No. 8, pp. 273-281.
7. Inzartsev A.V., Gribova V.V., Kleshchev A.S. Intellektual'naya sistema dlya formirovaniya adekvatnogo povedeniya avtonomnogo podvodnogo robota v avariynnykh situatsiyakh [Intelligent system for forming the adequate behavior of autonomous underwater robot in emergency situations], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater research and robotics], 2015, No. 2 (20), pp. 4-11.
8. Zhang M., Wu J., Wang Y. Simultaneous Faults Detection and location of Thrusters and Sensors for Autonomous Underwater Vehicle, *Proc. of the Fourth International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, 2011, pp. 504-507.
9. Zhu D., Sun B. Information fusion fault diagnosis method for unmanned underwater vehicle thrusters, *IET Electrical Systems in Transportation*, 2013, Vol. 3, No. 4, pp. 102-111.
10. Wang J. Fault Diagnosis of Underwater Vehicle with FNN, *Proc. of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation*, 2012, pp. 2931-2934.
11. Zhao B., Skjetne R., Blanke M., Dukan F. Particle Filter for Fault Diagnosis and Robust Navigation of Underwater Robot, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2014, Vol. 22, No. 6, pp. 2399-2407.
12. Wang J., Wu G., Wan L., Sun Y., Jiang D. Recurrent Neural Network Applied to Fault Diagnosis of Underwater Robots, *Proc. of the IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems*, 2009, pp. 593-598.
13. Wang J.-G. Fault Diagnosis of Underwater Vehicle with Neural Network, *Proc. of the 24th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, 2012, pp. 1613-1617.
14. Sarkar N, Podder T.K., Antonelli G. Fault-Accommodating Thruster Force Allocation of an AUV Considering Thruster Redundancy and Saturation, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2002, Vol. 18, No. 2, pp. 223-233.
15. Utkin V.I. Skol'zyashchie rezhimy i ikh primeneniye v sistemakh s peremennoy strukturoy [Sliding modes and their application in systems with variable structure]. Moscow: Nauka, 1974.
16. Edwards C., Spurgeon S., Patton R. Sliding Mode Observers for Fault Detection and Isolation, *Automatica*, 2000, Vol. 36, pp. 541-553.
17. He J., Zhang C. Fault Reconstruction Based on Sliding Mode Observer for Nonlinear Systems, *Mathematical Problems in Engineering*, 2012, Vol. 2012, pp. 1-22.
18. Alwi H., Edwards C. Fault Tolerant Control Using Sliding Modes with On-line Control Allocation, *Automatica*, 2008, Vol. 44, pp. 1859-1866.
19. Zhirabok A.N., Zuev A.V., Shumskiy A.E. Metody diagnostirovaniya lineynykh sistem na osnove skol'zyashchikh nablyudateley [Methods for diagnosing linear systems based on sliding observers], *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya* [Izvestiya RAS. Theory and control systems], 2019, No. 6, pp. 73-89.

20. Zhirabok A.N., Zuev A.V., Shumskiy A.E. Diagnostirovanie lineynykh dinamicheskikh sistem: podkhod na osnove skol'zyashchikh nablyudateley [Diagnostics of linear dynamic systems: an approach based on sliding observers], *Avtomatika i telemekhanika* [Automatics and telemechanics], 2020, No. 2, pp. 18-35.
21. Zhirabok A.N., Zuev A.V., Shumskiy A.E. Identifikatsiya defektov v datchikakh tekhnicheskikh sistem s ispol'zovaniem skol'zyashchikh nablyudateley [Identification of defects in sensors of technical systems using sliding observers], *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement technology], 2019, No. 10, pp. 21-28.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Д.А. Юхимец.

Зуев Александр Валерьевич – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматки и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук; e-mail: zuev@dvo.ru; г. Владивосток, ул. Радио, 5; тел.: 89149617735; к.т.н.; доцент; с.н.с.

Жиравок Алексей Нилович – e-mail: zhirabok@mail.ru; тел.: 89242345895; д.т.н.; профессор; в.н.с.

Zuev Aleksander Valer'evich – Institute of Automation and Control Processes Far Eastern Branch of Russian Academy of Science; e-mail: zuev@dvo.ru; 5, Radio street, Vladivostok, 690041, Russia; phone: +79149617735; cand. of eng. sc.; senior researcher.

Zhirabok Alexey Nilovich – e-mail: zhirabok@mail.ru; phone: +79242345895; dr. of eng. sc.; professor; chief researcher.

УДК 007.52, 519.878, 519.1, 004.942

DOI 10.18522/2311-3103-2020-1-90-98

Д.В. Березников, А.А. Закиев, Е.А. Магид

СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОНОМНОГО ВОЗВРАЩЕНИЯ КОЛЁСНОГО РОБОТА ПРИ ПОТЕРЕ СВЯЗИ С УДАЛЕННЫМ ОПЕРАТОРОМ*

Данная работа посвящена увеличению уровня автономности мобильных роботов в случаях потери связи с оператором, осуществляющим удаленное управление роботом. Актуальность данной задачи растет, поскольку мобильные роботы находят все больше применений в различных задачах. При работе в опасной для человека среде, например, во время поисково-спасательной операции, требуется надежный способ сохранить робота в случаях потери связи. Разрыв связи с роботом, который используется в недоступной для человека среде, означает потерю робота как функциональной единицы. Причиной возникновения подобных ситуаций становится несовершенство технологий связи, свойства окружающей среды или человеческий фактор. Данная проблема может возникнуть как при проводной, так и беспроводной связи между оператором и роботом. Поэтому робот должен обладать возможностью самостоятельно принимать решения в соответствии с поставленной задачей в случае потери прямого контроля со стороны оператора. Для этого робот должен иметь возможность обнаруживать потерю связи с оператором и возвращаться в начальную точку пути без вмешательства человека. В данной статье мы представляем разработанный алгоритм автоматического обнаружения разрыва сетевого соединения робота и алгоритм автономного возврата робота. В отличие от существующих решений, разработанный алгоритм не требует дополнительного оборудования или настройки программного обеспечения на стороне оператора. Алгоритм обнаружения разрыва сетевого соединения робота использует анализ TCP/IP пакетов, что делает его универсальным для роботов, управляемых по сетям Wi-Fi. Для автономного возвращения робота используются методы одновременной

* Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований проект № 19-58-70002.

локализации и картографирования (SLAM) и алгоритмы планирования пути. В режиме автономного возвращения робот опирается на сенсорные данные, собранные во время движения под контролем телеоператора. Алгоритмы были интегрированы в систему управления реального колесного робота PMB-2 и протестированы в лабораторных условиях, что экспериментально подтвердило их эффективность и практическую применимость.

Мобильный робот; алгоритм; автономное возвращение; обнаружение разрыва соединения; PMB-2.

D.V. Bereznikov, A.A. Zakiev, E.A. Magid

WHEELED ROBOT AUTONOMOUS RETURN SYSTEM AT REMOTE OPERATOR COMMUNICATION BLACKOUT

This work is dedicated to increasing mobile robots autonomy in cases of connection loss with a remote operator. As a number of mobile applications increases, the importance of this task is growing. A reliable way is required to save a robot in cases of communication blackout while operating in a hazardous environment, for example, during a search and rescue operation. Communication blackout means the immediate loss of a robot if it is employed in a dangerous to humans environment. Communication blackouts occur because of communication technologies imperfection, sudden changes in the environment or a human factor. This problem can occur with both wired and wireless communications between an operator and a robot. Therefore, a robot must be able to operate autonomously in cases operator direct control is lost. A robot must be capable to detect a communication loss with an operator and return to its starting point of a path without human intervention. In this paper, we present developed algorithms for automatic detection of a network connection blackout and autonomous return of the robot. Unlike existing solutions, the developed algorithm does not require additional equipment or software on the operator's side. The robot's network connection blackout detection algorithm uses TCP / IP packet analysis, which makes it universal for robots controlled over Wi-Fi networks. Simultaneous localization and mapping (SLAM) methods and path planning algorithms are used for autonomous robot return. In the autonomous return mode, the robot relies on sensory data collected during movement under the operator control. The algorithms were integrated into the control system of a real wheeled robot PMB-2 and tested in laboratory conditions, which experimentally confirmed their effectiveness and practical applicability.

Mobile robot; algorithm; offline return; connection blackout detection; PMB-2.

Введение. Современные мобильные роботы призваны выполнять широкий спектр задач [1], включая такие виды деятельности как доставка грузов [2], картографирование окружающей среды и работа в опасных для человека условиях [3, 4]. Мобильные роботы в большинстве случаев управляются удаленным оператором, который напрямую контролирует движение [5, 6] и отслеживает состояние робота дистанционно, находясь в безопасности. Передача информации между оператором и роботом выполняется при помощи проводных или беспроводных технологий. Оба способа передачи информации несут в себе угрозу потери соединения между роботом и оператором. Оператор может потерять контроль над роботом вследствие физического разрыва проводного подключения или из-за ограничений беспроводной связи: ограниченной дальности покрытия, помех на пути сигнала, недостаточной мощности приемников и передатчиков, и т.д. [7]. Потеря управления может привести к полной потере робота или нанесению ему существенного ущерба [8], поэтому мобильным роботам необходимо обладать определенным уровнем автономности, во избежание нежелательных последствий.

В рамках данной исследовательской работы мы разработали и интегрировали в систему управления мобильного робота PMB-2 [9] (представлен на рис. 1, слева) алгоритм обнаружения разрыва сетевого соединения и обеспечения автономного возврата робота. Задачей было создание независимой от оператора системы возврата, не требующей каких-либо изменений в программном обеспечении на стороне оператора. Так, обнаружение разрыва основано на анализе TCP/IP пакетов, поступающих на радиоприемник робота. Существующие решения обнаружения раз-

рыва соединения не обладают данным свойством и требуют существенной модификации программного обеспечения (ПО) на стороне оператора или использования специального дополнительного оборудования. Например, алгоритм Алишева и др. [10] требует настройки ПО как на стороне робота, так и на стороне оператора. Другие решения [11, 12] используют специальное оборудование для измерения силы получаемого сигнала. Смежные исследования [13, 14] нацелены на обнаружение потери соединения между множеством роботов. Метод, представленный нами в рамках этого исследования, требует модификации ПО только на стороне робота. Разработанный подход был успешно протестирован в экспериментах на реальном роботе в лабораторной окружающей среде.

Используемое оборудование. PMB-2 (рис. 1, слева) представляет собой мобильный колесный робот от компании PAL Robotics [15], оборудованный лазерным сканнером Sick TiM 571 и инерциальным датчиками, используемыми для задач навигации и работы методов одновременной локализации и картографирования (SLAM, от англ. *Simultaneous Localization and Mapping*). Робот имеет цилиндрическую форму с диаметром 54 см и высотой 30 см. Встроенный литий-ионный аккумулятор на 20000 мАч позволяет роботу функционировать без подзарядки продолжительное время (около 10 часов в активном режиме). Робот имеет в своем распоряжении Wi-Fi интерфейс стандарта 802.11b/g/n/ac, что позволяет ему развертывать собственную беспроводную точку доступа. Производитель робота, компания PAL Robotics, также предоставляет док-станцию, благодаря которой робот способен самостоятельно выполнять зарядку бортового аккумулятора (рис. 1, справа).



Рис. 1. Робот PMB-2 во время движения (слева); робот PMB-2 подключен к док-станции и находится в процессе зарядки, вид сверху (справа)

Используемое программное обеспечение. Робот PMB-2 работает под управлением модифицированной операционной системы Ubuntu 16.04 и фреймворка ROS (англ. *Robot Operating System, робототехническая операционная система*) версии Kinetic. Программное обеспечение робота включает в себя комплект пакетов картографирования, локализации и SLAM. Требования к управляющему ПО на стороне оператора отсутствуют, требуется только подключение к роботу по протоколу TCP/IP.

Фреймворк ROS объединяет различные исполняемые файлы в одну среду, позволяя разным процессам передавать информацию друг другу. Исполняемые файлы, использующие ROS, называются нодами (англ. *nodes*), а потоки данных между ними – топики (англ. *topics*). Это означает, что ноды ROS, запущенные на роботе, видимы и открыты для взаимодействия также и для нод ROS запущенных на устройстве оператора. Аналогично, ноды ROS, запущенные на устройстве оператора, доступны для нод ROS робота. Таким образом, разные устройства под управлением ROS объединяются в единую систему. Данные инкапсулируются в топики ROS. Это позволяет унифицировано отправлять их через Wi-Fi, Ethernet, Bluetooth и Zigbee сети [16].

Алгоритм обнаружения разрыва соединения. В режиме удаленного управления (телеоперации) работа с роботом ведется в следующей последовательности шагов:

1. РМВ-2 активирует интерфейс Wi-Fi и создает точку доступа.
2. Оператор подключается к активной точке доступа РМВ-2.
3. Оператор передает команды по сетевому адресу робота и контролирует движение робота.

Робот и компьютер оператора объединены в общую сеть, и ROS обеспечивает их полную программную совместимость. Инкапсуляция сообщений в топике (поток данных) ROS унифицирует процесс передачи и приема сообщения, однако, скрывает источник данных. По этой причине, если в топике ROS нет сообщений, то невозможно программно определить: 1) были ли сообщения отправлены, но не доставлены, или 2) сообщения не были отправлены. Поэтому нами был разработан инструмент, позволяющий определять состояние соединения робота с оператором. Инструмент основан на утилите *ping* [17], идущей в стандартном комплекте с современными операционными системами.

Если на роботе присутствует разработанная ROS нода с алгоритмом определения разрыва соединения, она запускается автоматически при запуске робота. В начале своей работы нода ждет подключения оператора. Если телеоперация не используется, и робот движется автономно, то алгоритм определения разрыва связи не используется. Это снижает нагрузки на сеть в случае автономного движения. Если оператор подключился к роботу, то алгоритм определения разрыва связи начинает свою работу. Если в течение 10 секунд от оператора не поступает новых команд, нода автоматически с помощью программы *ping* и проверяет присутствие оператора в сети. В случае, если оператор находится в сети, это означает, что соединение с ним активно и робот должен ожидать команд.

В противном случае, если оператор не найден в сети, робот переходит в режим автономного возврата. В этом режиме робот движется к начальной точке своего маршрута и одновременно осуществляет поиск док-станции. Док-станция позволяет роботу автономно начать зарядку бортового аккумулятора и дожидаться переподключения оператора. Поиск док-станции производится с помощью данных лазерного сканирования: док-станция имеет специальную форму, которая формирует узнаваемую на данных лазерного сканирования структуру. После обнаружения док-станции, робот производит маневр стыковки и ждет переподключения оператора. Данный подход позволяет оператору приступить к выполнению новой задачи в режиме телеоперации сразу же после восстановления подключения.

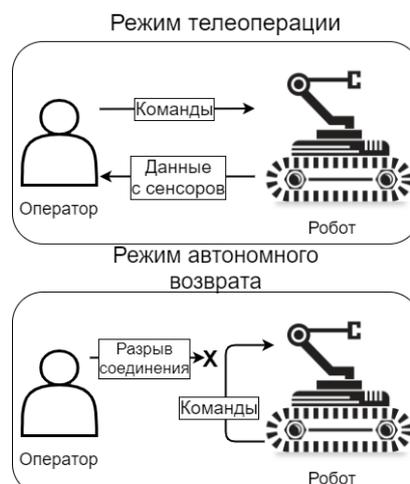


Рис. 2. Принципиальные схемы режимов телеоперации и автономного возврата

Во время автономного возврата робот постоянно проверяет доступность оператора в сети. В случае восстановления соединения с оператором, робот переходит в режим телеоперации, передавая полный контроль оператору. Автономная навигация и перемещение к безопасной точке приостанавливаются; кроме того, если робот уже подключен к док-станции, он автоматически отсоединяется от нее и ожидает дальнейших управляющих команд оператора в полностью рабочем состоянии. Таким образом, робот выполняет все шаги алгоритма восстановления работоспособности без вмешательства со стороны человека.

Режим автономного возврата. Автономное передвижение мобильного робота полностью имплементировано в рамках фреймворка ROS. Как только обнаруживается сбой соединения, запускаются ноды, отвечающие за автономное планирование пути робота к начальной точке. Нода *global_planner* [18] отвечает за построение глобального маршрута к начальной (стартовой) точке на основе карты, которая была создана роботом во время телеоперации. Нода *local_planner* отвечает за локальный маршрут робота, который строится на основе глобального маршрута и информации о динамических препятствиях, которые не были нанесены на карту при ее создании. Ноды планирования пути опираются на карту, созданную в процессе телеоперации [19]. Карта формируется на основе данных лазерного сканирования нодой ROS *slam_gmapping* [20]. В режиме автономного возврата робот локализует себя на этой карте с помощью ноды *amcl* [21], в котором используется метод адаптивной локализации Монте-Карло (англ. *AMCL*, Adaptive Monte-Carlo Localization). Построенный маршрут преобразуется в команды для сервомоторов робота и происходит автономное движение к цели, которая является стартовой точкой маршрута робота.

Постановка экспериментов. Для определения практической применимости имплементированных методов был разработан дизайн экспериментов с использованием робота PMB2. Эксперименты проводились в лабораторных условиях, по единому сценарию:

1. Робот двигается в режиме телеоперации под управлением оператора; направление движения выбирается оператором произвольно.
2. Имитируется потеря связи с оператором (выключается пульт, используемый для телеоперации).
3. Робот обнаруживает потерю связи с оператором.
4. Робот переходит в режим автономного возвращения и начинает движение к начальной (стартовой) точке маршрута.
5. Робот стыкуется с док-станцией. Эксперимент завершается.

Важно отметить, что только пункты 1 и 2 требуют участия человека. Пункты 3–5 выполняются в автономном режиме. Каждый эксперимент включал в себя измерения для оценки эффективности разработанных алгоритмов, которые представлены в табл. 1:

- ◆ Расстояние, которое робот преодолел в режиме автономного возвращения (второй столбец).
- ◆ Время между моментом потери соединения и переходом робота в режим автономного возвращения (третий столбец).
- ◆ Время, затраченное роботом на автономное возвращение в исходную позицию (четвертый столбец).

Приведенные в табл. 1 результаты показывают, что существует задержка между отправкой последней команды роботу и переходом робота в режим автономного возвращения. Длительность этих задержек не постоянна и находится в диапазоне от 12 до 16 секунд. Задержки не представляют опасности для работоспособности робота, так как в отсутствие команд оператора робот прекращает движение. Более

того, путем настраивания временных параметров в конфигурационном файле разработанного нами ПО, время задержки можно сократить или же, наоборот, увеличить в зависимости от выполняемой роботом задачи под требования пользователя.

Таблица 1

Результаты тестирования алгоритма

Номер эксперимента	Преодоленная дистанция (метры)	Время между обрывом соединения и обнаружением обрыва роботом (секунды)	Время, затраченное роботом на обратный путь (секунды)	Иллюстрация эксперимента
1	4	13	10	Рис. 3
2	4	16	12	
3	4	14	18	
4	4	13	20	
5	4	12	11	
6	24	15	50	Рис. 4
7	40	15	60	---

Данные в таблице свидетельствуют об ожидаемом увеличении времени автономного возвращения в случае увеличения расстояния до начальной точки. Однако, эта зависимость не является линейной, что связано с характером лабораторной среды. Такая среда насыщена объектами и препятствиями (пример такой среды из эксперимента №4 представлен на рис. 3), объезд которых требует замедленного движения и большого количества поворотов. При этом, на свободных участках пространства (например, в протяженном свободном коридоре; рис. 4) робот может развивать высокую скорость, что сокращает время возвращения.

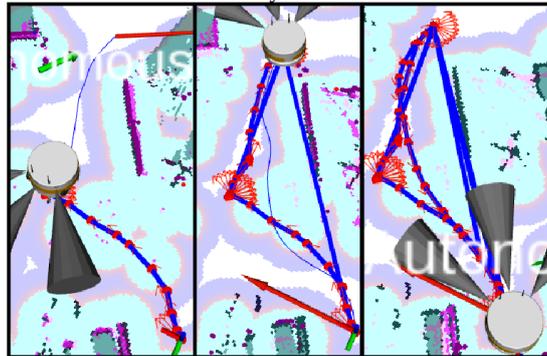


Рис. 3. Стадии экспериментов на примере эксперимента №4, показанного в симуляторе RViz: телеоперация (слева); обнаружение разрыва соединения (в центре); автономное возвращение в точку начала движения (справа). Белым цветом обозначены свободные области, темно-зеленым – препятствия. Робот показан в виде серо-оранжевого цилиндра. Темно-серые конусы показывают получаемые бортовыми сонарами данные. Синими линиями показаны предложенные глобальным планировщиком маршруты движения робота. Красными точками показаны локации, в которых робот менял ориентацию (осуществлял поворот), красными стрелками – направление движения робота

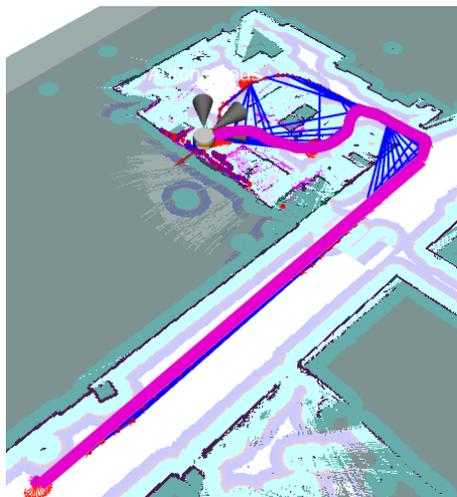


Рис. 4. Схема движения в эксперименте №6. Широкая фиолетовая линия показывает траекторию автономного возвращения робота на стартовую позицию. Белым цветом обозначены свободные области, черным – препятствия

Все эксперименты завершились успешно. Алгоритм в каждом случае обнаруживал разрыв соединения с оператором, после чего переводил робота в режим автономного возврата. В конце автономной навигации робот достигает стартовой точки, находит док-станцию и подключался к ней для зарядки бортового аккумулятора.

Заключение. В статье представлен алгоритм определения разрыва соединения и его использование в задаче автономного возврата. Данный алгоритм имеет полную совместимость с ROS, и не требует установки дополнительного аппаратного или программного обеспечения на устройство оператора, а также может быть обобщен для применения на любом TCP/IP соединении. Эффективность и практическая применимость были экспериментально подтверждены на примере мобильного колесного робота РМВ-2, что доказало возможность практического применения алгоритма.

Алгоритмы такого типа могут быть успешно развернуты на роботах, используемых в условиях нестабильной работы систем связи. Развертывание представленного в статье ПО не требует использования специфического оборудования или конкретной программной архитектуры, что облегчает его имплементацию на различных робототехнических системах. Правильная имплементация представленного алгоритма и его интеграция в системы управления роботами, не обладающими функционалом автономного движения, позволяет предотвратить неконтролируемое движение робота после обрыва связи или полную потерю работающего в режиме удаленного управления робота. В случае с роботами, способными выполнять задачи навигации автономно (например, роботы-аналоги представленного в статье мобильного робота РМВ-2), удастся добиться интеллектуального поведения робота для его успешного возвращением к оператору после обрыва связи. Такое поведение критически необходимо в случае работы робота в опасных для человека условиях: в зонах радиоактивного и химического загрязнений местности или в условиях поисково-спасательной операции. Наличие ПО для определения разрыва связи и автономного возвращения в таких случаях позволит не только не подвергать жизнь людей опасности при эвакуации робота, но и предотвратит потерю дорогостоящего аппаратного комплекса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Shabalina K. [et al.]*. Comparative Analysis of Mobile Robot Wheels Design, *Int. Conf. on Developments in eSystems Engineering, IEEE*, 2018, pp. 175-179.
2. *Shimchik I. [et al.]*. Golf cart prototype development and navigation simulation using ROS and Gazebo, *MATEC Web of Conf., EDP Sciences*, 2016, Vol. 75, pp. 09005.
3. *Magid E., Lavrenov R., Afanasyev I.* Voronoi-based trajectory optimization for UGV path planning, *Int. Conf. on Mechanical, System and Control Engineering, IEEE*, 2017, pp. 383-387.
4. *Sokolov M. [et al.]*. Modelling a crawler-type UGV for urban search and rescue in Gazebo environment, *Int. Conf. on Artificial Life and Robotics*, 2017, pp. 360-362.
5. *Farkhatdinov I., Ryu J.H. and Poduraev J.* A user study of command strategies for mobile robot teleoperation, *Intel Serv Robotics*, 2009, Vol. 2, pp. 95-104.
6. *Wang M., James N.K. Liu.* Interactive control for Internet-based mobile robot teleoperation, *Robotics and Autonomous Systems*, 2005, Vol. 52 (2-3), pp. 160-179.
7. *Magid E. [et al.]*. Artificial Intelligence Based Framework for Robotic Search and Rescue Operations Conducted Jointly by International Teams, *Int. Conf. on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings"*, 2019, pp. 15-26.
8. *Nagatani K. [et al.]*. Emergency response to the nuclear accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants using mobile rescue robots, *J. of Field Robotics*, 2013, Vol. 30 (1), pp. 44-63.
9. *Jordi P., Marchionni L., Ferro F.* Tiago: the modular robot that adapts to different research needs, *Int. workshop on robot modularity IEEE IROS*, 2016.
10. *Alishev N. [et al.]*. Network Failure Detection and Autonomous Return Algorithms for a Crawler Mobile Robot Navigation, *Int. Conf. on Developments in eSystems Engineering, IEEE*, 2018, pp. 169-174.
11. *Tardioli D. [et al.]*. Enforcing network connectivity in robot team missions, *Int. J. of Robotics Research*, 2010, Vol. 29 (4), pp. 460-480.
12. *Mong-ying A.H. [et al.]*. Towards the deployment of a mobile robot network with end-to-end performance guarantees, *Robotics and Automation, IEEE*, 2006, pp. 2085-2090.
13. *Derbakova A., Correll N., Rus D.* Decentralized self-repair to maintain connectivity and coverage in networked multi-robot systems, *Int. Conf. Robotics and Automation, IEEE*, 2011, pp. 3863-3868.
14. *Hsieh M.A. [et al.]*. Maintaining network connectivity and performance in robot teams, *J. of field robotics*, 2008, Vol. 25 (1-2), pp. 111-131.
15. PAL Robotics // <http://pal-robotics.com>. Available at: <http://pal-robotics.com> (accessed 02 March 2020).
16. *Fernandes A.* Ad hoc communication in teams of mobile robots using zigbee technology, *Computer Applications in Engineering Education*, 2015, Vol. 23.5, pp. 733-745.
17. Ping utility, Ubuntu xenial package. Available at: <https://packages.ubuntu.com/xenial>. Available at: <https://packages.ubuntu.com/xenial/iputils-ping> (accessed 02 March 2020).
18. *global_planner, ROS package* // <http://wiki.ros.org>. Available at: http://wiki.ros.org/global_planner (accessed 02 March 2020).
19. *Zakiev A. [et al.]*. Path planning for Indoor Partially Unknown Environment Exploration and Mapping, *Int. Conf. on Artificial Life and Robotics*, 2018, p. 399-402.
20. *Quigley M. [et al.]*. Sub-meter indoor localization in unmodified environments with inexpensive sensors, *IROS, IEEE*, 2010, pp. 2039-2046.
21. *Fox D.* Adapting the sample size in particle filters through KLD-sampling, *Int. J. of robotics research*, 2003, Vol. 22, pp. 985-1003.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. И.М. Афанасьев.

Березников Дмитрий Владимирович – Казанский федеральный университет, Высшая школа информационных технологий и интеллектуальных систем; e-mail: bereznikovdmitry@gmail.com; 420008, г. Казань, ул. Кремлевская 35; тел.: 2213433; студент.

Закиев Ауфар Азатович – e-mail: zaufar@it.kfu.ru; кафедра интеллектуальной робототехники; ассистент.

Магид Евгений Аркадьевич – e-mail: magid@it.kfu.ru; кафедра интеллектуальной робототехники; профессор; кафедра интеллектуальной робототехники; зав. кафедрой.

Bereznikov Dmitry Vladimirovich – Kazan Federal University, Higher Institute of Information Technology and Intelligent Systems; e-mail: bereznikovdmitry@gmail.com; 35, Kremlevskaya street, Kazan, 420008, Russia; phone: +72213433; student.

Zakiev AUFAR Azatovich – e-mail: zaufar@it.kfu.ru; assistant.

Magid Evgeni Arkad'evich – e-mail: magid@it.kfu.ru; the department of intelligent robotics professor, head of department.

УДК 007.51:623.4.074

DOI 10.18522/2311-3103-2020-1-98-108

**В.А. Шурыгин, В.А. Серов, С.А. Устинов, А.В. Леонард, С.Е. Червонцев,
В.Н. Платонов, С.С. Мазлов**

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ДОСЫЛА Артиллерийского снаряда в камору орудия

Целью работы является разработка и исследование метода контроля досыла артиллерийского снаряда в камору орудия и интеллектуальной системы контроля досыла по акустическому портрету. Существующий метод контроля досыла артиллерийского боеприпаса в камору орудия при раздельном способе заряжания основан на измерении скорости одного из элементов досылателя. Такой подход к контролю досыла не дает гарантированной надежности ввиду невозможности измерения скорости на конечном отрезке движения снаряда по инерции. Суть предложенного в статье метода заключается в возбуждении акустических колебаний в системе «снаряд – камора орудия» и выделении характерных акустических портретов (сигнатур) с их последующем анализом. Для исследования данного метода разработан экспериментальный стенд, имитирующий ствол орудия с камерой, и имитатор снаряда с различными обтюраторными поясками. Удар снаряда в момент заклинивания в конусе камеры или нанесенный извне возбуждает характерные акустические колебания, которые различаются для случаев надежного и недостаточного досыла. Для однозначной классификации событий надежного заклинивания и недостаточного досыла необходим выбор оптимального вектора признаков акустического портрета полученных аудиозаписей. Обычное спектральное преобразование позволяет выделить характерные частоты, однако использование набора таких спектральных составляющих в качестве классификационных признаков выбраны мел-частотные кепстральные коэффициенты. На основании набора таких коэффициентов с использованием искусственной нейронной сети осуществляется классификация степени заклинивания имитатора снаряда в стенде на три категории: «снаряд не заклинен», «недостаточный досыл снаряда», «снаряд заклинен». В результате обучения нейронной сети на значительной выборке аудиозаписей была достигнута точность классификации более 90%. Разработанный метод может быть применен в робототехнических комплексах, оснащенных артиллерийским вооружением, а также в других отраслях, например, в нефтегазовой промышленности для контроля стыковки сочленяемых труб.

Контроль досыла снаряда; виброакустический анализ; акустический портрет; искусственная нейронная сеть; мел-частотные кепстральные коэффициенты.

**V.A. Shurygin, V.A. Serov, S.A. Ustinov, A.V. Leonard, S.E. Chervoncev,
V.N. Platonov, S.S. Mazlov**

INTELLIGENT CONTROL SYSTEM OF THE PROJECTILE FIXATION INSIDE THE GUN'S CHAMBER

The aim of the study is to develop a method for controlling the sending of an artillery shell to the gun's chamber using an acoustic portrait. The existing method for controlling the delivery of artillery ammunition to the gun's chamber with a separate loading method is based on measuring the speed of one of the elements of the rammer. Such an approach to the control didn't provide

guaranteed reliability due to the impossibility of measuring speed in the final segment of the projectile's inertia motion. At present, vibroacoustic methods of analysis are widely used in various fields of science and technology and can be extended to the problem under consideration. The essence of the method proposed in the article is to excite acoustic vibrations in the "projectile - gun chamber" system and to distinguish characteristic acoustic portraits (signatures) with their subsequent analysis. To study this method, a laboratory bench has been developed that imitates the barrel of a gun with a chamber, and a shell simulator with various obturator belts. A projectile impact at the moment of jamming in the chamber cone or applied externally, for example, on the gun's body, excites characteristic acoustic vibrations, which differ for cases of reliable and insufficient sending. In the developed stand, acoustic vibrations were excited by an external impact on the resonator and were recorded for subsequent analysis. For an unambiguous classification of events of reliable jamming and insufficient submission, it is necessary to select the optimal vector of signs of an acoustic portrait of the obtained audio recordings. The usual spectral conversion makes it possible to distinguish characteristic frequencies, however, the set of such spectral components is not suitable as classification features due to the significant array of data obtained as a result of this analysis, and also due to the inability of the Fourier transform to recognize short-term low-power bursts. Therefore, as the classification features were selected mel-frequency cepstral coefficients. Based on the set of such coefficients, using the artificial neural network, the degree of jamming of the projectile simulator in the stand was classified into three categories: "sleep-row is not jammed", "insufficient shell projectile", "projectile jammed". As a result of training the neural network on a significant sample of audio recordings, a classification accuracy of 90% was achieved. It is shown that the developed method of such vibroacoustic analysis can be applied in robotic artillery weapon control systems, as well as in other technical tasks, for example, in oil and gas production to control the docking of articulated main pipes.

Projectile sending control; vibroacoustic analysis; acoustic portrait; neural network; mel-frequency cepstral coefficients.

Введение. В артиллерийских орудиях среднего и крупного калибров обычно применяется раздельное заряжание, которое предполагает последовательную загрузку боеприпаса и метательного заряда в камеру. При этом заряжание снаряда включает два этапа: установка его на линию заряжания и досылка до закусывания ведущего пояска в конусе врезания камеры. В таком положении снаряд должен надежно удерживаться до начала выстрела. Ненадежный досыл приводит к утечке пороховых газов в обход снаряда, что существенно снижает его начальную скорость и одновременно увеличивает разгар ствола.

При ручном способе заряжания контроль досыла осуществляется субъективно заряжающим расчетом по звуку удара пояска снаряда о конус камеры. При этом существенную роль играет опытность заряжающего.

Другим способом контроля досыла в настоящее время является измерение скорости досылающего звена на участке разгона снаряда. Главным недостатком такого метода является невозможность контроля скорости снаряда на инерционном участке движения, где высока вероятность его «рыскания» и последующей потери ввиду этого первоначальной скорости [1].

Поэтому актуальной является задача надежного автоматического контроля досыла артиллерийского снаряда в камеру орудия.

Метод контроля досыла снаряда по акустическому портрету. В настоящее время методы виброакустического анализа широко применяются в различных областях, в том числе при контроле сварных соединений [2, 3], дефектоскопии [4, 5], в системах распознавания речи [6–8] и др. [9].

Современные достижения в области анализа и распознавания звуковых сигналов дают возможность использовать такие методы для решения поставленной задачи – контроля досыла снаряда по его звуковому портрету.

Предлагаемый метод можно разделить на два способа: контроль звука удара снаряда о конус врезания в момент закусывания и контроль по звуку внешнего механического удара по системе «снаряд-орудие» после завершения процесса заряжания. Второй способ представляется более надежным, так как позволяет провести контроль непосредственно перед срабатыванием ударно-спускового механизма.

Рассмотрим метод контроля досыла артиллерийского снаряда, в которой заключение о степени заклинивания боеприпаса формируется с помощью устройства анализа досыла. При этом возможны два варианта установки устройства анализа досыла [10], представленные на рис. 1.

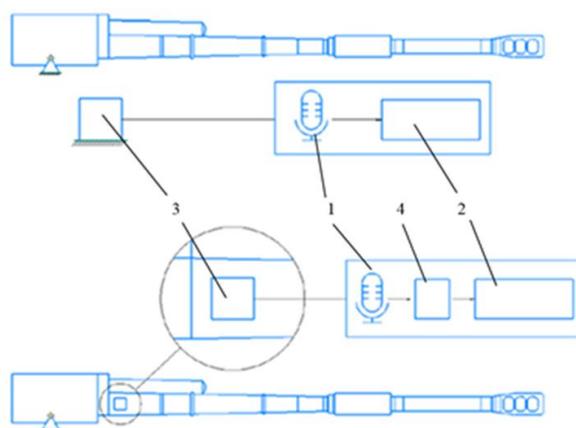


Рис. 1. Размещение устройства анализа досыла: 1 – микрофон; 2 – автоматическое аппаратно-программное устройство; 3 – устройство анализа досылки; 4 – устройство возбуждения акустических колебаний

При движении досылателя происходит включение устройства анализа досыла. Ввиду того что методика предполагает два варианта установки устройства, существует два способа записи звука. При установке устройства рядом с орудием, запись данных начинается с момента старта досылателя; при установке непосредственно на орудии, запись начинается после досылки снаряда с одновременным срабатыванием устройства возбуждения акустических колебаний.

Далее записанные с микрофона данные подвергаются анализу, который может быть осуществлен несколькими способами.

Первый способ предполагает применение дискретного преобразования Фурье и построение спектрограммы анализируемого аудиофайла с последующей ее обработкой сверточной нейронной сетью.

Второй способ предполагает вычисление мел-частотных кепстральных коэффициентов, частоты перехода через ноль, спектрального центроида и спектрального спада частоты. Вектор таких классификационных признаков подается на вход многослойной нейронной сети. Выбор нейронной сети для обработки обоснован ее способностью к обучению и к реконфигурации [11, 12].

Обучение нейронной сети производится подачей на ее вход выборки экспериментальных аудиофайлов с последующей проверкой на контрольной группе. Количество нейронов выходного слоя определяется либо числом категорий классификации, либо градацией усилий заклинивания.

Экспериментальные исследования. Для исследования предложенного метода был разработан экспериментальный стенд и проведен ряд экспериментов [13].

Экспериментальный стенд имитирует ствол артиллерийского орудия с люлькой, и представляет собой ствольную часть, расположенную в опоре. Вид экспериментального стенда в разрезе с установленными макетом снаряда и центрирующей втулкой представлен на рис. 2.

Обе части конструкции экспериментального стенда скреплены между собой болтовым соединением для моделирования закрепления ствола реального орудия. С дульной части ствольная часть (резонатор) имеет проточку для крепления съемника, которым осуществлялось выпрессовка макета снаряда. Казенная часть представляет собой фланец с просверленными глухими отверстиями для установки датчиков-микрофонов. К фланцу крепится съемник для запрессовки снаряда.

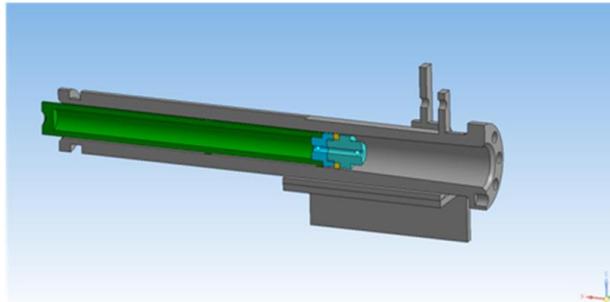


Рис. 2. Центрирование макета снаряда в стенде при запрессовке с помощью втулки (обозначена зеленым цветом)

В ходе эксперимента производилась запрессовка в резонатор макета снаряда с различными сменными кольцами, имитирующими обтюрационные пояски реального снаряда. В исследовании рассматривались кольца из различных материалов – алюминия, меди и бронзы. Симметричная форма макета снаряда позволяла производить его запрессовку любой стороной, что давало возможность использования каждого кольца раза без его переустановки. Для соосного размещения макета снаряда в ствольной части стенда применялась центрирующая втулка. Центрирование макета снаряда в стенде при запрессовке представлено на рис. 2 (центрирующая втулка представлена зеленым цветом).

Для измерения усилия запрессовки был изготовлен измеритель, состоящий из тензометрического датчика, размещенного в специальной втулке, согласующего устройства и программируемого микроконтроллера. Номинальная нагрузка тензодатчика – 100 кг, безопасная перегрузка 150 %, комплексная точность – 0,5 % (после калибровок и проверки 0,1 %). Согласующее устройство, к которому подключался тензометрический датчик, представляло собой 24-битный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) на базе микросхемы HX711. Данные с модуля АЦП по последовательному интерфейсу передавались на микроконтроллер с управляющей программой для дальнейшей обработки. Данные с микроконтроллера передавались через конвертор по USB интерфейсу на компьютер. Внешний вид тензометрического измерителя усилий запрессовки представлен на рис. 3.

Для запрессовки макета снаряда он вместе с центрирующей втулкой помещался в резонатор с казенной части. Затем помещался тензометрический датчик в специальной втулке. Датчик упирался в макет снаряда, а съемник крепился на фланце резонатора и давил своим винтом на втулку датчика. Во время запрессовки производился контроль усилия. Процесс запрессовки макета снаряда в казенную часть ствола представлен на рис. 4.



Рис. 3. Внешний вид тензометрического измерителя усилий запрессовки:
1 – микроконтроллер; 2 – модуль АЦП; 3 – втулка; 4 – тензометрический датчик

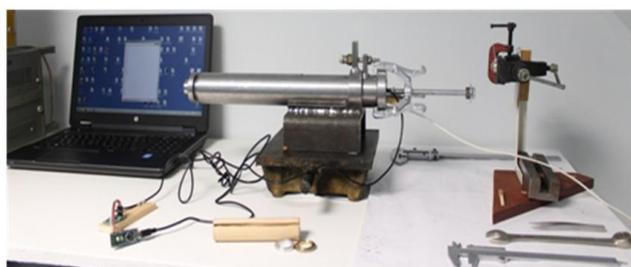


Рис. 4. Процесс запрессовки макета снаряда в казенную часть ствола экспериментального стенда

Для возбуждения акустических колебаний в резонаторе был применён маятник в виде стального шара диаметром 20 мм, подвешенный на двойной нити длиной 93 см на расстоянии 1 см до фланца резонатора. Шар маятника отводился на 20 см от места удара о фланец, и фиксировался в зажимном механизме. Для пуска шара механизм освобождал шар от удержания, и он совершал серию ударов о фланец резонатора, при этом производилась запись через электретный микрофон, находящийся в нижнем глухом отверстии фланца.

Все эксперименты проводились в нормальных климатических условиях. Для уменьшения возможных влияний посторонней вибрации экспериментальный стенд располагался на массивной плите, и изолировался от неё амортизаторами. Сама плита устанавливалась на стол также с использованием амортизаторов.

Каждое проведённое испытание с запуском маятника с различной степенью запрессовки макета снаряда производилось с 10-кратным повторением. Результаты измерений усилий выпрессовки при применении различных обтюрационных колец на макете снаряда представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерений усилий выпрессовки при применении различных обтюрационных колец

Тип пояска	Усилие запрессовки, кгс				
	2	4	16	32	64
Алюминиевый	0,5	1	5	5	20
Бронзовый	1	2,5	9	17	30
Медный	0,2	2	9	12	23

Сигнал с микрофона подавался на звуковую карту персонального компьютера, запись производилась в программе Nero WaveEditor (режим – моно, несущая частота – 96 кГц, глубина кодирования – 32 бита). Полученные звуковые записи в wav-формате были визуализированы на ЭВМ для их первичной оценки.

После записи звуковых файлов был произведен их анализ и получены спектрограммы для случаев: пустого ствола, когда макет снаряда отсутствовал в стволе; ненадежного досыла, когда усилие запрессовки было недостаточным; заклиненного снаряда (надежного досыла) со значительным усилием запрессовки.

Образцы полученных спектрограммы для трех рассматриваемых случаев представлены на рис. 5–7 [13].

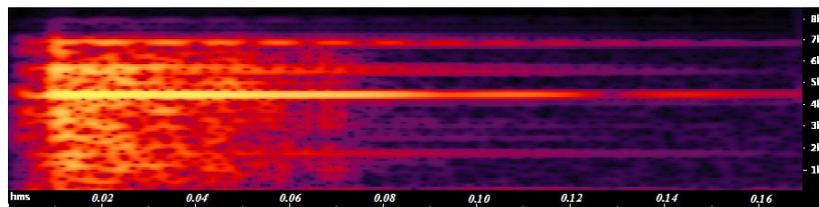


Рис. 5. Спектрограмма для случая «пустой ствол»

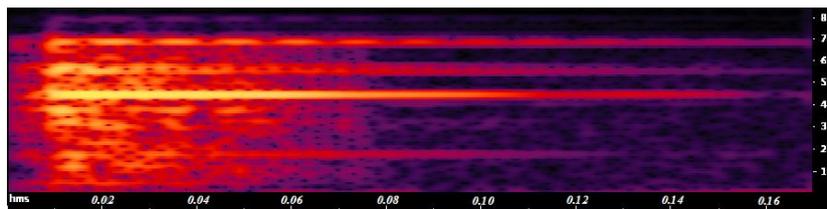


Рис. 6. Спектрограмма для случая «ненадежный досыл»

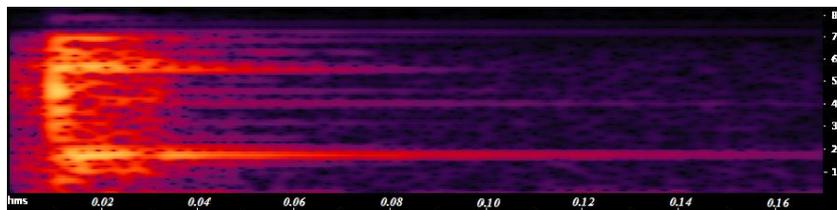


Рис. 7. Спектрограмма для случая «надежный досыл»

Анализ представленных спектрограмм позволяет сделать вывод о зависимости резонансных частот звука от положения макета снаряда в ствольной части. Так, для случая ненадежного досыла на спектрограмме видны характерные частоты со значениями приблизительно 4,5 кГц, 6 и 7 кГц, что объясняется свободным резонированием макета снаряда и отдельных частей ственда. В случае же надежного досыла, макет снаряда и ствол образуют единую резонирующую массу с меньшей резонансной частотой (около 1,5 кГц) чем пустой ствол.

Задачей рассмотренного метода контроля досыла является классификация записанных экспериментальных звуковых файлов по 3 категориям: «пустой ствол», «ненадежный досыл» и «надежный досыл». Такая классификация может быть выполнена с помощью искусственной нейронной сети. Решающую роль здесь играет выбор оптимального вектора характерных классификационных признаков, извлекаемых из экспериментальных аудиозаписей [14, 15].

При этом применение полученных спектрограммы для непосредственного анализа нейронной сетью нецелесообразно ввиду избыточного массива данных спектральных компонент.

В качестве вектора классификационных признаков выбраны мел-частотные кепстральные коэффициенты (MFCC) [16]. Анализ полученных экспериментальных аудиозаписей по мел-частотному кепстру позволяет выделить значительно меньший, но не менее информативный набор характерных признаков – мел-частотных кепстральных коэффициентов по сравнению с традиционным спектральным представлением [17–19]. Для вычисления таких коэффициентов каждая экспериментальная аудиозапись анализировалась в диапазоне частот от 0 до 8 кГц. Для перевода данного диапазона в мел-шкалу использовался ряд треугольных фильтров – в данном случае – 24 шт. Распределение собственных частот треугольных фильтров в рассматриваемом частотном диапазоне представлено на рис. 8.

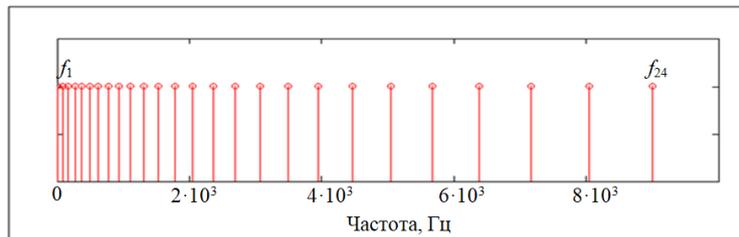


Рис. 8. Распределение собственных частот треугольных фильтров

Для каждого фильтра вычислялись энергетические коэффициенты [20]

$$\tilde{N}e_j = \ln \left(\sum_{k=0}^{N-1} (|F_k|^2 H_{j,k}) \right), \quad 0 \leq k < N-1, \quad 0 \leq j < M-1,$$

где F_k – преобразование Фурье k -го компонента; $H_{j,k}$ – весовой коэффициент j -го фильтра для k -го компонента; N – количество спектральных компонент; M – количество фильтров.

Затем вычислялись мел-частотных кепстральные коэффициенты. Полученные значения мел-частотных кепстральных коэффициентов для соответствующих событий представлены на рис. 10, 11.

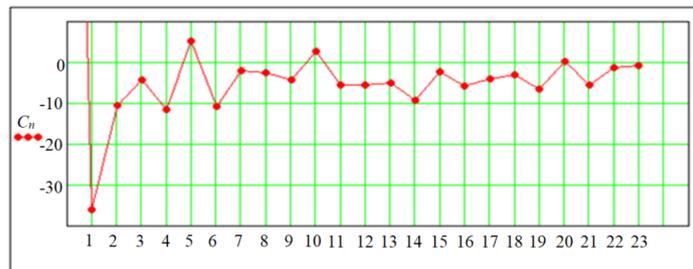


Рис. 9. Значения мел-частотных кепстральных коэффициентов для случая «пустой ствол»

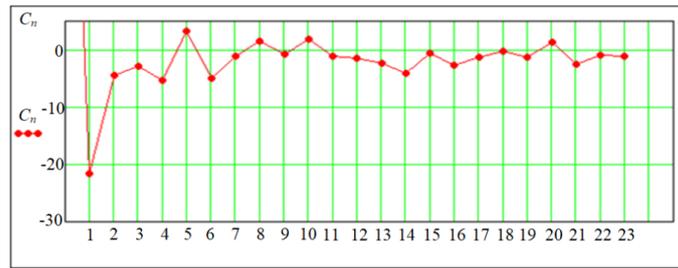


Рис. 10. Значения мел-частотных кепстральных коэффициентов для случая «ненадежный досыл»

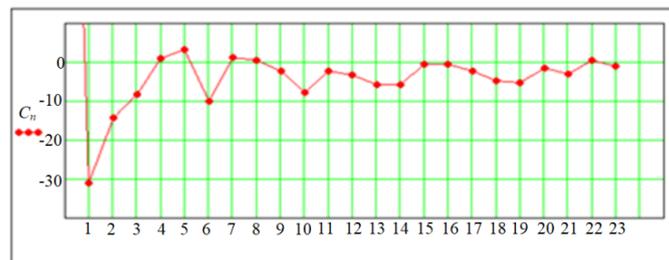


Рис. 11. Значения мел-частотных кепстральных коэффициентов для случая «надежный досыл»

Для классификации экспериментальных аудиозаписей использовались первые 13 вычисленных мел-частотных кепстральных коэффициентов. Представленный в таком виде вектор классификационных признаков подавался на вход 4-х слойной искусственной нейронной сети с 256 нейронами во втором слое, 128 нейронами в третьем слое и 19 нейронами в выходном слое. После обучения нейронной сети на значительной выборке экспериментальных аудиозаписей была достигнута точность классификации степени досыла 95 % на обучающей выборке и 90 % на контрольной.

Заключение. В результате проведенного исследования был разработан метод контроля досыла артиллерийского снаряда в камору орудия по акустическому портрету и интеллектуальная система контроля досыла.

Эффективность метода подтверждена на разработанном экспериментальном стенде. Точность идентификации степени заклинивания снаряда превышает 90 %.

Разработанный метод и интеллектуальная система контроля досыла могут быть применены в робототехнических комплексах, оснащенных артиллерийским вооружением, а также в других отраслях, например, – в нефтегазодобыче для контроля стыковки сочленяемых магистральных труб.

Основным направлением дальнейших исследований является экспериментальная обработка на реальном артиллерийском оружии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Блинов А.Д. Курс артиллерии / под общ. ред. ген-м. инж. артил. службы А.Д. Блинова. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Воен. изд-во, 1944-1949. – 9 т.
2. Тележенко Д.Р., Окладников А.А., Бегиев А.М. Контроль сварных швов ЖРД методом акустической эмиссии // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2017. – Т. 1, № 13. – С. 182-183.

3. Jiang J., Ye C., Zhang Z., Yu Y. Acoustic emission testing of a friction stir welding aluminum alloy pressure vessel // Springer Proceedings in Physics Ser. «Advances in Acoustic Emission Technology – Proceedings of the World Conference on Acoustic emission, 2017». – 2019. – P. 341-351.
4. Huaming Lei, Zuoying Huang, Wei Liang, Yimei Mao, Peiwen Que. Ultrasonic pig for submarine oil pipeline corrosion inspection // Дефектоскопия. – 2009. – № 4. – С. 85-94.
5. Степанова Л.Н., Рамазанов И.С., Канифадин К.В., Киреевко В.В. Использование двух-этапной кластирезации сигналов акустической эмиссии для определения дефектов сварки // Дефектоскопия. – 2011. – № 6. – С. 44-49.
6. Khatparia A., Gupta D., Khanna A., Nguyen N.G., Pandey B., Tiwari P. Sound classification using convolutional neural network and tensor deep stacking network // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 7717-7727.
7. Guo M., Jia Ch. Neural network recognizes fruit fly's wing vibration sound based on hilbert-huang transform // International Journal of Engineering and Manufacturing. – 2011. – № 6. – P. 25-30.
8. Kochetov K., Putin E., Balashov M., Filchenkov A., Shalyto A. Noise masking recurrent neural network for respiratory sound classification // Lecture Notes in Computer Science. – 2018. – Vol. 11141 LNCS. – P. 208-217.
9. Жуков К.В. Система акустического контроля прохождения поршня для автоматического контроля движения внутритрубного инспекционного снаряда // Мокеровские чтения. Сборник материалов 10-й Юбилейной Международной научно-практической конференции по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники. – 2019. – С. 167-168.
10. Кучеров В.Г., Червонцев С.Е., Садовников В.И., Гулевский В.В. К вопросу создания устройства для контроля положения в стволе досланного заряда // Оборонная техника. – 2015. – № 9-10. – С. 107-109.
11. Хайкин С. Нейронные сети. Полный курс. – 2-е изд.: пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.
12. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации: пер. с польск. И.Д. Рудинского. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 344 с.
13. Мазлов С.С., Беликов В.А., Червонцев С.Е. Акустический метод контроля досылки снаряда при раздельном зарядании // Калашниковские чтения: VI Всероссийская научно-практическая конференция (7 ноября 2019 г.): [в рамках II Молодёжного форума студентов и курсантов оборонных специальностей вузов России «С именем Калашникова» (6-8 ноября 2019 г.)]. ФГБОУ ВО «Ижевский гос. технический ун-т им. М. Т. Калашникова». – Ижевск, 2019. – С. 248-254.
14. Попов О.Б., Рухтер С.Г. Цифровая обработка сигналов в трактах звукового вещания. – М.: Горячая линия-Телком, 2007. – 341 с.
15. Chandwadkar D.M., Sutaone M.S. Role of features and Classifiers on Accuracy of Identification of Musical Instruments // 2nd National Conference on Computational Intelligence and Signal Processing, 2012. – P. 66-70.
16. Станкевич Ф.В., Стицын В.Г. Нейросетевое распознавание музыкальных инструментов с использованием мел-частотных кепстральных коэффициентов // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12-1. – С. 51-56.
17. Беленко М.В., Балакишин П.В. Сравнительный анализ систем распознавания речи с открытым кодом // Международный научно-исследовательский журнал. – 2017. – № 04 (58). Ч. 4. – С. 13-18.
18. Hermansky H. Perceptual Linear Predictive (PLP) Analysis of Speech // The Journal of the Acoustical Society of America. – 1990. – Vol. 87 (4). – P. 1738-1752.
19. Eronen A. Comparison of features for musical instrument recognition // Workshop on Signal Processing for Audio and Acoustics. – 2001. – P. 19-22.
20. Первушин Е.А. Обзор основных методов распознавания дикторов // Математические структуры и моделирование. – 2011. – № 24. – С. 41-54.

REFERENCES

1. Blinov A.D. Kurs artillerii [Artillery course]. Moscow, Voen. izd-vo, 1944-1949, Vol. 4, 192 p.
2. Telezhenko D.R., Okladnikov A.A., Begishev A.M. Kontrol' svarnykh shvov ZHRD metodom akusticheskoy emissii [Acoustic emission control of LRE welds], Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики [Actual problems of aviation and astronautics], 2017, No. 13, pp. 182-183.

3. Jiang J., Ye C., Zhang Z., Yu Y. Acoustic emission testing of a friction stir welding aluminum alloy pressure vessel, *Springer Proceedings in Physics Ser. «Advances in Acoustic Emission Technology – Proceedings of the World Conference on Acoustic emission, 2017»*, 2019, pp. 341-351.
4. Huaming Lei, Zuoying Huang, Wei Liang, Yimei Mao, Peiwen Que. Ultrasonic pig for submarine oil pipeline corrosion inspection, *Defektoskopiya* [Flaw detection], 2009, No.4, pp. 85-94.
5. Stepanova L.N., Ramazanov I.S., Kanifadin K.V., Kireenko K.V. Ispol'zovanie dvukhetapnoi klasterizatsii signalov akusticheskoy emissii dlya opredeleniya defektov svarki [Using of two-stage clustering of acoustic emission signals for detection of welding defects], *Defektoskopiya* [Flaw detection], 2011, No. 6, pp. 44-49.
6. Khamparia A., Gupta D., Khanna A., Nguyen N.G., Pandey B., Tiwari P. Sound classification using convolutional neural network and tensor deep stacking network, *IEEE Access*, 2019, No. 7, pp. 7717-7727.
7. Guo M., Jia Ch. Neural network recognizes fruit fly's wing vibration sound based on hilbert-huang transform, *International Journal of Engineering and Manufacturing*, 2011, No. 6, pp. 25-30.
8. Kochetov K., Putin E., Balashov M., Filchenkov A., Shalyto A. Noise masking recurrent neural network for respiratory sound classification, *Lecture Notes in Computer Science*, 2018, Vol. 11141 LNCS, pp. 208-217.
9. Zhukov K.V. Sistema akusticheskogo kontrolya prokhozheniya porshnya dlya avtomaticheskogo kontrolya dvizheniya vnutritrubnogo inspeksionnogo snaryada [Acoustic piston passage control system for automatic control of the in-tube inspection projectile movement], *Sbornik materialov 10-y Yubileynoy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii po fizike i tekhnologii nanogeterostrukturnoy SVCh-elektroniki* [Proceedings of the 10th Anniversary International Scientific and Practical Conference on Physics and Technology of Nanoheterostructure Microwave Electronics], 2019, pp. 167-168.
10. Kucherov V.G., Chervoncev S.E., Sadovnikov V.I., Gulevskiy V.V. K voprosu sozdaniya ustroystva dlya kontrolya polozheniya v stvole doslannogo zaryada [To the question of creating a device for monitoring of the sent projectile position in the barrel], *Oboronnaya tekhnika* [Defense technology], 2015, No. 9-10, pp. 107-109.
11. Haykin S. Neyronnye seti: polnyy kurs [Neural networks: a comprehensive foundation]. 2nd ed. Moscow, 2006, 1104 p.
12. Osovskiy S. Neyronnye seti dlya obrabotki informatsii [Neural networks for Information Processing], Moscow, Finansy i statistika, 2002, 344 p.
13. Mazlov, S.S. Akusticheskiy metod kontrolya dosylki snaryada pri razdel'nom zaryazhanii [Acoustic method for controlling projectile loading during separate loading], *Kalashnikovskie chteniya: VI Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya (7 noyabrya 2019 g.)* [Kalashnikov Readings: VI All-Russian Scientific and Practical Conference (November 7, 2019)], 2019, pp. 248-254.
14. Popov O.B., Rihter S.G. Tsifrovaya obrabotka signalov v traktakh zvukovogo veshchaniya [Digital signal processing in sound broadcasting paths]. Moscow, 2007, 341 p.
15. Chandwadkar D.M., Sutaone M.S. Role of features and Classifiers on Accuracy of Identification of Musical Instruments. *2nd National Conference on Computational Intelligence and Signal Processing*, 2012, pp. 66-70.
16. Stankevich F.V., Spicyn V.G. Neyrosetevoe raspoznavanie muzykal'nykh instrumentov s ispol'zovaniem mel-chastotnykh kepstral'nykh koeffitsientov [Neural network recognition of musical instruments using mel-frequency cepstral coefficients], *Fundamental'nye issledovaniya* [Basic research], 2014, No. 12-1, pp. 51-56.
17. Belenko M.V., Balakshin P.V. Sravnitel'nyy analiz sistem raspoznavaniya rechi s otkrytym kodom [Comparative analysis of open source speech recognition systems], *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Research Journal], 2017, No. 04 (58), pp. 13-18.
18. Hermansky H. Perceptual Linear Predictive (PLP) Analysis of Speech. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1990, 87 (4), pp. 1738-1752.
19. Eronen A. Comparison of features for musical instrument recognition. *Workshop on Signal Processing for Audio and Acoustics*, 2001, pp. 19-22.
20. Pervushin E.A. Obzor osnovnykh metodov raspoznavaniya diktorov [Overview of main speaker recognition methods], *Matematicheskie struktury i modelirovaniye* [Mathematical Structures and Modeling], 2011, No. 24, pp. 41-54.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. И.В. Ковшов.

Шурыгин Виктор Александрович – ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»; e-mail: au@vstu.ru; 400005, г. Волгоград, проспект им. В.И. Ленина, 28; тел.: 88442248167; член-корреспондент РАН; д.т.н.; профессор; заведующий кафедрой.

Серов Валерий Анатольевич – к.т.н.; доцент.

Устинов Сергей Анатольевич – к.т.н.; доцент.

Леонард Александр Валерьевич – к.т.н.; доцент.

Червонец Сергей Евгеньевич – к.т.н.; доцент.

Платонов Виталий Николаевич – e-mail: Platonov.Vitaliy@yandex.ru; тел.: +79377509775; аспирант.

Мазлов Сергей Сергеевич – e-mail: serega.mazlov@gmail.com; тел. +79610791336; студент.

Shurygin Victor Aleksandrovich – Volgograd State Technical University; e-mail: au@vstu.ru; 28, V.I. Lenin av., Volgograd, 40005, Russia; phone +78442248167; Corresponding Member of the Russian Academy of Science; dr. of eng. sc.; professor; head of department.

Serov Valeriy Anatolievich – cand. of eng. sc.; associate professor.

Ustinov Sergey Anatolievich – cand. of eng. sc.; associate professor.

Leonard Aleksandr Valerievich – cand. of eng. sc.; associate professor.

Chervoncev Sergey Evgenievich – cand. of eng. sc.; associate professor.

Platonov Vitaliy Nikolaevich – e-mail: Platonov.Vitaliy@yandex.ru; phone +79377509775; graduate student.

Mazlov Sergey Sergeevich – e-mail: serega.mazlov@gmail.com; phone +79610791336; student.

УДК 629.127.4-52

DOI 10.18522/2311-3103-2020-1-108-118

В.В. Костенко, И.Г. Мокеева, Н.А. Найдено, А.Ю. Толстоногов

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОЙ МАРШЕВЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

Целью исследования является оценка достоинств и недостатков существующих методов управления тягой маршевых движителей (МД) необитаемого подводного аппарата (НПА). В качестве объекта исследования была принята математическая модель МД АНПА "Х-200" разработки ИПМТ ДВО РАН, состоящая из совокупности моделей гребного электродвигателя, гребного винта и блока управления двигателем. В ходе проведенных исследований решались следующие задачи: разработка математической модели бесколлекторного гребного электродвигателя МД с уточнением параметров по результатам его нагрузочных испытаний; разработка математической модели гребного винта на основании его кривых действия, определенных в соответствии с регрессионной базой модельных испытаний PROPS; разработка математической модели блока управления двигателем (БУД); моделирование реакции движителя на ступенчатое изменение заданной тяги с регулированием электродвижущего момента электропривода по разомкнутому контуру, с обратной связью по частоте вращения гребного винта и с обратной связью по измеренной тяге. В результате проведенного моделирования реакции МД на ступенчатое изменение заданной тяги в швартовном режиме установлено, что варианты управления тягой различаются только временем переходного процесса, а статическая ошибка регулирования практически отсутствует для всех вариантов. При этом было выявлено почти двукратное преимущество в быстродействии регулирования МД по тяге и частоте вращения над регулированием по моменту, обусловленное увеличенным энергопотреблением привода в переходном процессе. Моделирование управления МД при попутном потоке, обусловленной

движением подводного аппарата, показало что регулирование по измеренной тяге имеет минимальную статическую ошибку и сопоставимое с регулированием по частоте вращения время переходного процесса.

Маршевый движитель; электропривод; гребной винт; математическая модель движителя; нагрузочные испытания; швартовная характеристика; методы управления тягой.

V.V. Kostenko, I.G. Mokeeva, N.A. Naidenko, A.Yu. Tolstonogov

RESEARCH OF MARCHING PROPULSIONS THRUST CONTROL METHODS OF UNMANNED UNDERWATER VEHICLES

The aim of the study is to assess advantages and disadvantages of existing methods for controlling thrust of main propulsions (MP) of unmanned underwater vehicles (UUV). The mathematical model of the MP developed by IMTP FEB RAS was adopted as the object of study. It's consisting of a set of models of an electric motor, propeller and thruster control unit. During the research the following tasks were solved: development of the mathematical model of a brushless motor with refine parameters based on results of its load tests; development of the mathematical model of a propeller based on its action curves determined in accordance with the PROPS model test regression base; development of the mathematical model of an thruster control unit (TCU); simulation of reaction of the thruster for stepwise change of desired thrust with the open-loop regulation of electromotive torque, with feedback on the frequency of rotation and on measured thrust. As the result of simulation main propulsion reaction on stepwise change of desired thrust in bollard pull mode it has been established that different types of thrust control are only differed in transient response time and static control error is almost non-existent for all types of control. Herewith, twofold decrease in transient response time with thrust and frequency control was found over torque control. This is due to increased power consumption of the motor in the transition process. Modeling of the MP control at the counter flow caused by the movement of the underwater vehicle showed that the control with thrust feedback has the minimum static error and transient response time is comparable with the speed control.

Main propulsion; electric drive; propeller; mathematical model of propulsion; load tests; bollard mode characteristic; thrust control methods.

Введение. Наиболее производительным и безопасным средством выполнения обзора поисковых и инспекционных работ под водой без ограничения глубины погружения является автономный необитаемый подводный аппарат (АНПА) [1–8]. Эффективность использования АНПА во многом зависит от точности его движения по заданной траектории, которая в значительной степени определяется управляющими воздействиями движительной системы. При этом важно обеспечить соответствие реальной тяги движителей целевым значениям, определенным регуляторами движения [9–12]. Целью настоящей работы является сравнительный анализ точности и быстродействия методов управления тягой маршевых движителей подводного аппарата, основанный на результатах компьютерного моделирования. Для достижения поставленной цели необходимо разработать адекватные Simulink - модели МД для трех вариантов управления тягой: по моменту электропривода, с обратной связью по частоте вращения гребного винта (ГВ) и с обратной связью по измеренной тяге движителя. При этом необходимо учитывать результаты экспериментальных исследований как электропривода, так и движителя.

Модель электропривода. Динамика бесколлекторного электродвигателя (ЭД), наиболее часто используемого в качестве привода движителей, может быть представлена моделью эквивалентного по характеристикам электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением [13–15]. Функциональная схема этой модели приведена на рис. 1.

На рис. 1 приняты следующие обозначения: N_y – код управления приводом, $K_{БУД}$ – коэффициент передачи блока управления двигателем (БУД); U_ϕ, I_ϕ – фазное напряжение и ток ЭД, соответственно; R_ϕ, L_ϕ – активное сопротивление и индуктивность фазы ЭД, соответственно; C_M, C_E – приведенные к фазе коэффициенты момента и ЭДС, соответственно; J_p, J_H – моменты инерции ротора и нагрузки, соответственно; $M_H, M_{ГВ}$ – момент нагрузки ЭД и ГВ, соответственно; E_ϕ – приведенная к фазе ЭДС самоиндукции; ω – угловая скорость вращения вала ЭД.

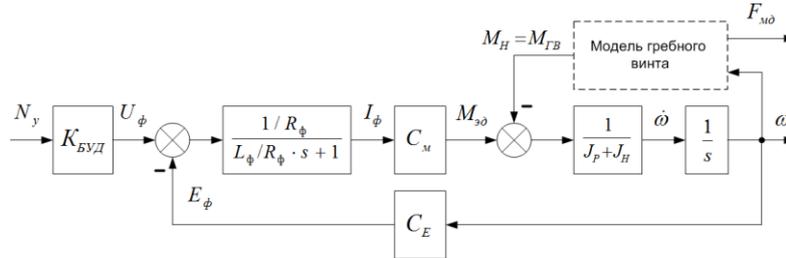


Рис. 1. Функциональная схема бесколлекторного электропривода

В соответствии с приведенной выше функциональной схемой разработана Simulink - модель электропривода на базе бесколлекторного электродвигателя FL42BLSH03 (рис. 2).

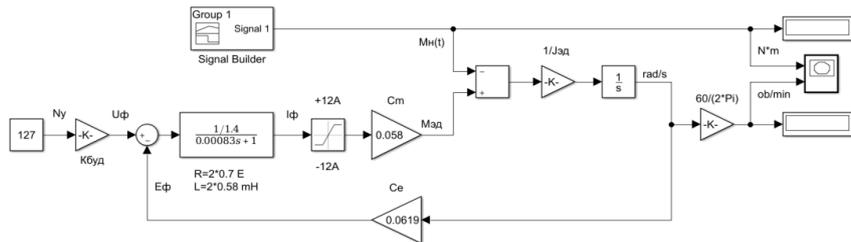


Рис. 2. Simulink - модель электропривода на базе бесколлекторного электродвигателя FL42BLSH03

Для уточнения параметров этой модели были проведены нагрузочные испытания электропривода, суть которых заключалась в измерении угловой скорости вала при изменяющемся по программе нагрузочном моменте и фиксированном коде управления [7, 16]. Результаты нагрузочных испытаний электродвигателя FL42BLSH03 [17] для кодов управления $20 \leq N_y \leq 127$ приведены на рисунке 3.

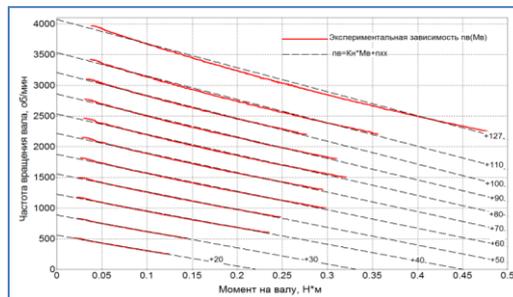


Рис. 3. Семейство механических характеристик $n_{эд}(M_H)$ электропривода на FL42BLSH03 для кодов управления $20 < N_y < 127$

В ходе анализа экспериментальных механических характеристик (см. рис. 3) установлена возможность их линейного представления. В результате итерационного поиска параметров C_m и C_e электродвигателя было найдено их сочетание, обеспечивающее хорошее совпадение линеаризованного представления экспериментальных механических характеристик привода с характеристиками модели рис. 2. Использованный подход позволил привести в соответствие статические характеристики предложенной модели привода с его экспериментальными характеристиками. Основные параметры модели привода сведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры модели электропривода на FL42BLSH03

$C_m, Н \cdot м/А$	$C_e, В/(\frac{рад}{с})$	$R_\phi, Ом$	$L_\phi, мН$	$U_{фмакс}, В$	$J_{эд}, г/см^2$	$K_{БУД}, \frac{В}{ед. кода}$
0,058	0,0619	0,70	0,58	25,9	154	25,9/127

Модель гребного винта. Параметры модели гребного винта (ГВ) маршевого движителя определяются зависимостями его тяги $T_{мд}$ и момента нагрузки для привода $M_{ГВ}$ от частоты вращения вала и скорости движения НПА. Согласованным с приводом является ГВ, который при движении НПА со скоростью хода V_x на выбранной частоте вращения привода n_b создает заданную тягу при моменте нагрузки $M_{ГВ}$, соответствующем оптимальным параметрам электродвигателя. Такой ГВ обеспечивают условия равенства крутящего момента привода и момента нагрузки ГВ $M_{эп} = M_{ГВ}$ при заданных значениях V_x и n_b . Для поиска геометрических параметров согласованного с приводом ГВ (диаметр $D_{ГВ}$, шаговое отношение $\zeta = H/D_{ГВ}$, число лопастей Z и дисковое отношение $\nu = A/A_d$) можно использовать прикладную программу PSOP [7, 18], основанную на данных регрессионной базы серийных испытаний гребных винтов Дайдола-Джонсона [19]. Для принятых к расчету геометрических параметров ГВ программа определяет коэффициенты упора K_t и момента K_m по формулам:

$$K_t = \sum_i C_{ti} \cdot \lambda^{S_{1i}} \cdot \zeta^{T_{1i}} \cdot \nu^{U_{1i}} \cdot Z^{V_{1i}}, \quad (1)$$

$$K_m = \sum_j C_{mj} \cdot \lambda^{S_{2j}} \cdot \zeta^{T_{2j}} \cdot \nu^{U_{2j}} \cdot Z^{V_{2j}}, \quad (2)$$

где $\lambda = \frac{V_x}{n_b \cdot D_{ГВ}}$ – относительная поступь ГВ; $C_{ti}, S_{1i}, T_{1i}, U_{1i}, V_{1i}, C_{mj}, S_{2j}, T_{2j}, U_{2j}, V_{2j}$ – полиномиальные коэффициенты регрессионной базы данных [19].

Далее значения тяги и момента сопротивления ГВ, соответствующие его оборотам и скорости хода НПА, вычисляются по классическим формулам [20]

$$T_{мд} = K_t(\lambda) \cdot \rho \cdot n_b^2 \cdot D_{ГВ}^4, \quad (3)$$

$$M_{ГВ} = K_m(\lambda) \cdot \rho \cdot n_b^2 \cdot D_{ГВ}^5, \quad (4)$$

где $K_t(\lambda) = K_{t0} + K_{t1} \cdot \lambda + K_{t2} \cdot \lambda^2$, $K_m(\lambda) = K_{m0} + K_{m1} \cdot \lambda + K_{m2} \cdot \lambda^2$ – аналитическое представление зависимостей коэффициентов упора и момента от относительной поступи [7, 18]. На рис. 4 приведены графики этих зависимостей для МД АНПА "ММТ-200" ($D_{ГВ} = 0,122$ м, $\zeta = H/D_{ГВ} = 0,656$, $Z = 2$, $\nu = A/A_d = 0,3$).

В соответствии с вышеизложенным была разработана Simulink-модель ГВ, изображенная на рис. 5.

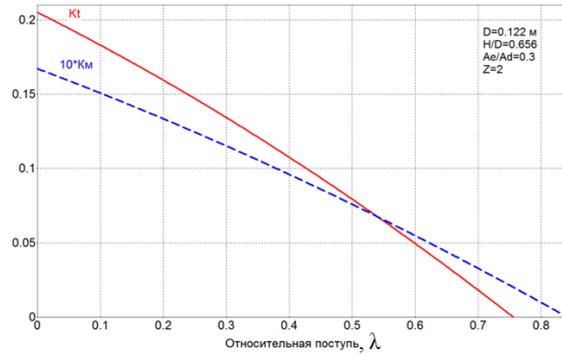


Рис. 4. Графики кривых действия ГВ МД АНПА "ММТ-200": $K_t(\lambda) = 0,205 - 0,2126 \cdot \lambda - 0,0777 \cdot \lambda^2$, $K_m(\lambda) = 0,0167 - 0,0159 \cdot \lambda - 0,0047 \cdot \lambda^2$.

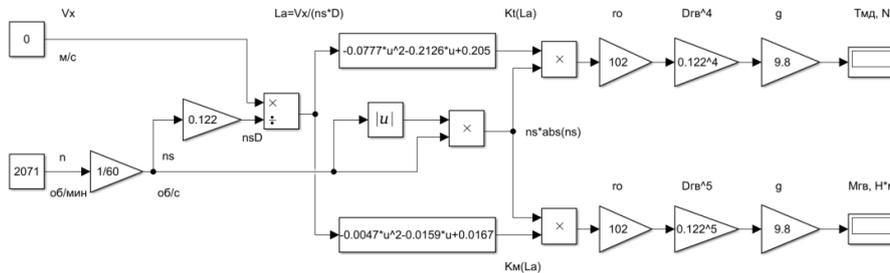


Рис. 5. Simulink-модель гребного винта маршевого движителя АНПА "ММТ-200"

Влияние гребного винта на динамику переходных процессов движителя в модели учитывается введением дополнительной составляющей приведенного момента инерции электродвигателя в соответствии с выражением

$$J_{\Sigma} = J_{\text{эд}} + J_{\text{ГВ}} + J_{\text{пв}}, \quad (5)$$

где J_{Σ} – суммарный приведенный момент инерции электродвигателя, $J_{\text{ГВ}}$ – приведенный момент инерции сухого винта, $J_{\text{пв}}$ – момент инерции присоединенной массы воды. Влияние воды на приведенный момент инерции погруженного в нее ГВ на основании данных практики оценивается увеличением полученного в результате расчета приведенного момента инерции сухого винта на 25–40 % [21]. При этом для суммарного приведенного момента инерции можно записать

$$J_{\Sigma} = J_{\text{эд}} + 1,4 \cdot J_{\text{ГВ}}. \quad (6)$$

Моделирование вариантов управления маршевым движителем. Анализ опыта разработки систем управления движением НПА и систем динамического позиционирования судов подтверждает наличие трех вариантов управления движителями: управление по моменту ЭД, управление по оборотам ГВ и управление по упору [22]. Структурные схемы вариантов управления приведены на рис. 6.

На рис. 6 приняты следующие обозначения: T_3 – заданное значение тяги движителя; $N_y(T_{\text{МД}})$ – калибровочная характеристика движителя, определенная как обратная функция статической швартовой характеристики $T_{\text{МД}}(N_y)$; $n_b(T_{\text{МД}})$ – калибровочная характеристика движителя, определенная как обратная функция экспериментальной швартовой характеристики $T_{\text{МД}}(n_b)$.

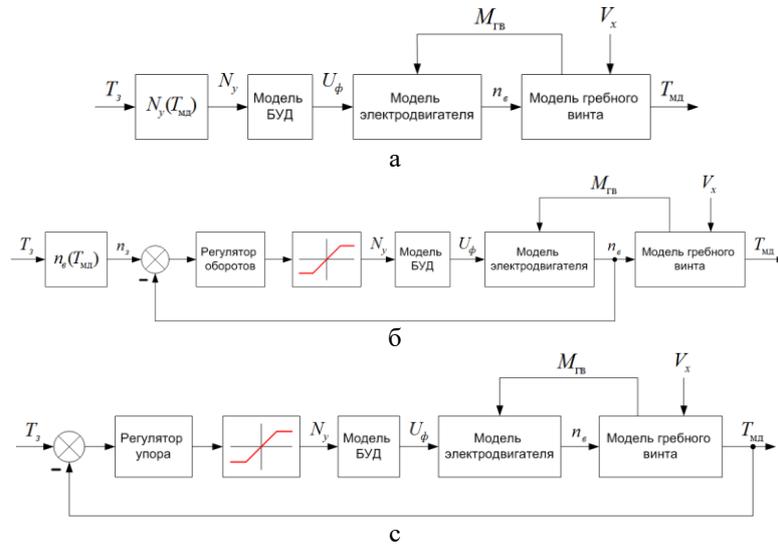


Рис. 6. Структурные схемы вариантов управления движителем: а – управление по моменту ЭД, б – управление по оборотам ГВ, с – управление по упору

В результате бассейновых испытаний были определены швартовные и калибровочные характеристики МД АНПА "Х-200", показанные на рис. 7–10.

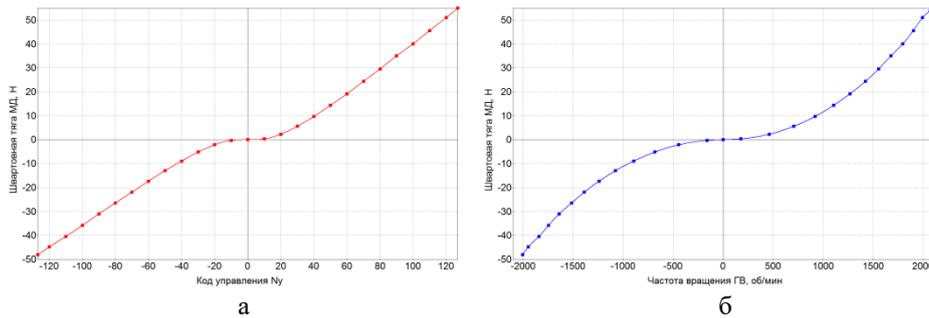


Рис. 7. Экспериментальные швартовные характеристики движителя: а – $T_{\text{МД}}(N_y)$, б – $T_{\text{ш}}(n_{\text{В}})$

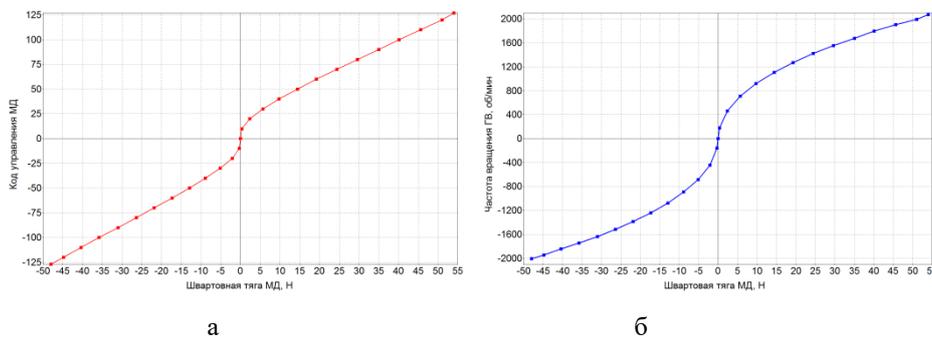


Рис. 8. Экспериментальные калибровочные характеристики движителя: а – $N_y(T_{\text{МД}})$, б – $n_{\text{В}}(T_{\text{ш}})$

Каждому варианту управления движителем соответствует свой регулятор, формирующий код управления электроприводом N_y на основании заданной тяги, обратных связей и ограничений параметров, соответствующих методу. Для управления электроприводом моментом привода по разомкнутому контуру выбран регулятор вида

$$N_{y1} = \begin{cases} N_y(T_{мд}), & -127 < N_y < 127; \\ 127 \cdot \text{sign}N_y, & |N_y| \geq 127. \end{cases} \quad (7)$$

Метод управления с обратной связью по частоте вращения ГВ предполагает предварительное вычисление заданных оборотов ГВ n_3 в соответствии с калибровочной характеристикой $n_b(T_{ш})$ и последующей обработкой ошибки П-регулятором

$$N_{y2} = \begin{cases} (n_3(T_3) - n_b) \cdot K_{п2}, & -127 < N_y < 127; \\ 127 \cdot \text{sign}N_y, & |N_y| \geq 127. \end{cases} \quad (8)$$

где $K_{п2}=500$ – масштабный коэффициент П-регулятора.

Управление с обратной связью по измеренному упору движителя реализовано ПИ-регулятором

$$N_{y3} = \begin{cases} (T_3 - T_{мд}) \cdot K_{п3} + K_{и3} \int (T_3 - T_{мд}) \cdot dt, & -127 < N_y < 127; \\ 127 \cdot \text{sign}N_y, & |N_y| \geq 127. \end{cases} \quad (9)$$

где $K_{п3}=400$, $K_{и3}=40$ – пропорциональный и интегральный масштабные коэффициенты ПИ-регулятора, соответственно.

В результате проведенного моделирования были получены графики переходных функций упора маршевого движителя АНПА "Х-200" на заданное значение $T_3 = 51$ Н для трех вариантов управления в швартовном режиме (рис. 9,а) и на скорости движения аппарата $V_x = 0,5$ м/сек (рис. 9,б).

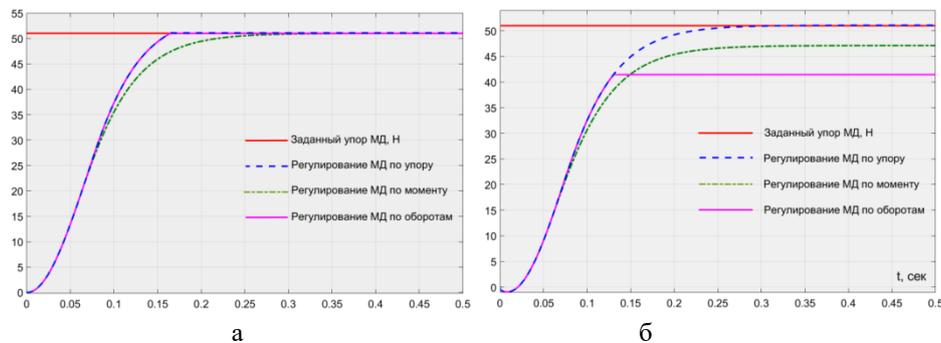


Рис. 9. Переходные функции маршевого движителя АНПА "ММТ-200":
а – швартовный режим ($V_x = 0$ м/с), б – на скорости аппарата $V_x = 0,5$ м/с

Как видно из полученных графиков, в швартовном режиме варианты управления различаются только временем переходного процесса, а статическая ошибка регулирования практически отсутствует. При этом наблюдается почти двукратное увеличение быстродействия регулирования по упору и оборотам в сравнении с регулированием по моменту. В условиях ненулевой скорости набегающего потока, обусловленной движением аппарата, появляется значительная ошибка регулирования упора по моменту и оборотам. Причиной этого может быть то, что управления по оборотам и моменту привода определяет заданные значения оборотов и кода управления по швартовным характеристикам движителей, которые не учитывают влияния набегающего потока.

Энергетические затраты исследуемых методов управления позволяют оценить графики рис. 10, где $N_{э} = U_{б\text{уд}} \cdot I_{\phi}$ – электрическая мощность потребления двигателя, $U_{б\text{уд}}$ – напряжение питания БУД, I_{ϕ} – фазный ток электродвигателя.

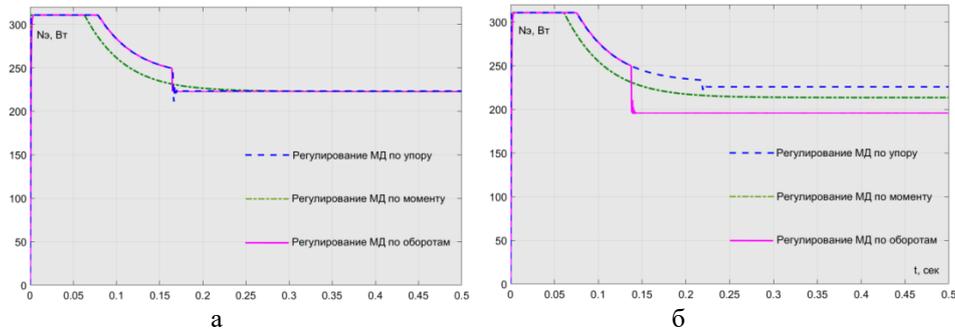


Рис. 10. Энергопотребление МД АНПА "ММТ-200" при $T_3 = 51$ Н:
 а – швартовный режим ($V_x = 0$ м/с), б – на скорости аппарата $V_x = 0,5$ м/с

Заключение. В статье рассмотрены основные методы управления упором маршевых двигателей: регулированием электродвижущего момента привода по разомкнутому контуру, регулированием с обратной связью по оборотам гребного винта и регулированием с обратной связью по упору. Для исследования достоинств и недостатков этих методов была разработана модель бесколлекторного привода, параметры которой корректируются по результатам его нагрузочных испытаний, а также модель гребного винта, учитывающая влияние скорости движения аппарата. Кривые действия модели гребного винта определялись в ходе гидродинамического расчета прикладной программой PSOP по геометрическим параметрам и далее уточнялись по результатам бассейновых испытаний маршевого двигателя АНПА "ММТ-200" в швартовном режиме.

Анализ результатов моделирования позволяет сделать следующие выводы:

- ♦ в швартовном режиме работы двигателя варианты управления различаются только временем переходного процесса, а статическая ошибка регулирования практически отсутствует;
- ♦ при этом двойное увеличение быстродействия регулирования по оборотам и упору обусловлено дополнительными энергетическими затратами на автоматическую отработку начальной ошибки, выводящей регуляторы в ограничение на больший период времени в сравнении с разомкнутым регулированием по моменту привода;
- ♦ в режиме движения аппарата с установившейся скоростью выявлены значительное увеличение статических ошибок (регулирование по моменту – 5 %, регулирование по оборотам – 10 %) в сравнении с регулированием по упору, что, вероятно, связано с некорректным определением заданных значений регулирования по швартовным характеристикам двигателя, не учитывающим влияние набегающего потока.
- ♦ регулирование двигателя по моменту обеспечивает минимальное энергопотребление и отсутствие динамических перегрузок системы энергообеспечения.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных научных исследований по приоритетным направлениям, определяемым Президиумом Российской академии наук, №7 "Новые разработки в перспективных направлениях энергетики, механики и робототехники", а также гранта №18-5-054 "Разработка методов синтеза информационно-управляющих систем подводных робототехнических средств для автоматического выполнения подводных операций в условиях частично неопределенного окружения" программы "Приоритетных научных исследований в интересах комплексного развития ДВО РАН".

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Агеев М.Д., Касаткин Б.А., Киселев Л.В. и др. Автоматические подводные аппараты. – Л.: Судостроение, 1981. – 223 с.
2. Боженков Ю.А., Борков А.П., Гаврилов В.М. и др. Самоходные необитаемые подводные аппараты / под общ. ред. И.Б. Иконникова. – Л.: Судостроение, 1986. – 264 с.
3. *Blidberg D.R.* The development of autonomous underwater vehicles (AUV); a brief summary // *IeeeIcra*. – 2001. – Vol. 4. – P. 1-12.
4. *Griffiths G.* (ed.). *The technology and applications of autonomous underwater vehicles* (Ocean Science and Technology, 2). – 2003. – Vol. 2. Abingdon, UK. Taylor & Francis. – 360 p.
5. Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Автономные подводные роботы: системы и технологии / под общ. ред. М.Д. Агеева. – М.: Наука, 2005. – 223 с.
6. *Войтов Д.В.* Автономные необитаемые подводные аппараты. – М.: Моркнига, 2015. – 332 с.
7. *Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Щербатюк А.Ф.* Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение / отв. ред. Л.В. Киселев. ФБГУН Ин-т проблем морских технологий ДВО РАН. – Владивосток, 2018. – 368 с.
8. *Матвиенко Ю.В., Борейко А.А., Костенко В.В., Львов О.Ю., Ваулин Ю.В.* Комплекс робототехнических средств для выполнения поисковых работ и обследования подводной инфраструктуры на шельфе // Подводные исследования и робототехника. – 2015. – № 1 (19). – С. 4-15.
9. *Костенко В.В.* Алгоритмы управления движительно-рулевым комплексом привязного телеуправляемого подводного аппарата // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2006. – № 9. – С. 31-36.
10. *Костенко В.В., Павин А.М.* К вопросу обеспечения независимости управляющих воздействий движительно-рулевого комплекса подводного аппарата // Матер. 6-й научно-технической конференции «Технические проблемы освоения мирового океана». Владивосток, 28 сентября – 2 октября 2015. – С. 118-123.
11. *Kostenko V.V., Tolstonogov A.Yu.* AUV Thrust Allocation with Variable Constraints // *ADV. Syst. SciAppl.* – 2017. – No. 3. – P. 1-8. – <http://ijassa.ipu.ru/ojs/ijassa/article/view/502>.
12. *Костенко В.В., Толстоногов А.Ю.* Задача декомпозиции управления движением АНПА с учетом изменяющихся ограничений маршевых движителей // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 1 (203). – С. 199-211.
13. *Беленький Ю.М., Зеленков Г.С., Микеров А.Г.* Опыт разработки и применения бесконтактных моментных приводов. – Л.: ЛДНТП, 1987. – 28 с.
14. *Емельянов А.А., Бескеткин В.В., Агзамов И.М. и др.* Математическое моделирование двигателя постоянного тока в системе относительных единиц в Matlab и Си // Молодой ученый. – 2019. – № 11. – С. 1-7. – URL: <https://moluch.ru/archiv/249/57298/> (дата обращения: 23.02.2020).
15. *Abu Sharkh S., Harris M.R., Crowder R.M., Chappell P.H., Stoll R.L. and Sykulski J.K.* Design considerations for electric drives for the thrusters of unmanned underwater vehicles // 6th European Conference on peer Electronics and Applications, Sevilla, 1995. – P. 799-801.
16. *Костенко В.В., Михайлов Д.Н., Найденов Н.А.* Определение параметров гребного электропривода по результатам нагрузочных и бассейновых испытаний // Матер. 5-й научно-технической конференции «Технические проблемы освоения мирового океана», Владивосток, 30 сентября – 4 октября 2013. – С. 389-395. – ISBN 978-5-8044-1409-3.
17. 42 mm High Torque Brushless Motor. – URL: <http://motor-fulling.com/6-7-high-torque-brushless-motor.html> (дата обращения: 25.02.2020).
18. *Костенко В.В., Михайлов Д.Н., Нечаев В.Д., Толстоногов А.Ю.* Оценка требований к гребному электроприводу автономного необитаемого подводного аппарата // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 1-2 (186-187). – С. 97-108.
19. *Daidola J.C., Johnson F.M.* Propeller Selection and Optimization Program // Manual for the Society of Naval Architects and Marine. NY.: Society of Naval Architects and Marine, 1992. – 258 p.
20. *Пантов Е.Н., Махин Н.Н., Шереметов Б.Б.* Основы теории движения подводных аппаратов. – Л.: Судостроение, 1973. – 210 с.

21. Энциклопедия по машиностроению XXL. Оборудование, материалы, механика. – URL: <https://mash-xxl.info/info/296203/> (дата обращения: 19.02.2020).
22. *Sorensen A.J.* "3.6 Methods for Thrust Control Asgeir J. Sorensen". The Ocean Engineering Handbook. 2000 Dec 28.

REFERENCES

1. *Ageev M.D., Kasatkin B.A., Kiselev L.V. i dr.* Avtomaticheskie podvodnye apparaty [Automatic underwater vehicles]. Leningrad: Sudostroenie, 1981, 223 p.
2. *Bozhenov Yu.A., Borkov A.P., Gavrilov V.M. i dr.* Samokhodnye neobitaemye podvodnye apparaty [Self-propelled uninhabited underwater vehicles], under the General ed. of I.B. Ikonnikova. Leningrad: Sudostroenie, 1986, 264 p.
3. *Blidberg D.R.* The development of autonomous underwater vehicles (AUV); a brief summary, *IeeeIcra*, 2001, Vol. 4, pp. 1-12.
4. *Griffiths G.* (ed.). *The technology and applications of autonomous underwater vehicles* (Ocean Science and Technology, 2), 2003, Vol. 2. Abingdon, UK. Taylor & Francis, 360 p.
5. *Ageev M.D., Kiselev L.V., Matvienko Yu.V. i dr.* Avtonomnye podvodnye roboty: sistemy i tekhnologii [Autonomous underwater robots: systems and technology], under the General ed. of M.D. Ageeva. Moscow: Nauka, 2005, 223 p.
6. *Voytov D.V.* Avtonomnye neobitaemye podvodnye apparaty [Autonomous uninhabited underwater vehicles]. Moscow: Morkniga, 2015, 332 p.
7. *Inzartsev A.V., Kiselev L.V., Kostenko V.V., Matvienko Yu.V., Pavin A.M., Shcherbatyuk A.F.* Podvodnye robototekhnicheskie kompleksy: sistemy, tekhnologii, primeneniye [Underwater robotic systems: systems, technologies, applications], responsible ed. L.V. Kiselev. Vladivostok, 2018, 368 p.
8. *Matvienko Yu.V., Boreyko A.A., Kostenko V.V., L'vov O.Yu., Vaulin Yu.V.* Kompleks robototekhnicheskikh sredstv dlya vypolneniya poiskovykh rabot i obsledovaniya podvodnoy infrastruktury na shel'fe [Complex robotic tools to perform searches and surveys of underwater infrastructure on the shelf], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater Investigation and Robotics], 2015, No. 1 (19), pp. 4-15.
9. *Kostenko V.V.* Algoritmy upravleniya dvizhitel'no-rulevym kompleksom privyaznogo teleupravlyаемого podvodnogo apparata [Algorithms for controlling the propulsion-steering complex of a tethered remote-controlled underwater vehicle], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2006, No. 9, pp. 31-36.
10. *Kostenko V.V., Pavin A.M.* K voprosu obespecheniya nezavisimosti upravlyayushchikh vozdeystviy dvizhitel'no-rulevogo kompleksa podvodnogo apparata [On the issue of ensuring the independence of control actions of the propulsion-steering complex of the underwater vehicle], *Mater. 6-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Tekhnicheskie problemy osvoeniya mirovogo okeana». Vladivostok, 28 sentyabrya – 2 oktyabrya 2015* [Proceeding of the 6th scientific and technical conference "Technical problems of development of the oceans», Vladivostok, September 28 – October 2. 2015], pp. 118-123.
11. *Kostenko V.V., Tolstonogov A.Yu.* AUV Thrust Allocation with Variable Constraints, *ADV. Syst. SciAppl*, 2017, No. 3, pp. 1-8. Available at: <http://ijassa.ipu.ru/ojs/ijassa/article/view/502>.
12. *Kostenko V.V., Tolstonogov A.Yu.* Zadacha dekompozitsii upravleniya dvizheniem ANPA s uchetom izmenyayushchikhsya ogranicheniy marshevykh dvizhiteley [AUV's Motion Control Allocation with Variable Properties of Propulsion System], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 1 (203), pp. 199-211.
13. *Belen'kiy Yu.M., Zelenkov G.S., Mikerov A.G.* Opyt razrabotki i primeneniya beskontaktnykh momentnykh privodov [Experience in the development and application of brushless torque drives]. Leningrad: LDNTP, 1987, 28 p.
14. *Emel'yanov A.A., Beskletkin V.V., Agzamov I.M. i dr.* Matematicheskoe modelirovanie dvigatelya postoyannogo toka v sisteme otноситel'nykh edinit v Matlab i Si [Mathematical modeling of a DC motor in a system of relative units in Matlab and C], *Molodoy uchenyy* [Young scientist], 2019, No. 11, pp. 1-7. Available at: <https://moluch.ru/archiv/249/57298/> (accessed 23 February 2020).
15. *Abu Sharkh S., Harris M.R., Crowder R.M., Chappell P.H., Stoll R.L. and Sykulski J.K.* Design considerations for electric drives for the thrusters of unmanned underwater vehicles, *6th European Conference on peer Electronics and Applications, Sevilla, 1995*, pp. 799-801.

16. *Kostenko V.V., Mikhaylov D.N., Naydenko N.A.* Opredelenie parametrov grebnogo elektroprivoda po rezul'tatam nagruzochnykh i basseynovykh ispytaniy [Determination of the parameters of the electric propeller drive according to the results of load and pool tests], *Mater. 5-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Tekhnicheskie problemy osvoeniya mirovogo okeana», Vladivostok, 30 sentyabrya – 4 oktyabrya 2013* [Proceeding of the 5th scientific and technical conference "Technical problems of development of the oceans», Vladivostok, September 30 - October 4, 2013], pp. 389-395. ISBN 978-5-8044-1409-3.
17. 42 mm High Torque Brushless Motor. Available at: <http://motor-fulling.com/6-7-high-torque-brushless-motor.html> (accessed 25 February 2020).
18. *Kostenko V.V., Mikhaylov D.N., Nechaev V.D., Tolstonogov A.Yu.* Otsenka trebovaniy k grebному elektroprivodu avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata [Assessment of requirements for the rowing electric drive of an Autonomous uninhabited underwater vehicle], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 1-2 (186-187), pp. 97-108.
19. *Daidola J.C., Johnson F.M.* Propeller Selection and Optimization Program, Manual for the Society of Naval Architects and Marine. NY.: Society of Naval Architects and Marine, 1992, 258 p.
20. *Pantov E.N., Makhin N.N., Sheremetov B.B.* Osnovy teorii dvizheniya podvodnykh apparatov [Fundamentals of the motion's theory of underwater vehicles]. Leningrad: Sudostroenie, 1973, 210 p.
21. Entsiklopediya po mashinostroeniyu XXL. Oborudovanie, materialy, mekhanika [Encyclopedia of Mechanical Engineering XXL. Equipment, materials, mechanics]. Available at: <https://mash-xxl.info/info/296203/> (accessed 19 February 2020).
22. *Sorensen A.J.* "3.6 Methods for Thrust Control Asgeir J. Sorensen". The Ocean Engineering Handbook. 2000 Dec 28.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.Н. Жирабок.

Костенко Владимир Владимирович – Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук; e-mail: kostenko@marine.febras.ru; 690950, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а; тел.: 84232432578; Лаборатория исполнительных устройств и систем телеуправления; к.т.н.; зав. лабораторией.

Найденко Николай Андреевич – e-mail: denmih@marine.febras.ru; Лаборатория исполнительных устройств и систем телеуправления; н.с.

Мокеева Ирина Геннадьевна – e-mail: mokeeva@marine.febras.ru; Лаборатория исполнительных устройств и систем телеуправления; с.н.с.

Толстоногов Антон Юрьевич– e-mail: bioniwulf@gmail.com; Лаборатория исполнительных устройств и систем телеуправления; н.с.

Kostenko Vladimir Vladimirovich – Institute of Marine Technology Problems, Far Eastern Branch Russian Academy of Science; e-mail: kostenko@marine.febras.ru; 5a, Sukhanova street, Vladivostok, 690950, Russia; phone: 84232432578; Laboratory actuating devices and remote control systems; cand. of eng. sc.; laboratory head.

Naidenko Nikolay Andreevich – e-mail: nna0502@gmail.com; Laboratory actuating devices and remote control systems; researcher.

Mokeeva Irina Gennadievna – e-mail: mokeeva@marine.febras.ru; Laboratory actuating devices and remote control systems; senior researcher.

Tolstonogov Anton Yurevich – e-mail: bioniwulf@gmail.com; Laboratory actuating devices and remote control systems; researcher.

М.А. Маевский, В.Ю. Занин, И.В. Кожемякин

**РАЗРАБОТКА КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
РЕЗИДЕНТНЫМ/ИНТЕРВЕНЦИОННЫМ АНПА НА ОСНОВАНИИ
ПОВЕДЕНЧЕСКИХ МЕТОДОВ**

Целью исследования является разработка комбинированных систем управления (СУ) автономным необитаемым подводным аппаратом (АНПА) интервенционного класса и манипуляторным комплексом (МК), установленным на АНПА. Аппараты такого типа являются важной составляющей подводных резидентных систем, которые позволяют расширять спектр задач, выполняемых типовыми АНПА. Система носит многоуровневый характер, позволяющий на должном уровне описать определенные состояния и поведения аппарата в зависимости от поставленной задачи. Разработанная система отличается своей универсальностью и модульностью, что подразумевает быстроту в настройке/корректировке текущих задач, поставленных перед АНПА и простом внедрении и формировании дополнительных задач со стороны оператора. В качестве примера, рассматривается задача, связанная с типовой работой резидентного АНПА – пробоотбор фракций грунта. Приведенные результаты натурных испытаний подтверждают работоспособность предложенных подходов к управлению, с учетом внешних недетерминированных возмущений постоянного характера и моногармонического воздействия. В рамках выполнения поставленной задачи, описывается процесс формирования состояний АНПА, команд перехода между состояниями, формирования дерева поведений аппарата. Научная и практическая новизна полученных результатов, представленных в статье, состоит в реализации первого в РФ разработанного аппаратно-программного комплекса для АНПА, позволяющего обеспечить процесс пробоотбора грунта как в автоматизированном, так и автономном режиме управления.

Резидентная робототехника; автономный необитаемый подводный аппарат; интервенционный АНПА; поведенческие методы.

A.M. Maevskiy, V.U. Zanin, I.V. Kozhemyakin

**DEVELOPMENT OF A COMBINED CONTROL SYSTEM FOR
RESIDENT/INTERVENTION AUV BASED ON BEHAVIORAL METHODS**

The aim of the study is the development of combined control systems by an autonomous underwater vehicle (AUV) of the intervention class and a manipulator complex installed on the AUV. Appliances of these types are an important component of underwater resident systems that allow you to expand the range of tasks performed by typical AUVs. The system is multi-level in nature, which allows to properly describe certain states and behavior of the device, depending on the task. The developed system is distinguished by its versatility and modularity, which implies the speed in setting up / adjusting the current tasks assigned to the AUV and the easy implementation and formation of additional tasks by the operator. As an example, we consider the problem associated with the typical work of a resident AUV – sampling of soil fractions. The above results from field tests confirm the workability of the proposed approaches to control, taking into account external non-deterministic perturbations of constant and monoharmonic effects. As part of the task, the process of forming the AUV states, transition commands between states, and the formation of a tree of device behavior is described. The scientific and practical novelty of the results presented in the article consists in the implementation of the first developed hardware-software complex for the AUV in the Russian Federation, which allows for the process of soil sampling in both automated and autonomous control modes.

Resident AUV; i-AUV; behavior tree; control system.

Введение. В настоящее время все более востребованными являются многофункциональные автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) способные выполнять широкий спектр поставленных задач. Таким образом интенсивное развитие получила область резидентной робототехники. Поскольку масштабы и сложность операций АНПА увеличиваются, соответственно возрастает потребность в подводных технических и обследовательских работах. Внедрение резидентных систем обеспечит преимущества для операторов нефтегазовой отрасли и сервисных компаний в таких областях, как получение исходных данных об окружающей среде, повышение эффективности и безопасности выполняемых работ, повышение безопасности проведения работ, снижение затрат на реализацию миссии, уменьшение эмиссии CO₂ при выполнении морских операций. Резидентная робототехника - новейший класс морских робототехнических комплексов, функционирующих в составе донной инфраструктуры океанографических обсерваторий и/или нефтегазового месторождения с размещением на донных и плавучих доковых станциях, имеющие энергетические и/или командные коммуникации с объектами береговой инфраструктуры. В силу ограниченности радиуса действия уже существующих и применяемых в коммерческом использовании телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов резидентного базирования - автономные необитаемые подводные аппараты резидентного базирования рассматриваются как предпочтительные уже в ближней перспективе, находясь, в настоящее время, на этапе опытной эксплуатации. Для увеличения функциональных возможностей традиционных АНПА, различными компаниями ведутся теоретические и практические разработки так называемых «интервенционных» АНПА, опирающиеся на более чем 30-летнюю базу экспериментальной и опытной наработки [1–5]. Отличительной особенностью данных аппаратов является наличие на борту инструментальных комплексов (ИК) и/или многостепенных манипуляторных комплексов (МК), функционирующих самостоятельно или совместно с ИК. Очевидно, что для выполнения поставленных задач необходима разработка комбинированных систем управления (САУ), способных как компенсировать внешние возмущения, создаваемые окружающей средой, так и возмущения, создаваемые при работе ИК и МК. В рамках выполнения работы, авторами был использован и модифицирован подход на основании поведенческих методов. Как результат исследований, приводятся данные проведенных испытаний разработанного экспериментального образца (демонстратора технологий) интервенционного АНПА и функционирующих бортовых систем САУ.

Формальная постановка задач резидентных АНПА. Многие из проблем, например, связанных с морскими нефтегазовыми операциями, особенно на больших глубинах или в районах с тяжёлыми ледовыми условиями, могут быть решены путем развертывания подводных резидентных систем инспекции и мониторинга. В то время как подводные месторождения нефти и газа становятся все более распространенными, современные тенденции формируют будущие разработки месторождений. Совершенно очевидно, что большинство будущих разработок будет сосредоточено на глубоководных и сверхглубоких водах. Распространение современных операций инспекции и мониторинга на большие глубины подразумевает увеличение сложности операций, а также интенсивное развитие подводных добывающих комплексов и структур подводной сейсморазведки [1, 6–9].

Так, список накладываемых задач на резидентный АНПА можно отобразить при помощи следующего рис. 1, где наглядно показано как возрастает сложность выполнения работ в зависимости от типа поставленной задачи.

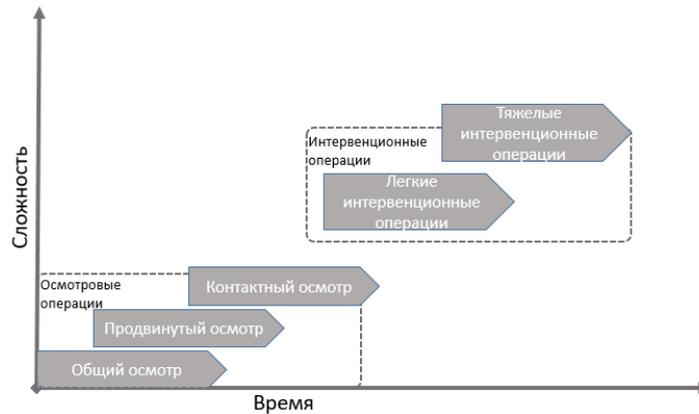


Рис. 1. Сложность различного типа подводных операций

Как видно из рис. 1, выделены основные типы выполняемых АНПА задач: задачи, содержащие в себе операции осмотрового типа и задачи, состоящие из «интервенционных» операций [10, 11]. Так, к интервенционным задачам можно отнести «легкие» задачи, связанные с работой манипуляторного комплекса с гидравлическими разъемами и поворотными клапанами, с подключением/отключением электрических проводов подводного добывающего комплекса (ПДК), очистку разъемов, пробоотбор жидкостей/грунта, и прочее. К «тяжелым» операциям относятся задачи, связанные с заменой сменных модулей ПДК, переключением дроссельных модулей, строительные и ремонтные работы.

Допустим, что имеется сформированная донная инфраструктура, в рамках которой располагаются различные элементы (рабочие платформы подводных добывающих комплексов (ПДК), подводные трубопроводные системы и т.д.). Необходимо обеспечить полное функционирование АНПА в данном окружении с учетом выполнения следующих типовых миссий, связанных с:

- ◆ работой на подводной панели ПДК, с предварительно уставленной системой беспроводной оптической передачи сигнала (БОПС);
- ◆ работой по инспекции и сервисному обслуживанию ПДК;
- ◆ работой по пробоотбору грунта в пространстве координат R районах N областей S_i , число которых можно описать $i = \overline{1, N}$ в частном случае прямоугольной формы, для которого известны координаты X_{c_i}, Y_{c_i} центра и H_{c_i} — глубина области пробоотбора, предварительно отсканированных на наличие возможных месторождений заданной инфраструктуры. Схематично задача представлена на рис. 2.

Общая задача для резидентного АНПА состоит в:

- ◆ организации перемещения аппарата в заданные области S_i (области забора грунта) и D (область рабочей панели);
- ◆ удержании заданной позиции АНПА в точке пробоотбора (рабочей панели ПДК);
- ◆ осуществлении работ МК как в автономном, так и в автоматизированном и в прямом режимах управления.

Исходя из особенностей типовых миссий, ставящихся перед аппаратом, логичным решением является разработка такой архитектуры управления комплексом, которая смогла бы совмещать в себе возможность задания, модернизации и внесения корректировок в имеющуюся миссию, отличалась бы модульностью, легкой масштабируемостью и адаптируемостью под другие задачи.

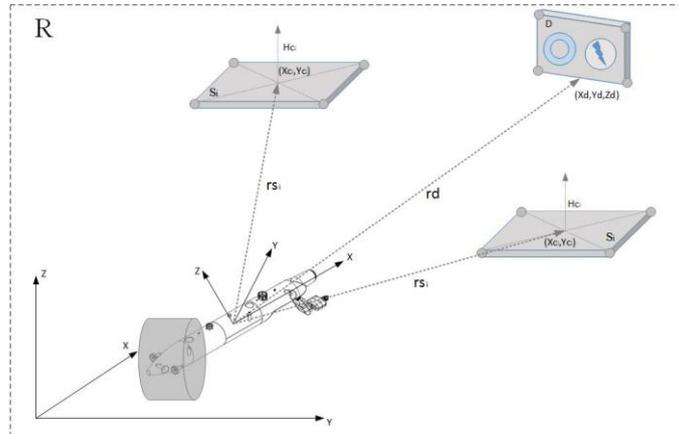


Рис. 2. Пространство выполняемой задачи

Таким образом, решение сформулированной задачи предлагается осуществлять посредством многоуровневой САУ. Схема САУ легкого интервенционного АНПА (ЛИ АНПА) представлена на рис. 3.

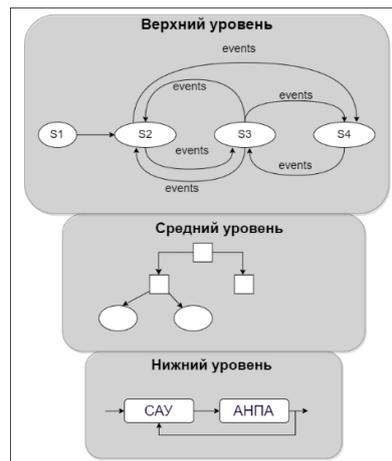


Рис. 3. Структура многоуровневой САУ ЛИ АНПА

На верхнем уровне осуществляется формирование определенных состояний аппарата и комбинации различных команд для перехода АНПА из одного состояния в другое. В основе САУ верхнего уровня лежит метод конечных автоматов. В качестве системы, обеспечивающей выработку целевых значений для САУ нижнего уровня, используется подход, основанный на поведенческих методах. Сегодня данные системы применяются на реальных объектах и доказали свою работоспособность в решении прикладных задач [12, 13]. Такой подход позволяет обеспечить легкую настройку, реконфигурирование и масштабируемость всей САУ в целом, что позволит существенно повысить функциональность АНПА в будущем. САУ среднего уровня - обеспечивает выработку необходимых заданий на систему управления нижнего уровня, контролирующую работу исполнительных механизмов АНПА [14–18].

Объект исследования. Рассмотрим модель подвижного объекта резидентного АНПА (рис. 4).

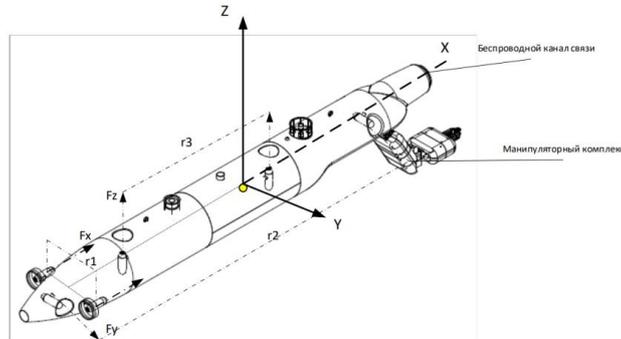


Рис. 4. Модель ЛИ АНПА

Для организации управления аппаратом была построена модель распределения обобщенных управляющих воздействий $\tau \in R^n$ на исполнительные механизмы АНПА. В рамках разработанной модели резидентного интервенционного АНПА, приняты следующие допущения: движительные установки неподвижны $\alpha = const$, что позволяет избежать учета дополнительных нелинейных элементов уравнений [19].

За управляющую силу движителя примем следующее выражение: $F = k * u$ где k – коэффициент пропорциональности, u – управляющее входное воздействие. Учтем, что данное линейное выражение также может быть использовано для описания нелинейных монотонных управляющих сил. Представим соотношение управляющих воздействий, сил и моментов резидентного АНПА в матричном виде:

$$\tau = \begin{bmatrix} f \\ r * f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ F_z * l_y - F_y * l_z \\ F_x * l_z - F_z * l_x \\ F_y * l_x - F_x * l_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

где $f = [F_x, F_y, F_z]$ проекция создаваемых сил движительным комплексом, $r = [l_x, l_y, l_z]$ – точки расположения соответствующих движителей относительно центра масс аппарата.

В зависимости от количества движителей вектор управляющих сил и моментов может быть записан в следующем виде:

$$\tau = T(\alpha)f = T(\alpha)Ku, \quad (2)$$

где K – матрица коэффициентов настройки управляющих воздействий

$$K = \text{diag} \{K_1, \dots, K_r\} \quad K^{-1} = \text{diag} \left\{ \frac{1}{K_1}, \dots, \frac{1}{K_r} \right\}$$

$u = [u_1, \dots, u_n]^T$ – вектор управляющих воздействий, приходящих на исполнительные механизмы, $T(\alpha) \in R^n$ – матрица конфигурации тяги двигателя, в общем случае зависящая от угла наклона движительной части. В случае стационарного расположения движителей $T = [t_1, \dots, t_r] = const$. Значения t_i для существующей конфигурации движительного комплекса резидентного АНПА можно записать в виде:

$$t_{marsh_{1,2}} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \pm l_y \end{bmatrix} \text{ – для маршевых движителей; } t_{vert_{1,2}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ -l_z \\ l_y \end{bmatrix} \text{ – для вертикальных движителей, } t_{stab_{1,2}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l_y \\ 0 \end{bmatrix} \text{ – для боковых движителей}$$

Таким образом запишем общее выражение для вектора тяги на основании выражения (2)

$$\tau = TKu. \quad (3)$$

Или для вектора управляющих воздействий

$$u = K^{-1}T^{-1}\tau. \quad (4)$$

Система управления манипуляторным комплексом. Второй частью АНПА является установленный на борту манипуляторный комплекс. В виду необходимости использования МК в режиме реального времени и многочисленной настройки допусков МК, алгоритм расчета позиции конечного звена манипулятора основан на методе градиентной минимизации. Ход выполнения алгоритма представлен на схеме 5.

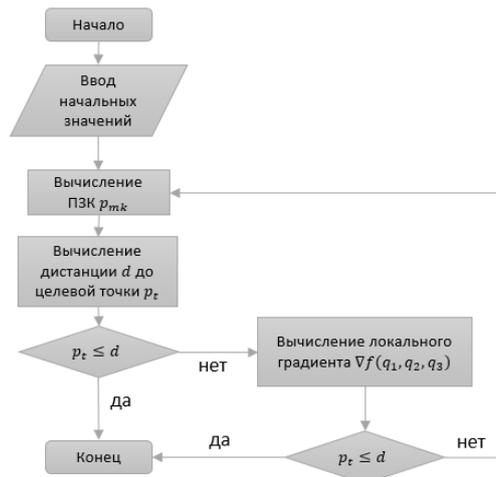


Рис. 5. Схема работы алгоритма градиентной минимизации

где в блок-схеме приняты следующие обозначения: $p_{mk} (x_{mk}, y_{mk}, z_{mk})$ – текущее положение схвата МК; $p_t (x_t, y_t, z_t)$ – целевое значение для положения схвата; d – минимальная дистанция между p_t и p_{mk} превышая которую, процесс работы градиентного спуска заканчивается; $\nabla f(q_1, q_2, q_3)$ – локальный градиент для каждого угла МК.

При старте работы алгоритма происходит инициализация начальных значений параметров: $L = 0.05$ – learning rate, отвечающего за скорость движения по градиенту; $\zeta = [\Delta x, \Delta y, \Delta z]$ – sampling distance, отвечающего за приращение переменной градиента, значения которого равны 0.1.

Суть градиентного подхода заключается в постепенном смещении углов $q_{mk} = [q_1, q_2, q_3]^T$ манипуляторного комплекса на величину $q_{mk}(i) = q_{mk}(i-1) + \zeta$ для минимизации ошибки $\varepsilon = d - p_t$. Так, рассчитывая новые d на основании нового значения МК $p_{mk}(i)$ мы можем получить текущее значение градиента как выражение

$$\begin{aligned} \nabla f_{q_1}(q_{mk}) &= (f(q_1 + \Delta x, q_2, q_3) - f(q_{mk})) / \Delta x \\ \nabla f_{q_2}(q_{mk}) &= (f(q_1, q_2 + \Delta y, q_3) - f(q_{mk})) / \Delta y \\ \nabla f_{q_3}(q_{mk}) &= (f(q_1, q_2, q_3 + \Delta z) - f(q_{mk})) / \Delta z. \end{aligned} \quad (5)$$

Таким образом, результирующий градиент для каждого из углов звеньев МК будет иметь вид

$$\nabla f(q_{mk}) = [\nabla f_{q_1}(q_{mk}); \nabla f_{q_2}(q_{mk}); \nabla f_{q_3}(q_{mk})]. \quad (6)$$

И получать новые значения q_{mk} как

$$q_{mk} = q_{mk} - L * \nabla f. \quad (7)$$

Как видно, данный цикл будет работать до тех пор, пока не выполнится условие $p_t \leq d$.

Разработанный метод управления, основанный на градиентном спуске, позволяет обеспечить непрерывное управление МК в различных режимах в конечный период времени. Так, в частности, были разработаны и реализованы в реальном времени режимы слежения за точкой и режим бездрожжистикового управления. Преимуществом этого метода управления является возможность его совершенствования при комплексном подходе к созданию интервенционного АНПА с целью снижения затрат вычислительной мощности бортовой САУ АНПА, в целях обеспечения не идеальных (лабораторных), а реальных, необходимых при практических операциях работах, с имеющимися диапазонами допусков МК. Модификация и настройка разработанного алгоритма может осуществляться при развитии метода градиентного спуска в виде метода наискорейшего спуска с оптимизированной экспериментальным путём величины шага исчерпывающего спуска. Также, преимуществами такой системы являются возможность быстрой настройки и изменения конфигурации миссии, без дополнительных программных процедур, усложняющих процесс изменения миссии аппарата в реальном времени.

Разработка поведенческой системы резидентного АНПА. После того, как были разработаны системы управления отдельными устройствами аппарата, является необходимой разработка общей системы (системы верхнего уровня), обеспечивающей формирование поведения аппарата в зависимости от поставленной задачи [20].

Как было указано выше, система разнесена на несколько основных уровней. На верхнем уровне реализация множества состояний АНПА описана при помощи метода конечных автоматов в виде $M = (V, Q, q_0)$, схема которого представлена на рис. 6.

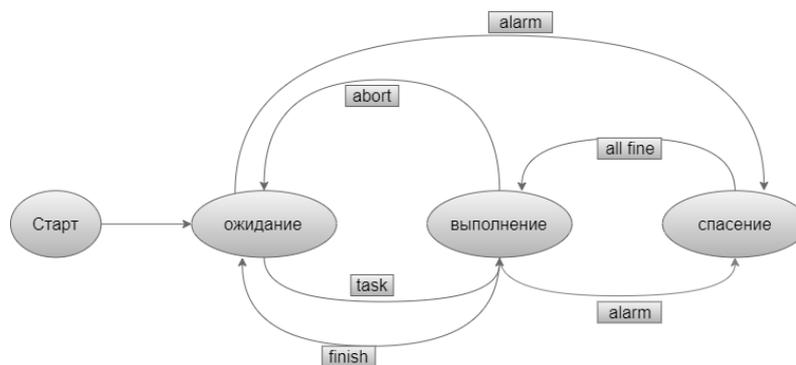


Рис. 6. Схема работы САУ верхнего уровня

Как видно, используемый конечный автомат является детерминированным, так как не содержит в цепочке команд (функций перехода) нулевых или пустых значений. Начальное состояние q_0 – соответствует положению «старта» АНПА. Множество состояний резидентного АНПА $Q = \{q_1, \dots, q_i\}$ где i – общее количество состояний, можно формализовать следующими определениями:

- ◆ Ожидание. В данном состоянии аппарат находится в режиме ожидания загрузки и получения миссии с наземного пункта управления.
- ◆ Выполнение. Данное состояние описывается отдельным деревом поведений, задающим совокупность определенных поведений объекта во время выполнения миссии.
- ◆ Спасение. Данное состояние также описывается отдельным деревом поведений, отвечающих за определенные действия аппарата в случае возникновения аварийных ситуаций.

Как видно из схемы, изображенной на рис. 6, за переходы в определенные состояния отвечают события $q_i a_n \rightarrow q_j$ - где $a \in V$ – определенное событие из списка событий V , генерирующееся при помощи менеджера событий, с которым сопряжены все структуры поведений аппарата. Описание состояний приведено на рис. 7.

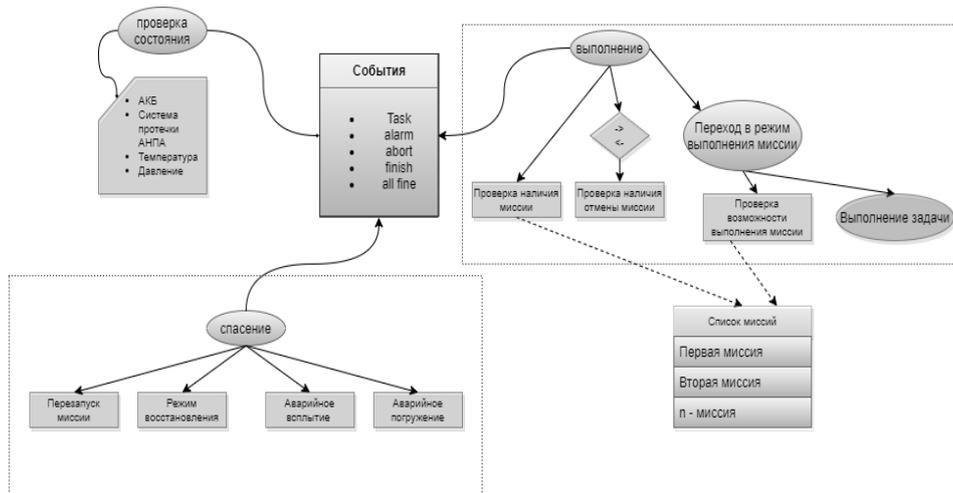


Рис. 7. Основные состояния ЛИ АНПА

На рис. 7 изображены состояния резидентного АНПА Q_i , каждое из которых описано своим деревом поведений. Разработанная архитектура системы управления имеет модульную структуру, что позволяет без особых сложностей добавлять новые деревья, описывающие те или иные задачи, формировать списки миссий АНПА. После прохождения каждого дерева, система выдает соответствующее событие в менеджер событий, который передает соответствующую команду на систему состояний верхнего уровня. Каждый элемент дерева, отвечающий за выполнение миссии, ссылается на список миссий, хранящийся в отдельном менеджере.

Объект дерева «выполнение задачи» также является отдельным деревом поведений, описывающих процесс выполнения сконфигурированных задач.

Например, опишем сформированную ранее задачу о необходимости осуществления пробоотбора грунта при помощи данного подхода (рис. 8).

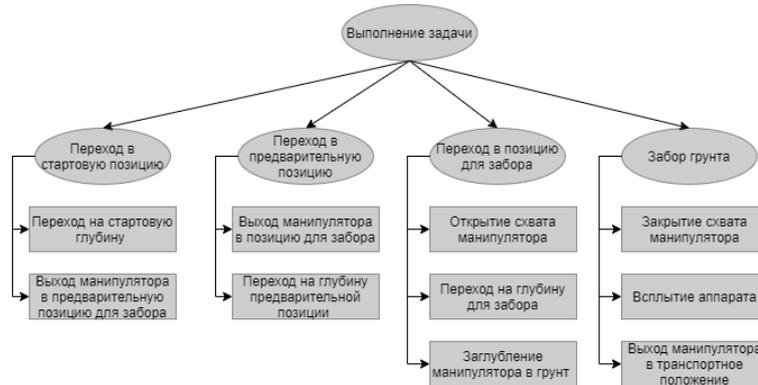


Рис. 8. Пример сформированной задачи по пробоотбору грунта

Результаты натурных испытаний разработанной системы. В рамках испытательного бассейна СПбГМТУ были проведены натурные исследования работоспособности описанной системы (фотофиксация процесса эксперимента представлена на рис. 9). В ходе испытаний были учтены параметры расположения места пробоотбора по глубине ($L=1$ м). Исходя из геометрической конфигурации аппарата и манипуляторного комплекса были выставлены следующие параметры поведения: стартовая глубина АНПА – 0,5 м, глубина предварительной позиции забора 0,6 м, глубина забора 0,7 м, заглубление в грунт до 0,09 м.



Рис. 9. Фотофиксация натурных испытаний работы САУ ЛИ АНПА в задаче пробоотбора грунта из установленной тары

Стоит учесть, что выход на стартовую позицию осуществлялся при помощи работы дополнительного дерева, описывающего процесс движения АНПА в заданную точку пространства R , а выбор диапазона глубин обусловлен зоной влияния волнового воздействия на АНПА при работе волнопродуктора испытательного бассейна.

Рассмотрим результаты работы системы стабилизации при выходе на заданную стартовую глубину, приведённые на рис. 10.

На рис. 10 изображена работа системы стабилизации резидентного АНПА [21] в режиме зависания над местом пробоотбора грунта. Аппарат приходит в устойчивое состояние за период времени равный $t_{\text{пер}} = 30\text{с}$. СКО по глубине $d_h = 0,03$ м, СКО дифферента после режима регулирования $d_\varphi = 0,47$ градусов от целевого значения. Система поддерживает устоявшийся режим при среднем постоянном управляющем воздействии $\bar{P}_{F1,F2} = 10\%$ от общей мощности моторов.

Следует отметить, что во время проведения натурального эксперимента были, также, рассмотрены режимы при внешних воздействиях со стороны: внешнее принудительное отклонение аппарата F_v (рис. 11) и моногармоническое волновое воздействие, оказываемое при работе волнопродуктора испытательного бассейна [22].

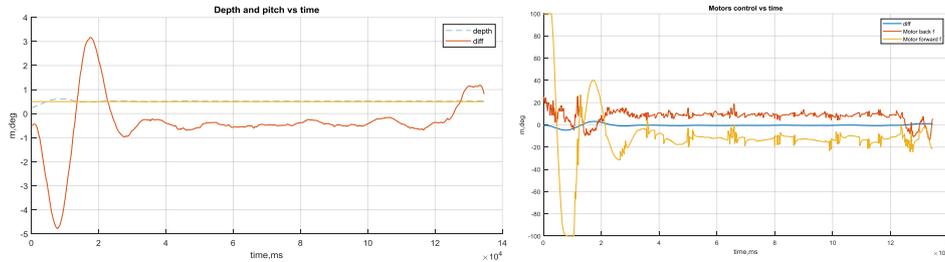


Рис. 10. График изменения параметров глубины и дифферента ЛИ АНПА в процессе работы систем стабилизации аппарата

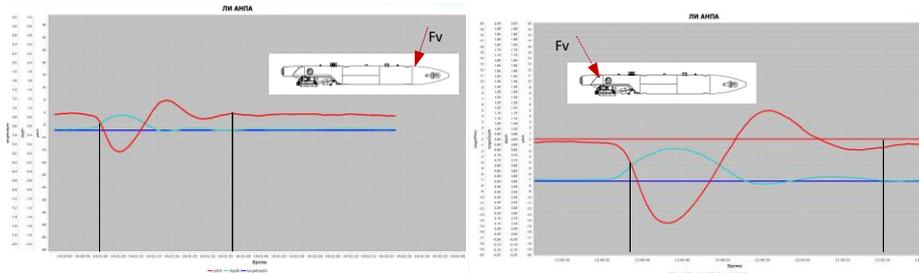


Рис. 11. Приложение возмущающей силы к носовой и кормовой части АНПА, при выполнении перехода в заданную глубину $H=0.5$ м

Рассмотрим результаты, полученные во время испытаний, изображенные на рис. 12, 13.

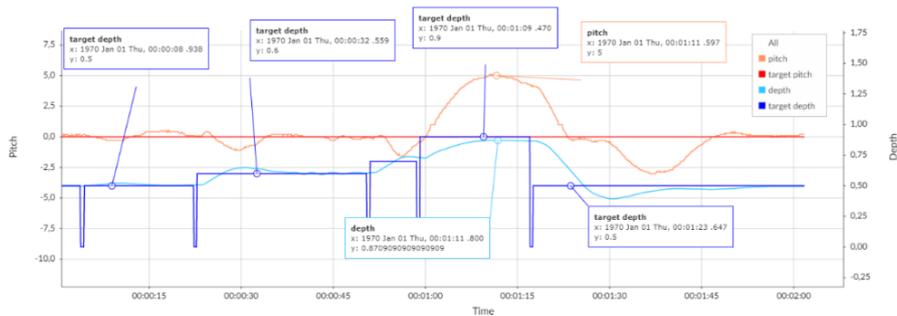


Рис. 12. Результаты работы комбинированной САУ ЛИ АНПА в процессе пробоотбора грунта (эксперимент 1)

На рис. 12, 13 изображены результаты двух экспериментов процесса пробоотбора грунта. Выделенными маркерами на рисунке изображены основные этапы работы системы управления АНПА, которая ступенчато переводила аппарат на заданную глубину. Можно отметить, что в процессе изменения и фиксирования заданной глубины наблюдается незначительная ошибка по параметрам отклонения

угла дифферента и глубины АНПА. Существенное смещение по дифференту на обоих графиках появляется в момент процесса заглужения ковша пробоотборника манипуляторного комплекса АНПА в грунт. Для того, чтобы избежать этого и, как следствие, перегрузки двигателей – в данной конфигурации АНПА необходима более точная настройка системы коэффициентов регулятора САУ и более точный выбор параметров величины заглужения МК.

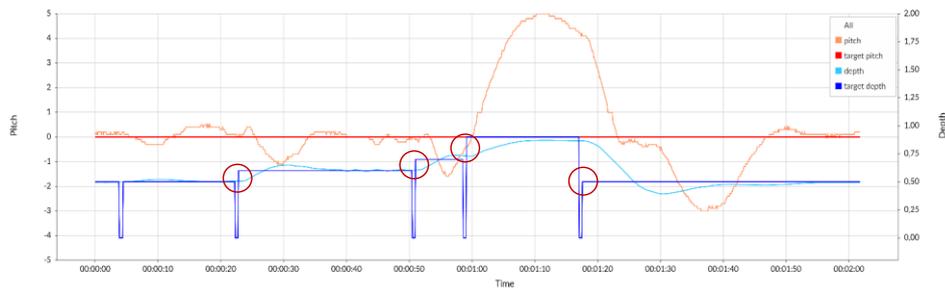


Рис. 13. Результаты работы, комбинированной САУ ЛИ АНПА в процессе пробоотбора грунта (эксперимент 2)

Заключение. В работе рассматриваются особенности комбинированного подхода управления резидентным АНПА. Согласно этому подходу, многоуровневая комбинированная система управления, состоящая из системы верхнего уровня на основе конечных автоматов, системы среднего уровня, реализованной методом дерева поведений, и системы нижнего уровня на основе выработки управляющих воздействий на исполнительные механизмы устройства, осуществляет полноценное управление аппаратом и выполнение заданных миссий. В работе рассмотрен пример апробации данной системы в рамках практических испытаний.

Приведенный пример выполнения миссии по пробоотбору фракций грунта, в настоящее время обычно выполняется в дистанционно управляемом режиме, под контролем оператора [23–26]. Сегодня автоматическим пробоотбором грунта занимаются лишь несколько научно-исследовательских центров в мире. Так, например, таких как океанографический институт Вудс-Хоула, где в январе 2020 года продемонстрировали автоматический пробоотбор грунта с морского дна [27]. Фотографии с наших натурных экспериментов приведены на рис. 14.



Рис. 14. Сравнительные фотографии с экспериментов по работам АНПА с макетами донных панелей ПДК (АО «НП ПТ «Океанос» и Saab Seaeye) и процессу автоматического пробоотбора грунта (WHOI и АО «НП ПТ «Океанос»)

Таким образом, успешное выполнение подобных операций в автономном и автоматизированном режимах, в рамках представленных результатов, демонстрируют научную и практическую ценность и актуальность разработанной программно-аппаратной системы.

Модульность разработанной системы позволяет производить мобильную реконфигурацию системы управления верхнего и среднего уровней, дополнять список выполняемых задач и вносить корректировки в уже поставленные миссии.

Также, разработанная комбинированная система создает возможность для внедрения в нее дополнительных элементов и систем для организации группового управления аппаратами.

Как показали результаты проведенных испытаний, разработанная комбинированная система управления резидентным АНПА, основанная на подходе дерева поведений, успешно выполнила поставленную задачу, так в результате всех экспериментов было взято и зафиксировано достаточное количество фракции грунта в ковше МК [28].

Работы в обеспечение создания системы проводились в период 2012–2019 годов в инициативном порядке силами АО «НПП ПТ «Океанос» и ФГБОУ ВО СПбГМТУ, неоднократно освещались на Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления», форумах, конференциях, конкурсах и выставках «Газовый форум», «Армия», «Международный Военно-Морской Салон», «Экстремальная робототехника», «Маринет», «Арктика» и др.

Реализация результатов работ и их внедрение проведено в САУ экспериментальных образцов АНПА типа «Глайдер» (подводный планер), лёгкого интервенционного АНПА, а также в подводном 5-ти степенном манипуляторном комплексе (коммерциализирован в 2019 г. совместно с АО «ГНПП «Регион»).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Furuholmen M. [et al.]*. Resident Autonomous Underwater Vehicle Systems // A Review of Drivers, Applications, and Integration Options for the Subsea Oil and Gas Market. In Proceedings of the Offshore Mediterranean Conference and Exhibition. – 2013. – P. 20-22.
2. *Wrzos-Kaminska M., Pettersen K.Y., Gravidahl J.T.* Path following control for articulated intervention-AUVs using geometric control of reduced attitude // IFAC-PapersOnLine. – 2019. – P. 192-197.
3. *Dai P., Lu W., Le K., Liu D.* Sliding Mode Impedance Control for contact intervention of an I-AUV: Simulation and experimental validation // Ocean Engineering. – 2020. – Vol. 196, 106855. – ISSN 0029-8018. – <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106855>.
4. *Ridao [et al.]*. Intervention AUVs: The next challenge // Annual Reviews in Control. – 2015.
5. *Zagatti R. [et al.]*. FlatFish Resident AUV: Leading the Autonomy Era for Subsea Oil and Gas Operations. – 2018. – P. 35-48.
6. *Fahrni, L [et al.]*. Scope and feasibility of autonomous robotic subseaintervention systems for offshore inspection, maintenance and repair // In Proceedings of the Proceedings of the 3rd International Conference on Renewable Energies Offshore (RENEW 2018). – 2018. – P. 85-95.
7. <https://www.marinetechnews.com/news/subsea-mining-thing-588211>.
8. *Гайкович Б.А., Занин В.Ю., Тарадонов В.С., Блинков А.П., Кожемякин И.В., Токарев М.Ю., Бирюков Е.А.* Концепция роботизированной подводной сейсморазведки в подлёдных акваториях // Сб. работ лауреатов Международного конкурса научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на развитие и освоение Арктики и континентального шельфа 2018 года. – 2019. – С.-64-87.
9. *Маевский А.М., Гайкович Б.А.* Разработка гибридных автономных необитаемых аппаратов для исследования месторождений углеводородов // Научно-технический сборник вести газовой науки. – 2019. – № 2 (39). – С. 29-40.
10. *Занин В.Ю., Маевский А.М. и др.* Разработка элементов подводных робототехнических резидентных систем на примере отечественного автономного необитаемого подводного аппарата интервенционного класса и сопутствующих технологий // Сб. работ лауреатов Международного конкурса научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на развитие и освоение Арктики и континентального шельфа 2019 года. – 2019. – С. 14-22.

11. *Маевский А.М., Гайкович Б.А.* Разработка легкого интервенционного автономного обитаемого подводного аппарата в целях использования в подводных резидентных системах // Матер. XIV Всероссийской научно-практической конференции и X молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах». – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2019. – С. 83-98.
12. *Инзарцев А.В., Павин А.М., Багницкий А.В.* Планирование и осуществление действий обследовательского подводного робота на базе поведенческих методов // Подводные исследования и робототехника. – 2013. – № 1 (15). – С. 4-16.
13. *Инзарцев А.В.* Методы формирования поведения и проектирования программного обеспечения обследовательского автономного подводного робота: дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2012. – 297 с.
14. *Marzimoto A., Colledanchise M., Smith C., Gren P.* Towards a unified behavior trees framework for robot control // In: 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – P. 5420-5427.
15. *Palma R. [et al.].* Extending Case-Based Planning with Behavior Trees // in FLAIRS Conference. – AAAI Press, 2011. – P. 65-79.
16. *Lim C.-U., Baumgarten R., and Colton S.* Evolving Behaviour Trees for the Commercial Game DEFCON // in Applications of Evolutionary Computation. – Springer, 2010. – P. 100-110.
17. *Пишихов В.Х., Шевченко В.А., Медведев М.Ю., & Гуренко Б.В.* Управление распределенными системами подводной робототехники с использованием адаптивной эталонной модели // Инженерный вестник Дона. – 2017. – Т. 45 (2 (45)). – С. 27.
18. *Пишихов В.Х., Чернухин Ю.В., Федотов А.А., Гузик В.Ф., Медведев М.Ю., Гуренко Б.В., Пьявченко А.О., Сапрыкин Р.В., Переверзев В.А., & Приемко А.А.* Разработка интеллектуальной системы управления автономного подводного аппарата // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 3 (152). – С. 87-101.
19. *Пишихов В.Х., Медведев М.Ю., Гуренко Б.В.* Методы автоматического управления морскими подвижными объектами: монография. – Ростов-на-Дону, Таганрог: ЮФУ, 2016. – 264 с.
20. <https://www.designworldonline.com/using-behavior-trees-to-improve-the-modularity-of-auv-control-systems/>.
21. <https://oceanos.ru/news/339>.
22. <https://oceanos.ru/news/361>.
23. *Nishida Y. et al.* Benthos Sampling by Autonomous Underwater Vehicle Equipped a Manipulator with Suction Device // 2019 IEEE Underwater Technology (UT), Kaohsiung, Taiwan. – 2019. – P. 1-4. – Doi: 10.1109/UT.2019.8734330.
24. *Weerakoon, Tharindu & Sonoda [et al.].* Underwater Manipulator for Sampling Mission with AUV in Deep-Sea // The Proceedings of JSME annual Conference on Robotics and Mechatronics (Robomec). – 2017. – P. 1-11.
25. *ai Huang [et al.].* A review on underwater autonomous environmental perception and target grasp, the challenge of robotic organism capture // Ocean Engineering. – 2020. – P. 15-27.
26. *Prats, Mario & Romagós [et al.].* Reconfigurable AUV for intervention missions: A case study on underwater object recovery // Intelligent Service Robotics. – 2015. – P. 19-31.
27. <https://www.who.edu/press-room/news-release/who-underwater-robot-takes-first-known-automated-sample-from-ocean/>.
28. <https://oceanos.ru/news/355>.

REFERENCES

1. *Furuholmen M. [et al.].* Resident Autonomous Underwater Vehicle Systems, A Review of Drivers, Applications, and Integration Options for the Subsea Oil and Gas Market. In Proceedings of the Offshore Mediterranean Conference and Exhibition, 2013, pp. 20-22.
2. *Wrzos-Kaminska M., Pettersen K.Y., Gravdahl J.T.* Path following control for articulated intervention-AUVs using geometric control of reduced attitude, *IFAC-PapersOnLine*, 2019, pp. 192-197.
3. *Dai P., Lu W., Le K., Liu D.* Sliding Mode Impedance Control for contact intervention of an I-AUV: Simulation and experimental validation, *Ocean Engineering*, 2020, Vol. 196, 106855. ISSN 0029-8018. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106855>.
4. *Ridao [et al.].* Intervention AUVs: The next challenge, *Annual Reviews in Control*, 2015.

5. *Zagatti R. [et al.]*. FlatFish Resident AUV: Leading the Autonomy Era for Subsea Oil and Gas Operations, 2018, pp. 35-48.
6. *Fahrni, L [et al.]*. Scope and feasibility of autonomous robotic subseaintervention systems for offshore inspection, maintenance and repair, *In Proceedings of the Proceedings of the 3rd International Conference on Renewable Energies Offshore (RENEW 2018)*, 2018, pp. 85-95.
7. Available at: <https://www.marinetechologynews.com/news/subsea-mining-thing-588211>.
8. *Gaykovich B.A., Zanin V.Yu., Taradonov V.S., Blinkov A.P., Kozhemyakin I.V., Tokarev M.Yu., Biryukov E.A.* Kontseptsiya robotizirovannoy podvodnoy seymorazvedki v podlednykh akvatoriyakh [The concept of robotic underwater seismic exploration in subglacial waters], *Sb. rabot laureatov Mezhdunarodnogo konkursa nauchnykh, nauchno-tekhnicheskikh i innovatsionnykh razrabotok, napravlennykh na razvitiye i osvoeniye Arktiki i kontinental'nogo shel'fa 2018 goda* [A collection of works by laureates of the International competition of scientific, scientific-technical and innovative developments aimed at the development and development of the Arctic and continental shelf in 2018], 2019, pp.-64-87.
9. *Maevskiy A.M., Gaykovich B.A.* Razrabotka gibridnykh avtonomnykh neobitaemykh apparatov dlya issledovaniya mestorozhdeniy uglevodorodov [Development of hybrid Autonomous uninhabited vehicles for the study of hydrocarbon deposits], *Nauchno-tekhnicheskii sbornik vesti gazovoy nauki* [Scientific and technical collection of gas science news], 2019, No. 2 (39), pp. 29-40.
10. *Zanin V.Yu., Maevskiy A.M. i dr.* Razrabotka elementov podvodnykh robototekhnicheskikh rezidentnykh sistem na primere otechestvennogo avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata interventsionnogo klassa i soputstvuyushchikh tekhnologiy [Development of elements of underwater robotic resident systems on the example of a domestic Autonomous uninhabited underwater vehicle of intervention class and related technologies], *Sb. rabot laureatov Mezhdunarodnogo konkursa nauchnykh, nauchno-tekhnicheskikh i innovatsionnykh razrabotok, napravlennykh na razvitiye i osvoeniye Arktiki i kontinental'nogo shel'fa 2019 goda* [A collection of works by laureates of the International competition of scientific, scientific-technical and innovative developments aimed at the development and development of the Arctic and continental shelf in 2019], 2019, pp. 14-22.
11. *Maevskiy A.M., Gaykovich B.A.* Razrabotka legkogo interventsionnogo avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata v tselyakh ispol'zovaniya v podvodnykh rezidentnykh sistemakh [Development of a light intervention Autonomous uninhabited underwater vehicle for use in underwater resident systems], *Mater. XIV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii i X molodezhnoy shkoly-seminara «Upravlenie i obrabotka informatsii v tekhnicheskikh sistemakh»* [Materials of the XIV all-Russian scientific and practical conference and X youth school-seminar "Management and processing of information in technical systems"]. Rostov-om-Don; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2019, pp. 83-98.
12. *Inzartsev A.V., Pavin A.M., Bagnitskiy A.V.* Planirovaniye i osushchestvleniye deystviy obsledovatel'skogo podvodnogo robota na baze povedencheskikh metodov [Planning and implementation of actions of the survey underwater robot based on behavioral methods], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater research and robotics], 2013, No. 1 (15), pp. 4-16.
13. *Inzartsev A.V.* Metody formirovaniya povedeniya i proektirovaniya programmogo obespecheniya obsledovatel'skogo avtonomnogo podvodnogo robota: dis. ... d-ra tekhn. nauk [Methods of behavior formation and software design of the survey Autonomous underwater robot: cand. of eng. sc. diss.]. Moscow, 2012, 297 p.
14. *Marzinotto A., Colledanchise M., Smith C., Gren P.* Towards a unified behavior trees framework for robot control, *In: 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 5420-5427.
15. *Palma R. [et al.]*. Extending Case-Based Planning with Behavior Trees, *in FLAIRS Conference*. AAAI Press, 2011, pp. 65-79.
16. *Lim C.-U., Baumgarten R., and Colton S.* Evolving Behaviour Trees for the Commercial Game DEFCON, *in Applications of Evolutionary Computation*. Springer, 2010, pp. 100-110.
17. *Pshikhopov V.Kh., Shevchenko V.A., Medvedev M.Yu., & Gurenko B.V.* Upravleniye raspredelennymi sistemami podvodnoy robototekhniki s ispol'zovaniem adaptivnoy etalonnoy modeli [Management of distributed systems of underwater robotics using an adaptive reference model], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Don's engineering Bulletin], 2017, Vol. 45 (2 (45)), pp. 27.

18. Pshikhopov V.Kh., Chernukhin Yu.V., Fedotov A.A., Guzik V.F., Medvedev M.Yu., Gurenko B.V., Pyavchenko A.O., Saprykin R.V., Pereverzev V.A., & Priemko A.A. Razrabotka intellektual'noy sistemy upravleniya avtonomnogo podvodnogo apparata [Development of an intelligent control system for an Autonomous underwater vehicle], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 3 (152), pp. 87-101.
19. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gurenko B.V. Metody avtomaticheskogo upravleniya morskimi podvizhnymi ob"ektami: monografiya [Methods of automatic control of marine mobile objects: monograph]. Rostov-on-Don, Taganrog: YuFU, 2016, 264 p.
20. Available at: <https://www.designworldonline.com/using-behavior-trees-to-improve-the-modularity-of-auv-control-systems/>.
21. Available at: <https://oceanos.ru/news/339>.
22. Available at: <https://oceanos.ru/news/361>.
23. Nishida Y. et al. Benthos Sampling by Autonomous Underwater Vehicle Equipped a Manipulator with Suction Device, *2019 IEEE Underwater Technology (UT), Kaohsiung, Taiwan*, 2019, pp. 1-4. Doi: 10.1109/UT.2019.8734330.
24. Weerakoon, Tharindu & Sonoda [et al.]. Underwater Manipulator for Sampling Mission with AUV in Deep-Sea, *The Proceedings of JSME annual Conference on Robotics and Mechatronics (Robomec)*, 2017, pp. 1-11.
25. ai Huang [et al.]. A review on underwater autonomous environmental perception and target grasp, the challenge of robotic organism capture, *Ocean Engineering*, 2020, pp. 15-27.
26. Prats, Mario & Romagós [et al.]. Reconfigurable AUV for intervention missions: A case study on underwater object recovery, *Intelligent Service Robotics*, 2015, pp. 19-31.
27. Available at: <https://www.whoi.edu/press-room/news-release/whoi-underwater-robot-takes-first-known-automated-sample-from-ocean/>.
28. Available at: <https://oceanos.ru/news/355>.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. А.В. Шипатов.

Занин Владислав Юрьевич – Акционерное общество «Научно-Производственное Предприятие Подводных Технологий «Океанос»; e-mail: mfutkflot@gmail.com; 194295, Санкт-Петербург, а/я 21; тел.: +79219666956; советник Генерального директора.

Маевский Андрей Михайлович – e-mail: maevskiy_andrey@mail.ru; тел.: +79817869879; младший научный сотрудник; аспирант ЮФУ.

Кожемякин Игорь Владиленович – Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; e-mail: 1861vp@mail.ru; 190121, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., 3; тел.: +78127146822; начальник Управления оборонных исследований и разработок.

Zanin Vladislav Urievich – JSC “Oceanos”; e-mail: mfutkflot@gmail.com; Saint Petersburg, 194295, post office box 21, Russia; phone: +79219666956; Advisor to the General Director.

Maevskiy Andrey Michailovich – e-mail: maevskiy_andrey@mail.ru; phone: +79817869879; Junior Researcher; SFedU – Graduate student.

Kozhemyakin Igor Vladilenovich – St. Petersburg State Marine Technical University; e-mail: 1861vp@mail.ru; 3, Lotsmanskaya street, Saint Petersburg, 190121, Russia; phone: +78127146822; head of defense research and development.

Г.В. Горелова

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В СЛОЖНЫХ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ*

Рассмотрены особенности организационно-технических систем (СОТС), относящихся к классу сложных. К СОТС могут быть отнесены робототехнические комплексы, автоматизированные производства, радиоэлектронные системы и устройства, служащие для передачи и преобразования информации и др. В современном понимании СОТС являются информационно-техническими системами и в настоящее время уже не являются только техническими объектами, их можно классифицировать также как киберфизические системы (СФС). Эффективность СОТС определяется многими критериями, которые должны изменяться по содержанию и времени в зависимости от целей, этапа существования СОТС, влияния внутренней и внешней среды. Это определяет специфику процессов принятия управленческих решений в них, требующую проведения предварительного имитационного моделирования, особенно на этапах проектирования этих систем. Дана в общем виде постановка задачи имитационного моделирования, базирующаяся на объединении трех подходов к решению: когнитивного, многокритериального и многоэтапного, вероятностной неопределенности. Предложены модели многоэтапного процесса принятия решений, вероятностной модели задачи оптимума номинала и когнитивного моделирования сложных систем, которые объединены в единый комплекс. Приведен демонстрационный пример, состоящий из разработки когнитивной карты условной СОТС, функционирующей при наличии угроз внешней среды, моделирования сценариев функционирования на когнитивной карте при гипотетических изменениях управляющих и возмущающих воздействий на систему. Показано, что на определенных этапах принятия решений при вариациях критериальных оценок и управляющих воздействий возможно подавление угроз, возникающих перед системой, а также повышение ее эффективности. Имитационное моделирование производилось с помощью авторской программной системы СМЛС. Разрабатываемые математическое и программное обеспечение предназначены для интеллектуальных систем управления рациональным поведением сложных объектов.

Сложная организационная техническая система; вероятностная неопределенность; когнитивное моделирование; задача принятия решений; многокритериальность.

G.V. Gorelova

STATEMENT THE PROBLEM OF SIMULATION OF DECISION-MAKING PROCESSES IN COMPLEX ORGANIZATIONAL-TECHNICAL SYSTEMS

The article considers the features of organizational - technical systems (SOTS), belonging to the class of complex. SOTS may include robotic complexes, automated production, electronic systems and devices used to transmit and convert information, etc. In the modern sense, SOTS are information and technical systems and are currently not only technical objects, they can also be classified as cyberphysical systems (CPS). The effectiveness of SOTS can be determined by many criteria, which should vary in content and time depending on the goals, stage of the existence of SOTS, the influence of internal and external environment. This determines the specificity of managerial decision-making processes in them, requiring preliminary simulation modeling, especially at the design stages of these systems. The general formulation of the simulation problem is given, based on the combination of three approaches to the solution: cognitive, multi-criteria and multi-stage, probabilistic uncertainty. Which are combined into a single complex. Models of a multi-stage decision-making process, a probabilistic model problem of the nominal optimum and cognitive modeling of complex systems are proposed. A demo example is presented, consisting of the development of a cognitive map of conditional SOTS, functioning in the presence of threats, mod-

* Исследование выполнено при поддержке проекта РФФИ № 18-05-80092.

eling of functioning scenarios on a cognitive map with hypothetical changes in control and disturbing influences on the system. It is shown that at certain stages of decision-making with variations of criteria-based assessments and control actions, it is possible to suppress threats to the system, as well as increase its effectiveness. Simulation was performed using the author's software system CMLS. The developed mathematical and software are designed for intelligent control systems for the rational behavior of complex objects.

Complex organizational-technical system; probabilistic uncertainty; cognitive modeling; decision making task; multi-criteria.

Введение. Сложные технические системы (СТС) всё более определяют существование современной цивилизации. К СТС относятся автоматизированные производства, радиоэлектронные системы устройства, служащие для передачи и преобразования информации, робототехнические комплексы – список современных СТС обширен. В теоретическом плане будем традиционно понимать СТС как систему, обладающую следующими основными признаками сложной системы [1, 2]: единства цели, целостности, эмергентности, иерархичности, реализуемости, сложности (структурной, динамической, вычислительной) функционирования из-за необходимости выполнения большого количества разнообразных функций большим количеством элементов и блоков системы; при этом изменение одной переменной влечет за собой изменение многих переменных, чаще всего нелинейным образом. Существенным признаком современной сложной технической системы является также ее способность осуществлять выработку решений и выбор из них лучшего из многих согласно заранее выработанным критериям. Автоматизация таких процессов принятия решений может реализовываться в интеллектуальных системах поддержки принятия решений (ИСППР), если среди решающих элементов сложной технической системы присутствует «руководитель» – лицо, оценивающее и принимающее на ряде этапов и иерархических уровнях СТС окончательное решение. В этом случае СТС может пониматься как сложная организационно-техническая система (СОТС), в которой ЛПР отражают конкретную реализацию принципа единоначалия и единства целей в СОТС, организуют систему в соответствии с целями и задачами, иницируя процессы управления. СОТС работает в широком диапазоне условий эксплуатации и при различных режимах, что обуславливает возможное неполное соответствие её структуры изменяющимся во времени целям системы, поэтому она должна обладать свойствами изменчивости во времени собственной структуры и выполняемых функций, учитывать возможность изменений вектора целей системы. В современном понимании СОТС являются информационно-техническими системами и в настоящее время уже не являются только техническими объектами, их можно классифицировать также как киберфизические системы (англ. cyber-physical system – CPS) [3, 4]. Используем различные элементы из существующих определений CPS, которыми обозначены важные для дальнейшего изложения признаки, и определим киберфизические системы как комплексные системы, состоящие из различных природных объектов, искусственных подсистем и управляющих контроллеров, позволяющих представить такое образование как единое целое; в CPS обеспечивается тесная связь и координация между вычислительными и физическими ресурсами, компьютеры осуществляют мониторинг и оптимизацию управления физическими процессами с использованием такой петли обратной связи, в которой происходящее в физических системах и окружающей среде оказывает влияние на вычисления и наоборот.

Постановка задачи имитационного моделирования процессов принятия решений. Проектирование, эксплуатация, функционирование сложной технической системы ставят множество актуальных задач перед лицом, принимающим решения на всех этапах создания и существования СОТС. Эффективное их решение может определяться критериями, которые, полагаем, должны изменяться по содержанию и времени в зависимости от целей, этапа существования СОТС, влияния внутренней и внешней среды.

Рассматривая СОТС с вышеизложенных позиций, определим процессы принятия решений в них как многокритериальные [5–10] и многоэтапные процессы (рис. 1).

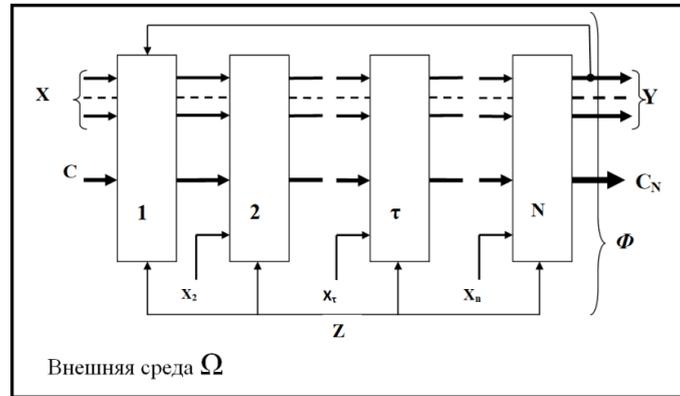


Рис. 1. Многоэтапный процесс принятия решений

На рис. 1:

X, Z, C – входные параметры; $X = \{X_\tau\}$, $X_\tau = \{x_i\}_\tau$, – контролируемые, управляемые переменные, $i=1,2,..n$; $Z = \{Z_\tau\}$, $\{Z_\tau\} = \{z_k\}_\tau$, $k=1,2,..K$ – контролируемые, неуправляемые переменные (возмущающие воздействия) внешней среды Ω ; $C = \{C_\tau\}$ – «полезность», «цена» результатов функционирования СОТС; $\tau = 1,2,..N$ – этапы процесса принятия решений.

Y, C_Y, Φ – выходные параметры; $Y = \{Y_\tau\}$, $Y = \{y_j\}_\tau$, $j = 1,2,..m$ – «показатели», «индикаторы», «критерии», «результаты» функционирования СОТС; C_Y – полезность результатов Y .

$\Phi = \{\Phi_\tau\}$ – функция эффективности, обобщающий показатель результатов функционирования СОТС, целевая функция для решения многокритериальной многоэтапной задачи принятия решений в процессе функционирования СОТС. В зависимости от ситуаций функционирования СОТС и ее конечного назначения, целевая функция может видоизменяться во времени, т.е. теоретически Φ можно рассматривать как $\Phi = \Phi(t)$. В зависимости от назначения и особенностей СОТС функция эффективности может быть как аддитивной, так и не аддитивной, последнее можно также считать признаком сложной системы при ее моделировании.

Представим функцию эффективности в следующем обобщенном виде, определяющем тип задачи принятия решений при ее конкретизации:

$$\Phi = \sum_{\tau=1}^N \Phi_\tau \text{ или } \Phi = \prod_{\tau=1}^N \Phi_\tau; \text{ или } \Phi(t) = \sum_{\tau=1}^N \Phi_\tau(t) \text{ или } \Phi(t) = \prod_{\tau=1}^N \Phi_\tau(t), \quad (1)$$

где $\Phi_\tau = F(C, X, Z, Y)_\tau$ или $\Phi_\tau = F(C, X, Y)_\tau | Z_\tau$

На функцию эффективности могут быть наложены ограничения (на взаимосвязь переменных, на их допустимую величину). Например, модель может иметь вид

$$\begin{aligned} \Phi &= \sum_{\tau=1}^N \Phi_\tau; & \Phi &= \sum_{\tau=1}^N F(C, X, Z, Y)_\tau \\ \sum_{i=1}^n a_i x_i &\leq b_i | \tau & & \\ X &\in X_{\text{дон}}; & Z &\in Z_{\text{дон}}; & Y &\in Y_{\text{дон}} \end{aligned} \quad (2)$$

В настоящее время существует большое количество подходов, моделей, методов, правил в задачах принятия решений.

Представим обобщенный вид многокритериальной модели задачи принятия решений (ЗПР) в следующем виде

$$ЗПР = \langle \Phi, A, P, ПП, S, \Phi^o \rangle \quad (3)$$

Φ – тип многокритериальной задачи, A – множество решений (альтернатив), P – система предпочтений ЛПП, $ПП$ – правила выбора решений; S – ситуации принятия решений, Φ^o – окончательное решение (наилучшее, «оптимальное»). Учитывая символику выражений (1) и (2), запишем:

$$ЗПР = \left\langle \sum_{\tau=1}^N F(C, X, Z, Y)_{\tau}, A, P, ПП, S, \sum_{\tau=1}^N F(X^o, Z, Y^o)_{\tau} \right\rangle. \quad (4)$$

Конкретное содержание и математический вид моделей (1)–(4) определяются предметной областью СОТС, соответствующей информационной базой (видом неопределенности – детерминированные, вероятностные, нечеткие задачи) и тем типом проблем (структурированные, слабоструктурированные, неструктурированные), которые характерны для конкретной СОТС при ее проектировании и функционировании.

В случае детерминированных задач (3) их решение (ПР) может быть найдено методами многоцелевого математического программирования (поиск экстремума функции), но для этого необходимо, чтобы и целевая функция, и ограничения на нее имели численное выражение и были известны заранее, что на практике часто нарушается. Для организационных СТС ЗПР может формулироваться как задача в условиях вероятностной неопределенности. В качестве целевой функции такой задачи может быть использована многомерная, дискретная по цене, обобщенная функция эффективности оптимума номинала φ , зависящая от времени t [11–16] – модель (5).

В модели (5) символы X, Y, Z, C, t имеют тот же смысл, что и в выражениях (1), (2). В данном случае альтернативы определяются наборами X ; $\vec{M}_{ht} = \eta(X, t)|_Z$ – моменты плотности распределения $f(Y)$; P_{YS} – вероятности попадания Y в области S пространства многомерного распределения:

$$\begin{aligned} P_{YS} &= \iint_{YS} \dots \int f(Y, \vec{M}_{ht})|_Z dY \\ \varphi_{\tau}(C, \vec{M}_h, X, Y, Z, t); C_{\tau}(X, Y, \vec{M}_{ht}); C &= \{c_s\}; s = 1, 2, \dots, n \\ X_{\tau} &= \{x_{s\tau}\}; Y = \{y_s\}; \vec{M}_{h\tau} = \{M_{h\tau}\}; \\ \varphi_{\tau}(C, \vec{M}_h, X, Y, Z, t) &= \sum_{s=1}^n c_s \iint_{YS} \dots \int f(Y, \vec{M}_{ht})|_Z dY \quad (5) \\ \begin{cases} \vec{M}_{ht} = \eta(X, t)|_Z, h = 1, 2, 3, 4 \\ X \in X_{don}, Y \in Y_{don} \end{cases} \end{aligned}$$

Для многоэтапной модели функция эффективности имеет вид

$$\Phi = \sum_{\tau=1}^N \varphi_{\tau}. \quad (6)$$

Как отмечалось, правила выбора решения, также как и модель функции эффективности, должны изменяться в зависимости от этапа исследования. Т.е. необходимо формализовать многоэтапный процесс принятия решений, учитывая, что он разворачивается на объекте (ОСТС), имеющем определенную структуру, функционирующую

в определенных условиях и при определенных управляющих и возмущающих воздействиях. Для этого предлагается представлять ОСТС в определенной внешней среде Ω в виде когнитивной карты, а результаты принятия решений на разных этапах τ представлять сценариями развития ситуаций на когнитивной модели. Воспользуемся в этих целях инструментарием когнитивного моделирования сложных систем [17–24], первым этапом которого является разработка модели сложной системы в виде когнитивной карты или более сложной когнитивной модели.

Как известно [17, 18, 22], когнитивная карта – это знаковый ориентированный граф

$$G = \langle V, E \rangle \quad (7)$$

в котором V – концепты, конечное множество вершин когнитивной карты G , $V_i \in V$, $i = 1, 2, \dots, k$, $E = \{e_{ij}\}$ – множество дуг e_{ij} графа, $i, j = 1, 2, \dots, m$.

Дальнейшие исследования сложной системы могут потребовать построения более сложной математически когнитивной модели, например, в виде параметрического векторного функционального графа

$$\Phi_{\Pi} = \langle \langle V, E \rangle, X, F, \theta \rangle, \quad (8)$$

где $G = \langle V, E \rangle$ – когнитивная карта, X – множество параметров вершин V ; $F = F(X, E) = f(x_i, x_j, e_{ij})$ – функциональные связи между вершинами, которые могут быть заданы функциями f_{ij} или весовыми коэффициентами w_{ij} ; θ – пространство параметров вершин. Если для построения когнитивной модели используются статистические данные или отношения между вершинами определены функциями, то векторный функциональный граф будет содержать «вероятностные» блоки и функциональные блоки, в том числе – динамические.

После разработки когнитивной модели производится анализ ее структурных свойств, устойчивости и ряда других особенностей, позволяющих судить о непротиворечии модели реальности, а также производится сценарное моделирование возможного развития ситуаций в системе [19, 23] с оценкой эффективности результатов для обоснования и выбора управленческих решений. Когнитивное моделирование сложных систем поддерживается авторской программной системой CMLS (Cognitive Modeling Large Systems) [23].

Проиллюстрируем постановку задачи на абстрактном простом вычислительном примере когнитивного моделирования.

Демонстрационный пример. Пусть СОТС состоит из четырех (в реальных системах их существенно больше) взаимодействующих объектов (вершины V_1, V_2, V_3, V_4), СОТС = {Объект №1, Объект №2, Объект №3, Объект №4}, целью (V_9) которой является эффективное противостояние возможным угрозам (V_5). Успешность действий каждого объекта оценивается несколькими критериями ($V_{10}, V_{11}, V_{12}, V_{13}$), свертка которых (V_6) определяет эффективность всей операции, в которой ЛПП (V_7) принимает решения, имея некоторые ресурсы (V_8) на их реализацию. На свертку критериев (функцию эффективности, как меру достижения цели) наложены ограничения (V_{14}, V_{15}). Соответствующая этим сведениям когнитивная карта G изображена на рис. 2.

На рис. 2 сплошными линиями изображены положительные дуги (увеличение/уменьшение сигнала в вершине V_i приводит к увеличению/уменьшению сигнала в V_j), пунктирными – отрицательные (увеличение/уменьшение сигнала в вершине V_i приводит к уменьшению/увеличению сигнала в V_j). Когнитивная карта G построена с помощью CMLS.

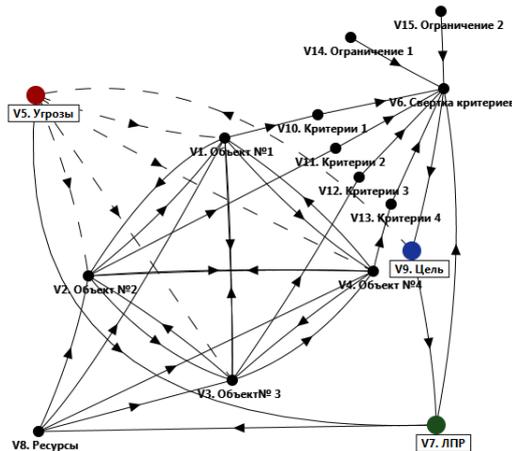


Рис. 2. Когнитивная карта G

Проведенное исследование когнитивной карты G включало анализ свойств графа, анализ его путей и циклов, анализ устойчивости, топологический анализ.

На рис. 3 изображены отрицательный цикл (стабилизирующий, нечетное число отрицательных дуг) и положительный цикл (акселератор процессов, четное число отрицательных дуг или их отсутствие) когнитивной карты. Всего циклов 214. Нечетное число (65) отрицательных циклов свидетельствует о структурной устойчивости системы [20–23].

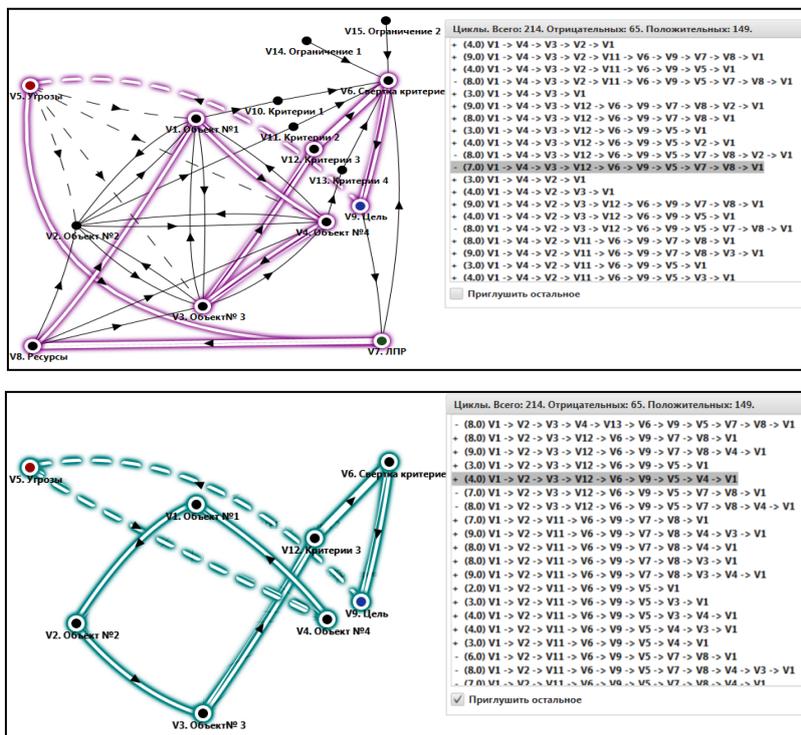


Рис. 3. Выделение циклов когнитивной карты G: один из 149 положительных циклов и один из 65 отрицательных

Исследование устойчивости когнитивной карты к возмущениям показал ее неустойчивость в этом смысле, поскольку максимальное по модулю число матрицы смежности когнитивной карты $|M| = 3,05 > 1$, то система G не устойчива к возмущениям [22].

Анализ циклов когнитивной карты (также, как и путей) позволяет проверить логическую непротиворечивость причинно-следственных связей, образующих цикл (или путь из вершины в вершину).

После анализа свойств когнитивной карты наступает следующий этап – сценарный анализ, проводимый методом импульсного моделирования возможных процессов развития ситуаций при воздействии на систему управляющих или возмущающих сигналов [19]. В табл. 1 и на рис. 4, 5 изображены результаты импульсного моделирования по двум сценариям.

Сценарий №1. Предположим, что возникают угрозы для СОТС, что имитируется внесением возмущающего импульса в вершину V_5 .

В табл. 1 приведены результаты вычислений с помощью CMLS значений импульсов в вершинах когнитивной карты. На рис. 4 изображена часть графиков импульсных процессов и гистограмма результатов на 6 шагах моделирования, построенных по данным табл. 1.

Как видно по расчетам, возникновение угроз может крайне негативно сказаться на системе – по всем критериям наблюдается ухудшение тенденций развития системы. Начиная с третьего и четвертого шагов моделирования, возникает серьезное падение эффективности системы и значение эффективности (свертка критериев, вершина V_6) существенно превышает допустимое по Ограничению 2 (вершина V_{15}) значение. Т.е. если на первых этапах принятия решений (1-й, 2-й, 3-й шаг моделирования) не предпринимать никаких действий, то в таких условиях СОТС может не выполнить свои функции.

Таблица 1

Результаты импульсного моделирования по Сценарию №1

Шаг Вершина	0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
V1. Объект №1	0.0	0.0	-1.0	-4.0	-12.0	-36.0	-107.0	-323.0	-988.0	-3022.0	-9244.0
V2. Объект №2	0.0	0.0	-1.0	-4.0	-12.0	-36.0	-107.0	-323.0	-988.0	-3022.0	-9244.0
V3. Объект №3	0.0	0.0	-1.0	-4.0	-12.0	-36.0	-107.0	-323.0	-988.0	-3022.0	-9244.0
V4. Объект №4	0.0	0.0	-1.0	-4.0	-12.0	-36.0	-107.0	-323.0	-988.0	-3022.0	-9244.0
V5. Угрозы	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	4.0	16.0	47.0	148.0	440.0
V6. Свертка критериев	0.0	0.0	0.0	1.0	-3.0	-15.0	-46.0	-147.0	-439.0	-1322.0	-4052.0
V7. ЛПР	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	2.0	-3.0	-11.0	-30.0	-100.0	-291.0
V8. Ресурсы	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	2.0	-3.0	-11.0	-30.0	-100.0
V9. Цель	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	-3.0	-15.0	-46.0	-147.0	-439.0	-1322.0
V10. Критерии 1	0.0	0.0	0.0	-1.0	-4.0	-12.0	-36.0	-107.0	-323.0	-988.0	-3022.0
V11. Критерии 2	0.0	0.0	0.0	-1.0	-4.0	-12.0	-36.0	-107.0	-323.0	-988.0	-3022.0
V12. Критерии 3	0.0	0.0	0.0	-1.0	-4.0	-12.0	-36.0	-107.0	-323.0	-988.0	-3022.0
V13. Критерии 4	0.0	0.0	0.0	-1.0	-4.0	-12.0	-36.0	-107.0	-323.0	-988.0	-3022.0
V14. Ограничение 1	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
V15. Ограничение 2	0.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0

Сценарий №2. Пусть ЛПР после анализа начала развития ситуаций задействует свои ресурсы и на 4-м шаге моделирования внесет управляющее воздействие в вершину V_8 (Ресурсы). Т.е. инициируем в когнитивной карте две вершины, сначала V_5 , потом на 4 шаге – V_8 . Часть результатов импульсного моделирования изображена на рис. 5. Угрозы могут быть подавлены.

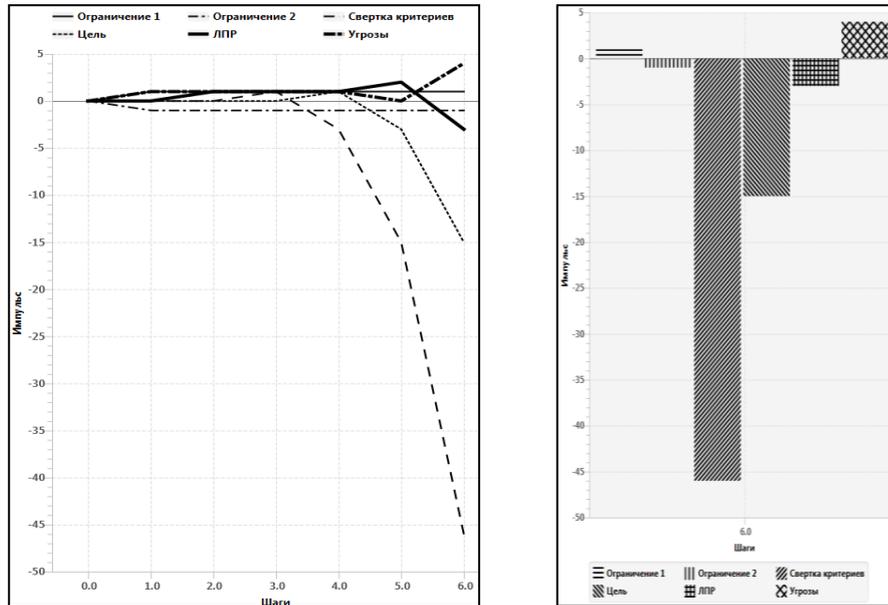


Рис. 4. Графики импульсных процессов в 6 вершинах, сценарий №1

В работах [14–16] представлен ряд результатов использования функции эффективности оптимума номинала в вариантах модели (5) в когнитивном моделировании сложных систем.

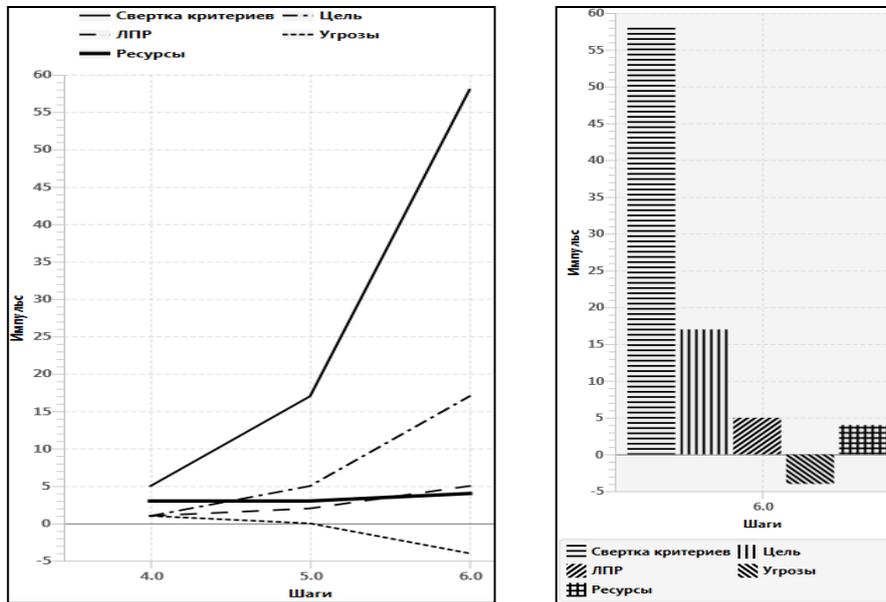


Рис. 5. Графики импульсных процессов в 6 вершинах, сценарий №2

Заключение. Процессы принятия решений в сложных организационных технических системах являются многоэтапными и многокритериальными. Для того, чтобы они были эффективными, необходимо использовать методы имитационного модели-

рования в целях предварительной разработки обоснованных управленческих решений и их оценки в условиях возможных изменений ситуаций внешней и внутренней среды ОСТС. В статье изложена в общем виде постановка задачи имитационного процесса принятия решений, в которой объединены три подхода: когнитивный, многокритериальный и вероятностной неопределенности. Упрощенный демонстрационный пример показывает возможность решения задачи в такой постановке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Волкова В.Н., Денисов А.А. Основы теории систем и системного анализа: учебник. – СПб.: СПбГПУ, 2005. – 520 с.
2. Волкова В.Н. Эмерджентность, синергия или конвергенция? // Системный анализ в проектировании и управлении: Сб. научных трудов XXI Международной научно-практической конференции. – 2016. – С. 149-160.
3. Lee E.A. The Past, Present and Future of Cyber-Physical Systems: A Focus on Models. – URL: <https://citeweb.info/20150013436>.
4. Zhuge H. Cyber Physical Society, the 1st Workshop on Cyber Physical Society // in conjunction with the 6th International Conference on Semantics, Knowledge and Grids, Ningbo, China, 2010.
5. Андрейчиков А.В., Андрейчикова О.Н. Системный анализ стратегических решений в инноватике. Математические, эвристические и интеллектуальные методы системного анализа и синтеза инноваций. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. – 304 с.
6. Кини Р.П., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения. – М.: Радио и связь, 1981. – 560 с.
7. Лотов А.В., Поспелова И.И. Многокритериальные задачи принятия решений. Метод достижимых целей. – М.: МАКС Пресс, 2008. – 197 с.
8. Orlov A.I. Teoriya prinyatiya resheniy: uchebnik. – Moscow: Exam, 2006. – 573 p.
9. Семенов С.С., Полтавский А.В., Маклаков А.В., Крянев А.В. Обзор методов принятия решений при разработке сложных технических систем // Функциональная надежность: теория и практика. – С. 72-84.
10. Трахтенгерц Э.А. Компьютерная поддержка принятия решений: Научно-практическое издание. Серия “Информатизация России на пороге XXI века”. – М.: СИНТЕГ, 1998. – 376 с.
11. Svecharnik D.V. The problem of the optimum of the nominal // Proceedings of the Institute of mechanical engineering. – 1957. – No. 10. – P. 78-94.
12. Gorelova G.V., Zdor V.V., Svecharnik D.V. The method of optimum value and its application. – Moscow: Energy, 1970. – 200 p.
13. Gorelova G.V., Verba V.A. Decision making on cognitive models of complex systems // Proceedings International Scientific and Technical Conference "Intellectual and Multiprocessor Systems (IMS'2005)". – 2005. – Vol. 2. – P. 295-300.
14. Gorelova G.V., Buyanov B.S., Verba V.A. Formalization of probabilistic decision-making problems in intelligent systems based on a cognitive approach // *Iskusstvennyy intellekt – Artificial Intelligence*. – 2007. – P. 147-158.
15. Gorelova G.V. Decision adapted system for information network control // G-11A-Symposium, Bochum, DDR, 1996. – P. 121-126.
16. Горелова Г.В. Модели принятия решений при проектировании и управлении объектами в условиях вероятностной неопределенности / Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 1 (203). – С. 177-188.
17. Avdeeva Zinaida K., Kovriga Svetlana V. On Governance Decision Support in the Area of Political Stability Using Cognitive Maps // 18 th IFAC Conference on Technology, Culture and International Stability (TECIS2018) IFAC Papers OnLine 51-30. – 2018. – P. 498-503.
18. Abramova N., Portsev R. Reflexive Approach to Multi-Subject Situations in Cognitive Mapping // 18 th IFAC Conference on Technology, Culture and International Stability (TECIS2018) IFAC Papers OnLine 51-30. – 2018. – P. 516-521.
19. Кульба В.В., Кононов Д.А., Ковалевский С.С., Косяченко С.А., Нижегородцев Р.М., Чернов И.В. Сценарный анализ динамики поведения социально-экономических систем: научное издание. – М.: ИПУ РАН, 2002. – 122 с.

20. Gorelova G.V., Pankratova N.D. Scientific Foresight and Cognitive Modeling of Socio-Economic Systems // 18 th IFAC Conference on Technology, Culture and International Stability. (TECIS2018) IFAC Papers OnLine 51-30. – 2018. – P. 145-149.
21. Gorelova G.V., Pankratova N.D. Strategy of complex systems development based on the synthesis of foresight and cognitive modelling methodologies // Proceedings. IEEE 1st International Conference on System Analysis and Intelligent Computing. SAIC 2018.
22. Инновационное развитие социо-экономических систем на основе методологий предвидения и когнитивного моделирования: коллективная монография / под ред. Гореловой Г.В., Панкратовой Н.Д. – Киев: Изд-во «Наукова Думка», 2015. – 464 с.
23. Программа для когнитивного моделирования и анализа социально-экономических систем регионального уровня. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2018661506 от 07.09.2018.

REFERENCES

1. Volkova V.N., Denisov A.A. Osnovy teorii sistem i sistemnogo analiza: uchebnik [Fundamentals of systems theory and systems analysis: textbook]. Saint Petersburg: SPbGPU, 2005, 520 p.
2. Volkova V.N. Emerzhentnost', sinerгиya ili konvergentsiya? [Emergence, synergy or convergence?], Sistemnyy analiz v proektirovanii i upravlenii: Sb. nauchnykh trudov XXI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [System analysis in design and management: a collection of scientific papers of the XXI International scientific and practical conference], 2016, pp. 149-160.
3. Lee E.A. The Past, Present and Future of Cyber-Physical Systems: A Focus on Models. Available at: <https://citeweb.info/20150013436>.
4. Zhuge H. Cyber Physical Society," the 1st Workshop on Cyber Physical Society, in conjunction with the 6th International Conference on Semantics, Knowledge and Grids, Ningbo, China, 2010.
5. Andreychikov A.V., Andreychikova O.N. Sistemnyy analiz strategicheskikh resheniy v innovatike. Matematicheskie, evristicheskie i intellektual'nye metody sistemnogo analiza i sinteza innovatsiy [System analysis of strategic decisions in innovation. Mathematical, heuristic and intellectual methods of system analysis and synthesis of innovations]. Moscow: Knizhnyy dom «LIBROKOM», 2013, 304 p.
6. Kini R.P., Rayfa Kh. Prinyaie resheniy pri mnogikh kriteriyakh: predpochteniya i zameshcheniya [Decision making under many criteria: preferences and substitutions]. Moscow: Radio i svyaz', 1981, 560 p.
7. Lotov A.V., Pospelova I.I. Mnogokriterial'nye zadachi prinyatiya resheniy. Metod dostizhimykh tseley [Multi-criteria decision making tasks. Achievable Goals Method]. Moscow: MAKS Press, 2008, 197 p.
8. Orlov A.I. Teoriya prinyatiya resheniy: uchebник. Moscow: Exam, 2006, 573 p.
9. Semenov S.S., Poltavskiy A.V., Maklakov A.V., Kryanev A.V. Obzor metodov prinyatiya resheniy pri razrabotke slozhnykh tekhnicheskikh sistem [Overview of decision-making methods in the development of complex technical systems], *Funktsional'naya nadezhnost': teoriya i praktika* [Functional reliability: theory and practice], pp. 72-84.
10. Trakhtengerts E.A. Komp'yuternaya podderzhka prinyatiya resheniy: Nauchno-prakticheskoe izdanie. Seriya "Informatizatsiya Rossii na poroge XXI veka" [Computer decision support: Scientific and practical publication. Series "Informatization of Russia on the threshold of the 21st century"]. Moscow: SINTEG, 1998, 376 p.
11. Svecharnik D.V. The problem of the optimum of the nominal, *Proceedings of the Institute of mechanical engineering* 1957, No. 10, pp. 78-94.
12. Gorelova G.V., 3dor V.V., Svecharnik D.V. The method of optimum value and its application. Moscow: Energy, 1970, 200 p.
13. Gorelova G.V., Verba V.A. Decision making on cognitive models of complex systems, *Proceedings International Scientific and Technical Conference "Intellectual and Multiprocessor Systems (IMS'2005)*, 2005, Vol. 2, pp. 295-300.
14. Gorelova G.V., Buyanov B.S., Verba V.A. Formalization of probabilistic decision-making problems in intelligent systems based on a cognitive approach, *Iskusstvennyy intellekt – Artificial Intelligence*, 2007, pp. 147-158.

15. Gorelova G.V. Decision adapted system for information network control, *G-11A-Symposium, Bochum, DDR, 1996*, pp. 121-126.
16. Gorelova G.V. Modeli prinyatiya resheniy pri proektirovani i upravlenii ob'ektami v usloviyakh veroyatnostnoy neopredelennosti [Decision-making models in the design and management of facilities in conditions of probabilistic uncertainty], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 1 (203), pp. 177-188.
17. Avdeeva Zinaida K., Kovriga Svetlana V. On Governance Decision Support in the Area of Political Stability Using Cognitive Maps, *18 th IFAC Conference on Technology, Culture and International Stability (TECIS2018) IFAC Papers OnLine 51-30*, 2018, pp. 498-503.
18. Abramova N., Portsev R. Reflexive Approach to Multi-Subject Situations in Cognitive Mapping, *18 th IFAC Conference on Technology, Culture and International Stability (TECIS2018) IFAC Papers OnLine 51-30*, 2018, pp. 516-521.
19. Kul'ba V.V., Kononov D.A., Kovalevskiy S.S., Kosyachenko S.A., Nizhegorodtsev R.M., Chernov I.V. Stsenarnyy analiz dinamiki povedeniya sotsial'no-ekonomicheskikh sistem: nauchnoe izdanie [Scenario analysis of the dynamics of behavior of socio-economic systems: scientific publication]. Moscow: IPU RAN, 2002, 122 p.
20. Gorelova G.V., Pankratova N.D. Scientific Foresight and Cognitive Modeling of Socio-Economic Systems, *18 th IFAC Conference on Technology, Culture and International Stability. (TECIS2018) IFAC Papers OnLine 51-30*, 2018, pp. 145-149.
21. Gorelova G.V., Pankratova N.D. Strategy of complex systems development based on the synthesis of foresight and cognitive modelling methodologies, *Proceedings. IEEE 1st International Conference on System Analysis and Intelligent Computing. SAIC 2018*.
22. Innovatsionnoe razvitiye sotsio-ekonomicheskikh sistem na osnove metodologiyi predvideniya i kognitivnogo modelirovaniya: kollektivnaya monografiya [Innovative development of socio-economic systems based on foresight and cognitive modeling methodologies: collective monograph], ed. by Gorelovoy G.V., Pankratovoy N.D. Kiev: Izd-vo «Naukova Dumka», 2015, 464 p.
23. Programma dlya kognitivnogo modelirovaniya i analiza sotsial'no-ekonomicheskikh sistem regional'nogo urovnya. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programm dlya EVM № 2018661506 ot 07.09.2018 [A program for cognitive modeling and analysis of socio-economic systems at the regional level. Certificate of state registration of computer programs No. 2018661506 of 09/07/2018].

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.Г. Капустян.

Горелова Галина Викторовна – Южный федеральный университет; e-mail: gorelova-37@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 89281684458; д.т.н.; профессор.

Gorelova Galina Viktorovna – Southern Federal University; e-mail: gorelova-37@mail.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79281684458; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 629.365

DOI 10.18522/2311-3103-2020-1-144-155

В.А. Горелов, И.В. Рубцов, А.А. Стадухин

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДВИЖНОСТИ МОБИЛЬНЫХ РОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Обосновывается необходимость применения имитационного компьютерного моделирования для дальнейшего совершенствования подвижности мобильных робототехнических комплексов. Рассматривается такое направление работ, как исследование шасси с адаптируемой конфигурацией гусеничного обвода с применением программного комплекса автоматизированного анализа динамики систем тел. Данный подход позиционируется как наиболее подходящий для оценки профильной проходимости и выбора потребных характеристик приводов машин с нетрадиционным движителем. Также в статье рассмотрены достижения МГТУ им. Н.Э. Баумана по созданию комплекса натурно-математического

моделирования, предназначенного для исследования динамики мобильных робототехнических комплексов и дистанционно управляемых машин. Комплекс основан на математической модели движения машины, адаптированной для проведения расчетов в режиме «реального времени». В работе приведена краткая характеристика модели и основные дифференциальные уравнения, лежащие в её основе. Помимо это необходимой составляющей комплекса натурно-математического моделирования является программное обеспечение, позволяющее осуществлять синтез трасс по известным заранее заданным статистическими характеристиками. Таким образом, разработанный комплекс натурно-математического моделирования позволяет решать следующий ряд основных задач: исследование быстроходности машин и получение нагрузочных характеристик тягового привода, а также отладка алгоритмов управления и изучение взаимодействия водителя-оператора с машиной и внешней средой в условиях задержки управляющего сигнала и помех. Метод имитационного моделирования также имеет важное применение в области совершенствования моторно-трансмиссионных установок робототехнических комплексов и дистанционно управляемых машин. В связи с тем, что на данный момент наиболее распространённой схемой трансмиссии таких машин является индивидуальный привод ведущих колёс, повышение скоростей движения мобильных роботов требует применения более мощных, а значит более дорогостоящих и тяжёлых электродвигателей. Так, в статье предложен подход, основывающийся на имитационном и натурно-математическом моделировании, который позволяет осуществлять сбор необходимых статистических данных о режимах нагружения машин и определять требуемые характеристики электродвигателей в кратковременном и длительном режимах работы, а также желаемую область с максимальным коэффициентом полезного действия.

Имитационное моделирование; адаптируемое шасси; моделирование в реальном времени; маршруты движения; движение по траектории.

V.A. Gorelov, I.V. Rubtsov, A.A. Stadukhin

MOBILITY ANALYSIS OF ROBOT SYSTEMS BY MEANS OF SIMULATION

The article explains reasons for using computer simulation for mobility enhancement of mobile robot systems. The authors focus on the study of the chassis with adaptable configuration of the tracks with the use of the multi-body dynamics software. This approach is asserted to be the most suitable for assessing the cross-country ability and selection of the required characteristics of the drive of vehicles with unconventional running gear. The article also discusses the driving simulator developed at BMSTU for studying the dynamics of mobile robot systems and remotely controlled vehicles. The simulator is based on a mathematical model of the vehicle motion adapted for performing calculations in real time mode. The paper presents a brief description of the model and its main differential equations. In addition to this, a necessary component of the simulator is the software that provides the synthesis of the driving routes based on the known pre-defined statistical characteristics. Thus, the developed simulator allows solving the following main problems: calculating the attainable speed of vehicles and obtaining the load characteristics of the traction drive, as well as debugging control algorithms and studying the interaction of the driver-operator with the vehicle and the environment in the conditions of control signal delay and interference. The simulation method also has an important application in the field of improving the motor-transmission systems of robot systems and remotely controlled machines. Due to the fact that at the moment the most common transmission layout of such vehicles is an individual drive of the driving wheels, increasing the speed of movement of mobile robots requires the use of more powerful, and therefore more expensive and heavy electric motors. Thus, the article proposes an approach based on simulation and full-scale and mathematical modeling, which allows to collect the necessary statistical data about the loading modes of the vehicles and determine the required characteristics of electric motors in short-term and long-term operation modes, as well as the desired operating range of the maximum efficiency.

Simulation; adaptable chassis; real-time simulation; driving routes; driving along a trajectory.

Введение. Одним из наиболее важных направлений совершенствования наземных мобильных робототехнических комплексов (МРК) является повышение их подвижности. Так, перспективным направлением улучшения проходимости и быстроходных свойств МРК, является применение нетрадиционных типов двигателей (например, адаптируемых шасси), использование силовых установок большей удельной мощности, а также разработка и совершенствование алгоритмов управления движением машин и способов взаимодействия с водителем-оператором. Очевидно, что реализация перечисленных подходов к повышению подвижности рассматриваемого типа робототехнических комплексов невозможна без применения имитационного математического моделирования.

Так, например, в ряде случаев для улучшения профильной проходимости МРК применяются технические решения, основанные на адаптивно изменяемой геометрии гусеничного обвода [1]. Использование классических зависимостей теории движения гусеничных машин не представляется возможным при исследовании подвижности комплексов такого типа. В связи с этим применение имитационного математического моделирования является единственным способом исследования таких систем, помимо дорогостоящих натурных испытаний.

Постановка задачи. В настоящее время существует большое количество разнообразного программного обеспечения, позволяющего осуществлять динамическое моделирование шасси с необычными двигателями. Так на рис. 1 показана схема четырехгусеничной машины созданной в программном комплексе автоматизированного анализа динамики систем тел «Универсальный механизм». Разработанная модель позволяет исследовать профильную проходимость МРК при преодолении препятствий различного типа, определять потребные характеристики тяговых приводов ведущих колёс и флипперов, а также анализировать динамические процессы, протекающие при движении машины.

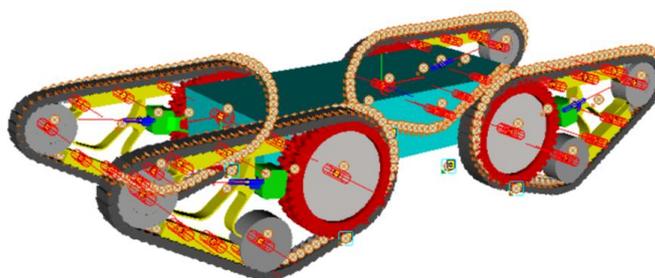


Рис. 1. Общий вид модели гусеничной машины с адаптируемым шасси в редакторе программы динамического моделирования

На текущий момент в МГТУ им. Н.Э. Баумана проводятся исследования подвижности колесных и гусеничных машин с учетом особенностей взаимодействия системы «человек-машина-местность». Для решения представленной задачи разработан комплекс натурно-математического моделирования, позволяющий исследовать динамику машины в режиме «реального времени» под управлением водителя-оператора [2]. На рис. 2 показано рабочее место оператора комплекса натурно-математического моделирования.



Рис. 2. Рабочее место водителя-оператора комплекса натурно-математического моделирования

В отличие от программных комплексов автоматизированного анализа динамики систем тел (например, «Универсальный механизм», «Эйлер», «Адамс» и т.д.), где производится автоматизированное составление дифференциальных уравнений движения, разработка программного обеспечения для комплекса натурно-математического моделирования потребовала использования собственной математической модели, способной проводить расчеты в режиме «реального времени», для обеспечения возможности взаимодействия с водителем-оператором.

Так, в ряде работ представлен общий подход к созданию математической модели динамики гусеничных [3–5] и колёсных машин [6–10] пригодных для применения в разработанном комплексе. В данных работах движение машины рассматривается как движение твердого тела в горизонтальной плоскости по ровной недеформируемой опорной поверхности и складывается из поступательного движения центра масс и вращательного вокруг него (рис. 3).

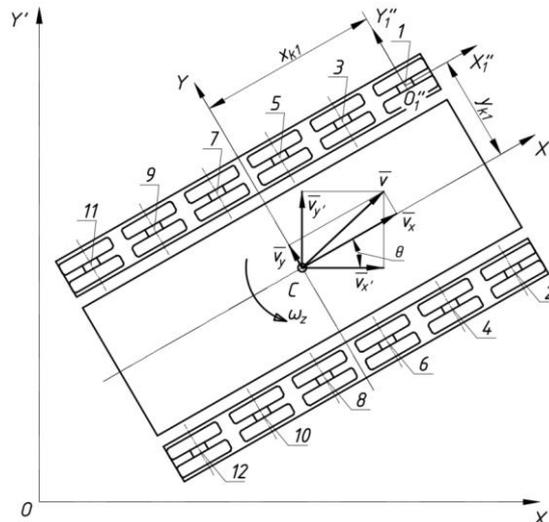


Рис. 3. Расчетная схема движения машины на примере гусеничного робототехнического комплекса

Согласно данному подходу связь опорных катков/колес с корпусом машины в вертикальной плоскости рассматривается как жесткая. Для учета в модели перераспределения нормальных реакций от действия силы сопротивления воздуха, моментов сопротивления качению, ускорения центра масс и силы тяжести используется принцип возможных перемещений.

Данная математическая модель была применена при создании комплекса натурно-математического моделирования. Его реализация потребовала решения в программном коде следующей системы дифференциальных уравнений.

$$\left\{ \begin{array}{l} a_x = \frac{dv_x}{dt} - \omega_z v_y = \frac{1}{m} \left(\sum_{i=1}^n R_{x_i} - P_w \right) \\ a_y = \frac{dv_y}{dt} + \omega_z v_x = \frac{1}{m} \left(\sum_{i=1}^n R_{y_i} \right) \\ J_z \frac{d\omega_z}{dt} = \sum_{i=1}^n M(R_{y_i}) - \sum_{i=1}^n M(R_{x_i}) - \sum_{i=1}^n M_{сп_i}, \\ v_{x'} = \frac{dx'}{dt} = v_x \cos(\theta) - v_y \sin(\theta) \\ v_{y'} = \frac{dy'}{dt} = v_x \sin(\theta) + v_y \cos(\theta) \\ \omega_z = \frac{d\theta}{dt} \end{array} \right. \quad (1)$$

где $x - y$ – система координат, связанная корпусом машины;

$x' - y'$ – глобальная система координат;

m – масса машины;

J_z – момент инерции машины относительно вертикальной оси z , проходящей через центр масс C ;

a_x, a_y – проекции ускорения центра масс машины на оси координат $x - y$;

v_x, v_y – проекции скорости центра масс машины на оси координат $x - y$;

$v_{x'}, v_{y'}$ – проекции скорости центра масс машины на оси координат $x' - y'$;

$\frac{dv_x}{dt}, \frac{dv_y}{dt}$ – проекции относительной производной вектора скорости центра масс ГМ на оси координат $x - y$;

ω_z – проекция вектора угловой скорости поворота машины на вертикальную ось z ;

θ – угол поворота машины в неподвижной системе координат;

x', y' – координаты центра масс машины в системе координат $x' - y'$;

R_{x_i} – продольная составляющая реакции, действующей на активный участок гусеницы под i -ым катком в плоскости основания (опорной поверхности);

R_{y_i} – поперечная составляющая реакции, действующей на активный участок гусеницы под i -ым катком в плоскости основания (опорной поверхности);

P_w – проекция вектора силы сопротивления воздуха на ось x системы координат $x - y$;

$M_{сп_i}$ – момент сопротивления повороту активного участка гусеницы под i -ым катком вокруг вертикальной оси, проходящей через центр этого участка;

n – число опорных катков.

Система уравнений движения (1) машины содержит:

- ♦ уравнения динамики, описывающие движение машины, полученные на основе закона сохранения количества движения и момента количества движения в подвижной системе координат (первые три уравнения);

- ♦ кинематические уравнения связи угловых и линейных скоростей с угловыми и пространственными координатами, полученные на основе уравнений связи между координатными системами $x - y$ и $x' - y'$ для обеспечения возможности определения положения машины в пространстве (последние три уравнения).

Сила взаимодействия с грунтом активных участков движителей в плоскости опорного основания определяется при помощи подхода, основанного на представлении об «эллипсе трения», согласно которому сила взаимодействия с опорной поверхностью направлена противоположно скорости скольжения в точках контакта.

Использование комплекса натурно-математического моделирования для получения данных о нагруженности машин осуществляется за счет виртуальных заездов по специально синтезированным трассам. При синтезе необходимо использовать статистические методы с целью получения новых трасс, незнакомых для водителей-операторов, однако с заранее заданными условиями движения.

Для получения характеристик маршрута (дорожная кривизна, максимальный коэффициент взаимодействия движителя с опорным основанием, коэффициент сопротивления качению, угол наклона опорной поверхности) авторами использовался метод неканонических представлений, который является одним из наиболее распространенных для решения статистических инженерных задач.

Согласно, данному методу, реализация любой стационарной случайной функции $f(s)$ представляется в следующем виде:

$$f(s) = m_f + \sigma_f \sqrt{\frac{2}{N_f}} \sum_{j=1}^{N_f} \cos(\omega_j s + \varphi_j), \quad (2)$$

где s – аргумент случайной функции (в данном случае путь);

m_f – математическое ожидание стационарной случайной функции;

σ_f – среднеквадратическое отклонение стационарной случайной функции;

N_f – число реализаций случайной функции;

ω_j – пространственные частоты случайного процесса;

φ_j – начальные фазы случайного процесса.

Начальные фазы φ_j получают путем «розыгрыша» по методу Монте-Карло, используя равномерный закон распределения на интервале $\varphi_j \in [0, 2\pi]$.

Для «розыгрыша» ω_j также применяют метод Монте-Карло, используя закон распределения случайной функции пространственной частоты, который определяется следующим образом:

$$\varphi(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{R_f(\tau)}{\sigma_f^2} e^{-i\omega\tau} d\tau, \quad (3)$$

$$(\omega) = \int_{-\infty}^{\omega} \varphi(\omega) d\omega, \quad (4)$$

где $R_f(\tau)$ – корреляционная функция стационарной случайной функции;

$\varphi(\omega)$ – плотность распределения случайной функции пространственной частоты;

(ω) – закон распределения случайной функции пространственной частоты.

Далее, используя полученные значения ω_j и φ_j в зависимости **Ошибка! Источник ссылки не найден.** и задавая значение аргумента s , определяется соответствующее реализации значение функции $f(s)$. Более подробно метод синтеза трасс описан в работе [11].

Получаемые в результате виртуальных заездов временные реализации параметров движения машины используются для дальнейшего анализа и оценки влияния различных факторов на подвижность машины.

Представленный комплекс обладает широкими возможностями по исследованию движения машин в условиях, приближенных к реальной эксплуатации:

- ◆ исследование быстроходности машин [12];
- ◆ исследование нагрузочных характеристик моторно-трансмиссионной установки [13];
- ◆ отладка алгоритмов управления машиной [14];
- ◆ исследование влияния задержки сигнала при дистанционном управлении машиной;
- ◆ обучение водителей и исследование психофизиологических аспектов управления машиной водителем-оператором и т.д.

При натурно-математическом моделировании принципиально важным является адекватное задание условий движения машины. В связи с этим в МГТУ им. Н.Э. Баумана проведена работа по созданию специального программного обеспечения, позволяющего синтезировать маршрут, обладающий заданными статистическими характеристиками, непосредственно перед заездом, что предупреждает возможность возникновения эффекта «запоминания» трассы водителем-оператором. Пример статистически «разыгранного» маршрута в окне комплекса натурно-математического моделирования представлен на рис. 4.

Создаваемые таким образом трассы могут использоваться как для исследования движения машины под управлением водителя-оператора, так и для имитационного компьютерного моделирования динамики без учета «человеческого фактора».

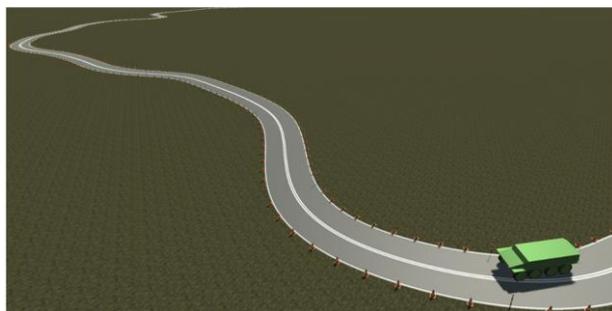


Рис. 4. Вид трассы разыгранной для проведения исследования с использованием комплекса натурно-математического моделирования

Потребность в повышении эксплуатационных скоростей роботизированных транспортных средств требует совершенствования наиболее характерного для таких машин индивидуального тягового электропривода ведущих колёс. Результаты подобных исследований изображены на рис. 5. Представленная гистограмма отображает наиболее вероятные режимы нагружения тяговых электродвигателей гусеничной машины оснащенной индивидуальным приводом ведущих колес, полученные под управлением водителем-оператором при движении по статистически разыгранной трассе [15].

Представленные данные позволяют уточнить результаты аналитического тягового расчёта по определению потребной механической характеристики тяговых электродвигателей в длительных и кратковременных режимах работы для обеспечения заданного уровня подвижности машины, а также определить желаемую зону высокого КПД электропривода.

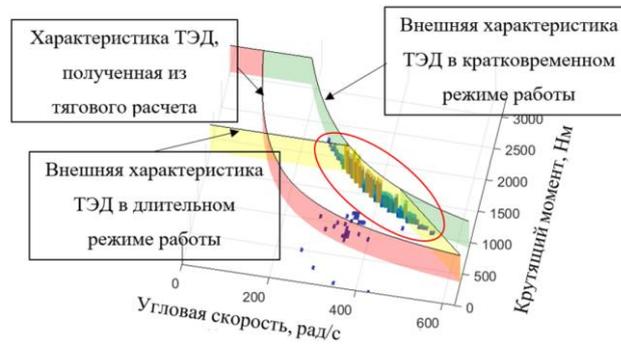


Рис. 5. Результаты моделирования движения дистанционно управляемой гусеничной машины по статистически разыгранной трассе (отмечена наиболее используемая область характеристики электродвигателя, где желательно обеспечить наибольший КПД)

Развитие автономного (программно-управляемого) транспорта использующего, в том числе, нетрадиционные типы движителей, вызывает необходимость разработки в том числе новых алгоритмов управления движением. На рис. 6 показаны результаты моделирования типовой задачи автономного вождения [16–20] – движение по заданной траектории. При исследовании использовалось программное обеспечение Matlab/Simulink/Simscapе. Объектом исследования являлся беспилотный карьерный самосвал с передним и задним управляемыми мостами.

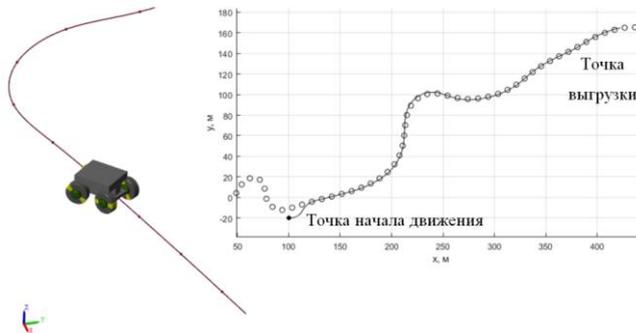


Рис. 6. Заданный маршрут и траектория по результатам моделирования движения роботизированного карьерного самосвала

Заключение. Рассмотренные решенные научные задачи позволяют сделать вывод, что разработка мобильных робототехнических комплексов с параметрами, обеспечивающими уровень подвижности, соответствующий современному техническому уровню развития, может быть значительно более эффективной за счёт применения имитационного математического моделирования и в частности натурно-математического моделирования.

При этом, не смотря на обилие специализированного программного обеспечения предназначенного для моделирования движения машин, зачастую возникают задачи требующие разработки собственного исследовательского инструментария.

Включение в состав моделирующих комплексов человека (водителя оператора) хотя и расширяет перечень решаемых задач, но одновременно затрудняет проведение экспериментов. Так, уникальный характер каждого заезда требует проведения многократных исследований, причем желательно обеспечивать высокое разнообразие трасс.

Разработка и совершенствование метода синтеза условий движения (трассе) позволило не только проводить эффективные заезды с реальными водителями-операторами, но также определять нагрузочные режимы трансмиссии и отлаживать алгоритмы автоматического вождения путем классического (не в режиме «реального времени») имитационного моделирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Hui Jiang, Guoyan Xu, Wen Zeng, Feng Gao.* Design and kinematic modeling of a passively-actively transformable mobile robot // *Mechanism and Machine Theory.* – 2019. – Vol. 142, 103591. – ISSN 0094-114X. – <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2019.103591>.
2. *Котиев Г.О., Мирошниченко А.В., Стадухин А.А., Косицын Б.Б.* Определение режимов работы индивидуального электропривода ведущих колес полноприводной колесной машины с использованием комплекса натурно-математического моделирования // *Технологии и компоненты интеллектуальных транспортных систем.* – 2018. – С. 66-80.
3. *Красеньков В.И., Харитонов С.А.* Динамика криволинейного движения транспортной гусеничной машины // *Тр. МВТУ.* – 1980. – № 339. – С. 3-67.
4. *Гаврин Н.О.* Прогнозирование режимов движения робототизированной гусеничной машины: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 180 с.
5. *Гуськов В.В., Опейко Ф.А.* Теория поворота гусеничных машин. – М.: Машиностроение, 1984. – 167 с.
6. *Чернышев Н.В.* Комплексная система управления поворотом боевой колёсной машины 8×8: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 118 с.
7. *Косицын Б.Б.* Метод определения энергоэффективного закона движения электробуса по городскому маршруту: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 165 с.
8. *Горелов В.А.* Прогнозирование характеристик криволинейного движения полноприводного автомобиля с формулой рулевого управления 1-0-3 при различных законах управления колесами задней оси: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03. – М.: МГТУ им. Баумана, 2008. – 195 с.
9. *Горелов В.А.* Научные методы повышения безопасности и энергоэффективности движения многоосных колесных транспортных комплексов: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.05.03. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 336 с.
10. *Бузунов Н.В.* Метод разработки законов управления нагрузателем рулевого колеса при отсутствии «жесткой» связи в системе управления поворотом колесных машин: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 186 с.
11. *Косицын Б.Б., Мирошниченко А.В., Стадухин А.А.* Моделирование реализаций случайных функций характеристик дорожно-грунтовых условий при исследовании динамики колесных и гусеничных машин на этапе проектирования // *Известия МГТУ «МАМИ».* – 2019. – Вып. № 3 (41). – С. 36-46. – DOI: 10.31992/2074-0530-2019-41-3-36-46.
12. *Котиев Г.О., Падалкин Б.В., Мирошниченко А.В., Стадухин А.А., Косицын Б.Б.* Теоретические исследования подвижности быстроходных гусеничных машин с электротрансмиссиями // *Прогресс транспортных средств и систем* – 2018: Матер. международной научно-практической конференции / под ред. И.А. Каляева, Ф.Л. Черноусько, В.М. Приходько. – С. 27-36.
13. *Косицын Б.Б., Котиев Г.О., Мирошниченко А.В., Падалкин Б.В., Стадухин А.А.* Определение характеристик трансмиссий колёсных и гусеничных машин с индивидуальным электроприводом ведущих колес // *Тр. НАМИ.* – 2019. – № 3 (278). – С. 22-35.
14. *Горелов В.А., Косицын Б.Б., Мирошниченко А.В., Стадухин А.А.* Регулятор системы управления поворотом быстроходной гусеничной машины с индивидуальным приводом ведущих колес // *Известия МГТУ «МАМИ».* – 2019. – Вып. № 4 (42). – С. 21-28. – DOI: 10.31992/2074-0530-2019-42-4-21-28.
15. *Горелов В.А., Косицын Б.Б., Мирошниченко А.В., Стадухин А.А.* Метод определения характеристик индивидуального тягового электропривода двухзвенной гусеничной машины на этапе проектирования. // *Тр. НГТУ им. Р.Е. Алексеева.* – 2019. – № 3 (126). – С. 120-134.

16. Xiong Zhe Han, Hak Jin Kim, Joon Yong Kim, Sang Yup Yi, Hee Chang Moon, Jung Hun Kim, Young Joo Kim. Path-tracking simulation and field tests for an auto-guidance tillage tractor for a paddy field // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2015. – Vol. 112. – P. 161-171. – ISSN 0168-1699. – <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.12.025>.
17. Kim D.H., Choi C.H., Kim Y.J. Analysis of driving performance evaluation for an unmanned tractor // *IFAC-PapersOnLine*. – 2018. – Vol. 51, Issue 17. – P. 227-231. – ISSN 2405-8963. – <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.149>.
18. Te Chen, Long Chen, Xing Xu, Yingfeng Cai, Haobin Jiang, Xiaoqiang Sun. Passive actuator-fault-tolerant path following control of autonomous ground electric vehicle with in-wheel motors // *Advances in Engineering Software*. – 2019. – Vol. 134. – P. 22-30. – ISSN 0965-9978. – <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2019.05.003>.
19. Bai Li, Zhijiang Shao. Precise trajectory optimization for articulated wheeled vehicles in cluttered environments // *Advances in Engineering Software*. – 2016. – Vol. 92. – P. 40-47. – ISSN 0965-9978. – <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2015.10.008>.
20. Khalil Alipour, Arsalan Babaei Robot, Bahram Tarvirdizadeh. Dynamics modeling and sliding mode control of tractor-trailer wheeled mobile robots subject to wheels slip // *Mechanism and Machine Theory*. – 2019. – Vol. 138. – P. 16-37. – ISSN 0094-114X. – <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2019.03.038>.

REFERENCES

1. Hui Jiang, Guoyan Xu, Wen Zeng, Feng Gao. Design and kinematic modeling of a passively-actively transformable mobile robot, *Mechanism and Machine Theory*, 2019, Vol. 142, 103591. ISSN 0094-114X. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2019.103591>.
2. Kotiev G.O., Miroshnichenko A.V., Stadukhin A.A., Kositsyn B.B. Opredelenie rezhimov raboty individual'nogo elektroprivoda vedushchikh koles polnoprivodnoy kolesnoy mashiny s ispol'zovaniem kompleksa naturno-matematicheskogo modelirovaniya [Determining the operating modes of an individual electric drive of the driving wheels of a four-wheel drive vehicle using a complex of natural and mathematical modeling], *Tekhnologii i komponenty intellektual'nykh transportnykh system* [Technologies and components of intelligent transport systems], 2018, pp. 66-80.
3. Krasnen'kov V.I., Kharitonov S.A. Dinamika krivolinyenogo dvizheniya transportnoy gusenichnoy mashiny [Dynamics of curvilinear movement of a transport tracked vehicle], *Tr. MVTU* [Proceedings of the Moscow higher technical school], 1980, No. 339, pp. 3-67.
4. Gavrin N.O. Prognozirovanie rezhimov dvizheniya robototizirovannoy gusenichnoy mashiny: diss. ... kand. tekhn. nauk [Predicting the movement modes of a robotic tracked vehicle: cand. of eng. sc. diss.]: 05.05.03. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 2001, 180 p.
5. Gus'kov V.V., Opeyko F.A. Teoriya povorota gusenichnykh mashin [The theory of turning of tracked vehicles]. Moscow: mashinostroenie, 1984, 167 p.
6. Chernyshev N.V. Kompleksnaya sistema upravleniya povorotom boevoy kolesnoy mashiny 8×8: diss. ... kand. tekhn. nauk [Integrated turn control system for an 8×8 combat wheeled vehicle: cand. of eng. sc. diss.]: 05.05.03. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 2009, 118 p.
7. Kositsyn B.B. Metod opredeleniya energoeffektivnogo zakona dvizheniya elektrobusa po gorodskomu marshrutu: diss. ... kand. tekhn. nauk [Method for determining the energy-efficient law of electric bus traffic on an urban route: cand. of eng. sc. diss.]: 05.05.03. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 2017, 165 p.
8. Gorelov V.A. Prognozirovanie kharakteristik krivolinyenogo dvizheniya polnoprivodnogo avtomobilya s formuloy rulevogo upravleniya 1-0-3 pri razlichnykh zakonakh upravleniya kolesami zadney osi: disc. ... kand. tekhn. nauk [Predicting the characteristics of curvilinear motion of a four-wheel drive car with the steering formula 1-0-3 under different laws of control of the wheels of the rear axle: dr. of eng. sc. diss.]: 05.05.03. Moscow: MGTU im. Bauman, 2008, 195 p.
9. Gorelov V.A. Nauchnye metody povysheniya bezopasnosti i energoeffektivnosti dvizheniya mnogoosnykh kolesnykh transportnykh kompleksov: disc. ... d-ra tekhn. nauk [Scientific methods for improving the safety and energy efficiency of multi-axis wheeled transport systems: dr. of eng. sc. diss.]: 05.05.03. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 2012, 336 p.

10. *Buzunov N.V.* Metod razrabotki zakonov upravleniya nagruzhatel'm rulevogo koleasa pri otsutstvii «zhestkoy» svyazi v sisteme upravleniya povorotom kolesnykh mashin: diss. ... kand. tekhn. nauk [Method for developing laws for steering wheel loader control in the absence of a "rigid" connection in the steering system of wheeled vehicles: cand. of eng. sc. diss.]: 05.05.03. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 2017, 186 p.
11. *Kositsyn B.B., Miroshnichenko A.V., Stadukhin A.A.* Modelirovanie realizatsiy sluchaynykh funktsiy kharakteristik dorozhno-gruntovykh usloviy pri issledovanii dinamiki kolesnykh i gusenichnykh mashin na etape proektirovaniya [Modeling of realizations of random functions of characteristics of road-ground conditions in the study of the dynamics of wheeled and tracked vehicles at the design stage], *Izvestiya MGTU «MAMI»* [Izvestiya MSTU "MAMI"], 2019, Issue No. 3 (41), pp. 36-46. DOI: 10.31992/2074-0530-2019-41-3-36-46.
12. *Kotiev G.O., Padalkin B.V., Miroshnichenko A.V., Stadukhin A.A., Kositsyn B.B.* Teoreticheskie issledovaniya podvizhnosti bystrokhodnykh gusenichnykh mashin s elektrotransmisiyami [Theoretical studies of the mobility of high-speed tracked vehicles with electrotransmission], *Progress transportnykh sredstv i sistem – 2018: Mater. mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Progress of vehicles and systems-2018: Materials of the international scientific and practical conference], ed. by I.A. Kalyaeva, F.L. Chernous'ko, V.M. Prikhod'ko, pp. 27-36.
13. *Kositsyn B.B., Kotiev G.O., Miroshnichenko A.V., Padalkin B.V., Stadukhin A.A.* Opredelenie kharakteristik transmissiy kolesnykh i gusenichnykh mashin s individual'nym elektroprivodom vedushchikh koles [Determination of characteristics of transmissions of wheeled and tracked vehicles with individual electric drive of driving wheels], *Tr. NAMI* [Trudy NAMI], 2019, No. 3 (278), pp. 22-35.
14. *Gorelov V.A., Kositsyn B.B., Miroshnichenko A.V., Stadukhin A.A.* Regulyator sistemy upravleniya povorotom bystrokhodnoy gusenichnoy mashiny s individual'nym privodom vedushchikh koles [Regulator of the turn control system of a high-speed tracked vehicle with an individual drive of the driving wheels], *Izvestiya MGTU «MAMI»* [Izvestiya MSTU "MAMI"], 2019, Issue No. 4 (42), pp. 21-28. DOI: 10.31992/2074-0530-2019-42-4-21-28.
15. *Gorelov V.A., Kositsyn B.B., Miroshnichenko A.V., Stadukhin A.A.* Metod opredeleniya kharakteristik individual'nogo tyagovogo elektroprivoda dvukhzvennoy gusenichnoy mashiny na etape proektirovaniya [Method for determining the characteristics of an individual electric traction drive of a two-link tracked vehicle at the design stage], *Tr. NGTU im. R.E. Alekseeva* [Proceedings of the NSTU R.E. Alekseeva], 2019, No. 3 (126), pp. 120-134.
16. *Xiong Zhe Han, Hak Jin Kim, Joon Yong Kim, Sang Yup Yi, Hee Chang Moon, Jung Hun Kim, Young Joo Kim.* Path-tracking simulation and field tests for an auto-guidance tillage tractor for a paddy field, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015, Vol. 112, pp. 161-171. ISSN 0168-1699. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.12.025>.
17. *Kim D.H., Choi C.H., Kim Y.J.* Analysis of driving performance evaluation for an unmanned tractor, *IFAC-PapersOnLine*, 2018, Vol. 51, Issue 17, pp. 227-231. ISSN 2405-8963. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.149>.
18. *Te Chen, Long Chen, Xing Xu, Yingfeng Cai, Haobin Jiang, Xiaoqiang Sun.* Passive actuator-fault-tolerant path following control of autonomous ground electric vehicle with in-wheel motors, *Advances in Engineering Software*, 2019, Vol. 134, pp. 22-30. ISSN 0965-9978. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2019.05.003>.
19. *Bai Li, Zhijiang Shao.* Precise trajectory optimization for articulated wheeled vehicles in cluttered environments, *Advances in Engineering Software*, 2016, Vol. 92, pp. 40-47. ISSN 0965-9978. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2015.10.008>.
20. *Khalil Alipour, Arsalan Babaei Robat, Bahram Tarviridizadeh.* Dynamics modeling and sliding mode control of tractor-trailer wheeled mobile robots subject to wheels slip, *Mechanism and Machine Theory*, 2019, Vol. 138, pp. 16-37. ISSN 0094-114X. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2019.03.038>.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Е.Б. Сарач.

Горелов Василий Александрович – МГТУ им. Н.Э. Баумана; e-mail: gorelov_va@bmstu.ru; 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1; тел.: +74992636905; кафедра многоцелевых гусеничных машин и мобильных роботов; зав. кафедрой; д.т.н.

Рубцов Иван Васильевич – e-mail: sm7@sm.bmstu.ru; тел.: +74992636778; кафедра робототехнических систем и мехатроники; к.т.н.; доцент.

Стадухин Антон Алексеевич – e-mail: ant.m@bmstu.ru; тел.: 84992636905; кафедра много-целевых гусеничных машин и мобильных роботов; к.т.н.; доцент.

Gorelov Vasily Aleksandrovich – Bauman Moscow State Technical University; e-mail: gorelov_va@bmstu.ru; Moscow, 2-ya Baumanskaya street, 5, 105005, Russia; phone: +74992636905; the department of the multi-purpose tracked vehicles and mobile robots; head of department; dr. of eng. sc.

Rubtsov Ivan Vasilevich – e-mail: sm7@sm.bmstu.ru; phone: +74992636778; the department of the robotic systems and mechatronics; cand. of eng. sc.; associate professor.

Stadukhin Anton Alekseevich – e-mail: ant.m@bmstu.ru; phone: +74992636905; the department of the multi-purpose tracked vehicles and mobile robots; cand. of eng. sc.; associate professor.

Раздел III. Системы энергетики, приводная и датчиковая аппаратура

УДК 621.3:001.3+14.232

DOI 10.18522/2311-3103-2020-1-156-170

В.А. Герасимов, А.В. Комлев, А.Ю. Филоженко

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ТРАНСФОРМАТОРА СИСТЕМЫ БЕСКОНТАКТНОГО ЗАРЯДА АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ АНПА

Способ бесконтактной подводной передачи электроэнергии на автономный необитаемый подводный аппарат (АНПА) для заряда его аккумуляторных батарей (АБ) практически не имеет альтернативы при организации подводного базирования аппарата. В подобной системе применяется трансформатор с разделяющимися первичной и вторичной частями, которые разделены конструктивным немагнитным зазором, определяемым суммарной толщиной стыковочных стенок. Конструктивные и электромагнитные характеристики трансформатора в значительной степени влияют на общую эффективность системы при выполнении главной задачи – заряд АБ за выделенное время. Наличие немагнитного зазора требует специальной методики расчета, для которой исходными данными должны быть, наряду с параметрами процесса заряда АБ, еще также значения ошибок позиционирования АНПА при подводном причаливании к базе. В качестве задачи исследования в работе поставлено обоснование и разработка методики расчета конструктивных параметров трансформатора, удовлетворяющего заданным условиям эксплуатации. В основу исследований положено математическое моделирование электромагнитных процессов в трансформаторе в программном пакете ANSYS Maxwell в сочетании с натурным экспериментом. Выделены характеризующие параметры в виде коэффициента магнитной связи и относительной магнитной проницаемости обмотки и обосновано их применение для полной идентификации свойств исследуемого трансформатора. Предложена система относительных единиц, в которой характеризующие параметры имеют постоянное значение для сердечников, связанных определенными геометрическими соотношениями, что позволяет легко выполнять масштабирование результатов полученных технических решений при изменении требований по передаваемой электрической мощности. В результате исследований предложена методика расчета основных конструктивных параметров трансформаторов. Исходные данные в расчете принимаются в виде сочетания требуемых электрических характеристик трансформатора и его геометрических соотношений при выполнении предъявляемых ограничений по допустимой ошибке автоматического причаливания подводного аппарата к средству подводного базирования. Полученные результаты распространяются на трансформаторы с чашечными ферритовыми сердечниками и на трансформаторы с сердечниками в виде плоских ферритовых экранов, позволяющих формировать магнитопроводы необходимых размеров и конфигураций. Результатом расчета является конструкция трансформатора с электрическими характеристиками, наилучшим образом удовлетворяющими условиям его применения. Экспериментальные натурные исследования убедительно подтверждают достоверность методики.

Подводный аппарат; заряд аккумуляторных батарей; бесконтактная передача электроэнергии; высокочастотный трансформатор; конструктивные параметры; магнитные экраны; методика расчета.

V.A. Gerasimov, A.V. Komlev, F.Yu. Filozhenko

TRANSFORMER CALCULATION METHOD DEVELOPMENT OF THE AUV CONTACT-LESS BATTERY CHARGING SYSTEM

The method of contactless underwater transmission of electricity to an autonomous underwater vehicle (AUV) for charging its rechargeable batteries has practically no alternative when organizing long underwater operation of the AUV. In such system, transformer with separated primary and secondary parts, which are separated by a constructive non-magnetic gap, determined by the total thickness of the connecting walls, is used. The design and electromagnetic characteristics of the transformer significantly affect the overall system efficiency when performing the main task - battery charge for a given time. The presence of a non-magnetic gap requires a special calculation procedure, for which the initial data should be the values of the AUV positioning errors when underwater approaching the base, along with the parameters of the batteries charge process. The study task is the justification and development of a methodology for calculating the design transformer parameters that meets the specified operating conditions. The research is based on mathematical modeling of electromagnetic processes in a transformer in the ANSYS Maxwell software package in combination with a full-scale experiment. The determining parameters in the form of the magnetic coupling coefficient and the winding relative magnetic permeability are founded; their use is justified for the complete identification of the studied transformer properties. A system of relative units is proposed in which the characterizing parameters have a constant value for cores connected by certain geometric relationships, which makes it easy to scale the results of the obtained technical solutions when changing the requirements for the transmitted electric power. As a result of research, a method for calculating the main design parameters of transformers is proposed. The initial data in the calculation is taken as a combination of the required transformer electrical characteristics and its geometric relations when the required restrictions are met for the permissible error of AUV automatic mooring to the dock-station. The results obtained apply to transformers with cup ferrite cores and with flat magnetic cores, which make it possible to form magnetic cores of the required sizes and configurations. The result of the calculation is the design of the transformer with electrical characteristics that best suit the conditions of its application. Experimental field studies convincingly confirm the correctness of the calculation method.

Autonomous underwater vehicle; battery charge; contactless power transmission; high-frequency transformer; design parameters; flat magnetic cores; calculation method.

Введение. Применение бесконтактной передачи электроэнергии на автономный необитаемый подводный аппарат (АНПА) для заряда его аккумуляторных батарей приобретает повышенную актуальность при организации подводного базирования АНПА. В подобной системе общая эффективность процесса бесконтактной передачи электроэнергии (БПЭ) в значительной мере определяется характеристиками специального высокочастотного трансформатора (ВЧТ), являющегося необходимым функциональным элементом системы [1–5]. Такой трансформатор имеет разделяющиеся первичную и вторичную части, которые представляют собой герметичные оболочки с размещенными внутри обмотками [6–8]. Первичная часть трансформатора устанавливается на базе (например, на донном причальном устройстве), а вторичная часть – на АНПА [9, 10]. За счет немагнитного зазора между обмотками, трансформатор имеет пониженное значение коэффициента k_M магнитной связи. Кроме этого, коэффициент магнитной связи зависит от межосевого смещения между обмотками за счет погрешностей автоматического причаливания АНПА к базе. В общем случае, магнитопровод такого трансформатора может быть выполнен на ферритовых чашечных сердечниках, при этом нетиповой набор исходных данных определяют особенность такого трансформатора, и не позволяют использовать для определения его конструкции принятые в электротехнике методики расчета.

В некоторых условиях применения системы бесконтактного заряда желательно, чтобы контактные поверхности трансформатора совпадали с обводами корпуса АНПА в месте его установки, что определяют предпочтительность использования в качестве магнитопроводов плоских магнитных экранов. Переход к плоским магнитным экранам позволяет создавать конструкции трансформаторов, в ряде случаев, способствующих оптимизации процедуры автоматического прицеливания АНПА к базе.

Задачей, которая должна быть решена методикой расчета, является определение типа магнитопровода, а также сечения провода обмоток и числа витков при обеспечении передачи заданного значения активной мощности на АНПА. Возможно, что для удовлетворения поставленным требованиям и ограничениям может потребоваться дробление передаваемой мощности и использование нескольких трансформаторов, включенных последовательно или параллельно [11].

Методика расчета трансформаторов на чашечных сердечниках. В основе предлагаемой методики расчета [12] лежит использование коэффициента магнитной связи k_M между обмотками. Кроме этого, в предложенном подходе в качестве параметра, способствующего полной идентификации характеристик ВчТ, принята также относительная магнитная проницаемость μ_r его обмотки. Практика показала, что именно эти параметры наиболее удобны для сравнительной оценки эффективности различных исполнений ВчТ, поскольку они являются максимально обобщенными и, кроме этого, легко измеряются в натурном эксперименте. При этом в методике используются функциональные зависимости указанных электромагнитных характеристик от зазора h между обмотками, а также от межосевого смещения s обмоток.

Число типов магнитопроводов, пригодных для использования в системе бесконтактного заряда и предлагаемых промышленностью, ограничено. Так, например, ферритовые магнитопроводы чашечного типа имеют хорошие энергетические показатели и трансформаторы на их основе удобны для размещения в АНПА и на базе.

В ходе исследований было установлено, что такие сердечники в определенном смысле являются геометрически подобными, что позволило ввести систему относительных единиц с базовой величиной в виде наружного диаметра сердечника D_{MAX} . При этом относительная магнитная проницаемость обмотки трансформатора используется в виде

$$\mu_r = \frac{L}{\mu_0 \cdot w^2 \cdot D_{max}}, \quad (1)$$

где L – собственная индуктивность обмотки; w – число витков обмотки; D_{MAX} – наружный диаметр сердечника чашечного типа.

Параметр (1) в сочетании с коэффициентом k_M магнитной связи позволяет полностью определить свойства конкретного ВчТ. Это обстоятельство использовано в предлагаемой методике расчета конструкции трансформатора.

Для анализа влияния зазора h между контактными стенками и межосевого смещения s обмоток на эффективность передачи электроэнергии в методике предлагается использовать относительный зазор δ и относительное смещение σ , которые, как и относительная магнитная проницаемость катушки (1), определяются в отношении к наружному диаметру D_{MAX} сердечника.

$$\delta = \frac{h}{D_{MAX}}, \quad \sigma = \frac{s}{D_{MAX}}. \quad (2)$$

В результате компьютерного эксперимента в программном пакете Maxwell [13] получены двумерные массивы значений коэффициента k_M связи и относительной магнитной проницаемости μ_r в функции зазора δ и смещения σ , которые аппроксимированы полиномами:

$$k_M = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m a_{ij} \cdot \delta^i \cdot \sigma^j, \quad (3)$$

$$\mu_r = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m b_{ij} \cdot \delta^i \cdot \sigma^j, \quad (4)$$

где a_{ij} , b_{ij} – коэффициенты аппроксимирующих полиномов; n , m – степени полиномов.

Массивы коэффициентов (3) и (4) можно графически представить в виде трехмерных поверхностей, как показано на рис. 1. При этом оказывается, что эти поверхности в принятой системе относительных единиц, построенные, например, для двух конкретных типоразмеров чашечных сердечников, совпадают.

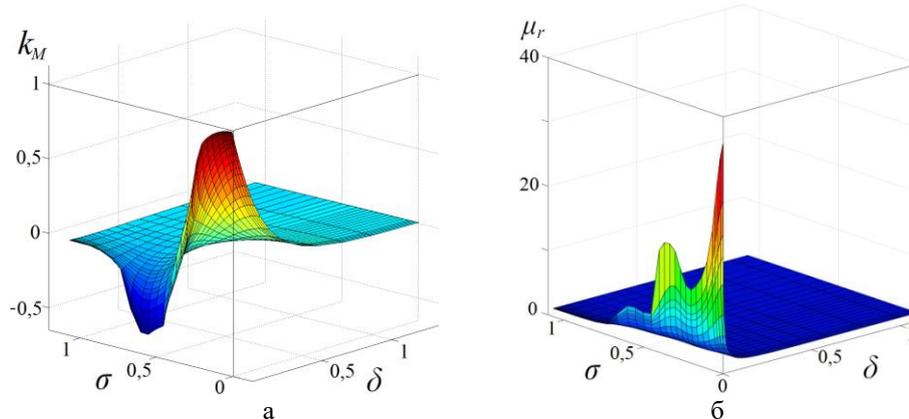


Рис. 1. Зависимости электромагнитных параметров трансформатора от относительного зазора δ и смещения σ : а – коэффициент связи k_M ; б – относительная магнитная проницаемости μ_r .

Учитывая, что один из сердечников имеет наружный диаметр D_{MAX} 150 мм и высоту 30 мм, а для второго сердечника наружный диаметр D_{MAX} составляет 68 мм и высота – 14,5 мм, можно сделать заключение о справедливости гипотезы об эквивалентности геометрического подобия сердечников указанным электромагнитным характеристикам в относительных единицах. Это было положение подтверждено последующими расчетами и экспериментами и является базовым в предлагаемой методике.

Таким образом, если трансформатор выполняется на ферритовых сердечниках чашечного типа, то должны быть определены соответствующие полиномы (3) и (4) для сердечников именно этого типа, с помощью которых можно будет найти коэффициент связи k_M и относительную магнитную проницаемость μ_r обмоток трансформатора, обеспечивающего передачу заданного значения активной электрической мощности.

В качестве основных исходных данных для расчета трансформатора должны быть приняты следующие параметры: номинальный ток I_{AB} заряда и конечное напряжение U_{AB} полностью заряженной аккумуляторной батареи, т.е. значение номинальной передаваемой мощности. Результатом расчета будет определение конструктивных параметров трансформатора, обеспечивающих решение указанной задачи. Под конструктивными параметрами здесь понимается тип, диаметр и количество сердечников, входящих в состав ВчТ, а также параметры провода его обмоток и числа витков.

Последовательность расчета можно представить алгоритмом действий в виде блок-схемы, показанной на рисунке 2. Расчетные формулы, используемые в методике, были получены в [12, 14].

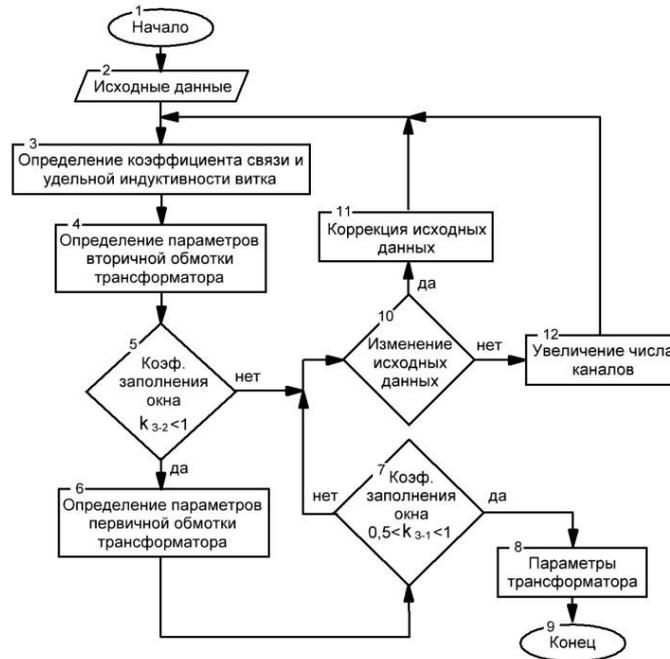


Рис. 2. Блок-схема расчета трансформатора с сердечниками чашечного типа

В методике расчета также должны быть заданы следующие исходные данные:

- ◆ плотность тока в проводе обмоток J ;
- ◆ частота коммутации автономного инвертора f_{MAX} ,
- ◆ коэффициент k_{DC} , учитывающий необходимый запас по входному напряжению зарядного устройства,
- ◆ толщина контактной стенки $h_{СТ}$ оболочки трансформатора;
- ◆ напряжение U_I питания инвертора;
- ◆ предварительно принимается, что ВчТ состоит из одного трансформатора с сердечником чашечного типа с наружным диаметром

$$D_{MAX} = (0,1...0,15)D_A, \quad (5)$$

где D_A – диаметр корпуса аппарата в месте установки приемной части ВчТ [12].

Коэффициент связи k_M и относительная магнитная проницаемость обмотки μ_r для заданного относительного зазора δ и относительного смещения σ определяются из полиномов (3) и (4), полученных предварительно (блок 3), и являются основой для дальнейшего расчета.

В соответствии с приведенной блок-схемой расчета и с использованием известных формул [12, 14] определяются число витков W_2 и сечение S_2 провода вторичной обмотки. В случае выполнения условий размещения обмотки в окне выбранного сердечника выполняется расчет числа витков W_1 и сечения провода S_1 первичной обмотки. Если и первичная обмотка размещается в окне сердечника, то расчет завершается.

Необходимость дополнительных итераций расчета появляется, если, например, не выполняется требование по заполнению окна сердечника (блок 5). В этом случае последовательность вычислений через блок 10 переходит к коррекции исходных данных (блок 2), сводящуюся к выбору, например, другого размера сердечника или типа провода.

Возможны иные последовательности вычислений, зависящие от выполнения указанных в блок-схеме условий, и приводящие к корректировке исходных данных (например, изменению числа каналов передачи энергии за счет дробления передаваемой мощности и др.). При этом уточнение параметров провода, типа сердечника, а также числа пар сердечников, образующих трансформатор системы, может потребовать двух – трех итераций.

Справедливость методики подтверждена натурным экспериментом с трансформатором, специально изготовленным для конкретного примера расчета. Оценка достоверности результатов расчета может быть проведена, например, по внешним характеристикам трансформатора для расчетного варианта и для соответствующего эксперимента, показанным на рис. 3.

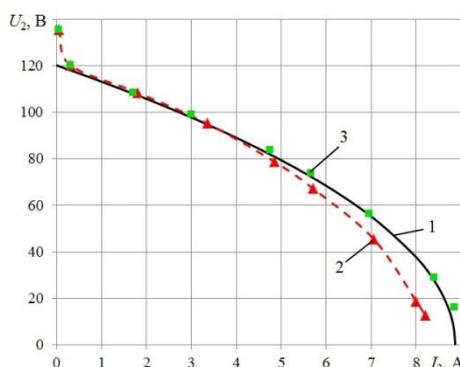


Рис. 3. Внешние характеристики трансформатора: 1 – расчет; 2 – натурный эксперимент; 3 – фактическая характеристика при коррекции частоты инвертора

Следует отметить, что отличие между расчетной характеристикой (график 1) и экспериментальными результатами (график 2) объясняется влиянием дополнительной индуктивности проводов от выводов трансформатора к измерительным приборам, имеющей место в эксперименте и не учтенной в расчетах. Одним из вариантов исключения указанного рассогласования может быть некоторое уменьшение частоты инвертора и, при этом, получение точного соответствия реального трансформатора заданным исходным данным (график 3).

Методика расчета трансформаторов с плоскими экранами. Наряду с трансформаторами на чашечных сердечниках, для которых выше приведена методика расчета, в системах бесконтактной передачи электроэнергии на АНПА могут использоваться трансформаторы с плоскими экранами. Это особая конструкция, нашедшая применение и проявляющая положительные качества только, пожалуй, в такой специфичной области как электрообеспечение АНПА.

Специфика объясняется следующим: здесь действуют ограничения на габариты ВчТ, как правило, в поперечном направлении. Представляя такой трансформатор в виде плоской несимметричной конструкции с удлинением вдоль оси аппарата, можно сохранить электрические характеристики трансформатора при уменьшенном поперечном размере. А это свойство приближает форму контактных

поверхностей к обводам корпуса АНПА в месте его установки. В большинстве случаев отсутствие выступающих деталей на корпусе упрощает процесс позиционирования аппарата в заданном положении при автоматическом причаливании к базе. Кроме этого, отсутствие выступов или углублений конструкций в месте установки трансформаторов улучшает обтекаемость корпуса аппарата и снижает шумность при его движении [15, 16].

Переход к плоским магнитным экранам усложняет идентификацию типа трансформатора. Если для чашечных сердечников в качестве базовой величины можно было принимать их максимальный диаметр [12], то для плоских необходимо учитывать как геометрические размеры сторон плоского экрана, так и соотношение между размерами сторон, т.е. форму магнитного экрана, что должно быть отражено в определении базового параметра для относительной системы единиц.

Исследования показали, что в основу предлагаемой методики следует положить, также как для чашечных сердечников, использование функциональных зависимостей коэффициента k_M магнитной связи и относительной магнитной проницаемости μ_r его обмотки в функции от ошибок причаливания. В качестве базового параметра, при этом, целесообразно принять ширину A экрана и ввести коэффициент формы φ , равный отношению длины B экрана к ширине A . Коэффициент формы φ может изменяться от единицы (для квадрата) до некоторого значения, выбор которого будет определяться рядом факторов (требования к компоновке вторичной части трансформатора на АНПА, габаритные ограничения, условия оптимизации коэффициента магнитной связи при передаче заданной мощности и др.). Как показывает опыт, располагая такими зависимостями, можно однозначно рассчитать конструктивные параметры трансформатора, обеспечивающего передачу заданной мощности, а также достаточно просто выполнять масштабные преобразования этих конструктивных параметров при изменении исходных требований к системе передачи энергии [17].

Суть методики расчета конструктивных параметров заключается в следующем. Для принятого типа сердечников трансформатора рассчитываются двумерные массивы значений коэффициентов k_M и μ_r в функции относительного зазора δ и относительного смещения σ , которые аппроксимируются полиномами:

$$k_M = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m \sum_{l=0}^k a_{ijl} \cdot \delta^i \cdot \sigma^j \cdot \varphi^l, \quad (6)$$

$$\mu_r = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m \sum_{l=0}^k (b_{ijl} \cdot \delta^i \cdot \tau^j \cdot \varphi^l + c_{ijl} \cdot \delta^i \cdot \sigma^j \cdot \varphi^l). \quad (7)$$

Геометрическое представление полинома (1) в виде трехмерных поверхностей является более сложным по сравнению с аналогичной операцией для чашечных сердечников [12] и представляет набор таких поверхностей $k_M = f(\delta, \sigma)$, каждая из которых соответствует определенному значению коэффициента формы φ .

Общий вид и геометрические соотношения для элементов трансформатора показаны на рис. 4, где обозначено: h – суммарный немагнитный зазор, t – высота обмотки с учётом толщины каркаса, t' – высота обмотки, A – ширина обмотки, B – длина обмотки, S_A , S_B – межосевые смещения по стороне A и по стороне B соответственно. Для выражения таких относительных величин, как высота обмотки или соответствующие зазоры, используется положение средней плоскости, проходящей через середину толщины обмотки. При этом относительный зазор между обмотками определяется как $\delta = (h + t)/A$, а относительные смещения по короткой стороне A и по длинной стороне B – как $\sigma_\alpha = S_A/A$ и $\sigma_\beta = S_B/B$ соответственно.

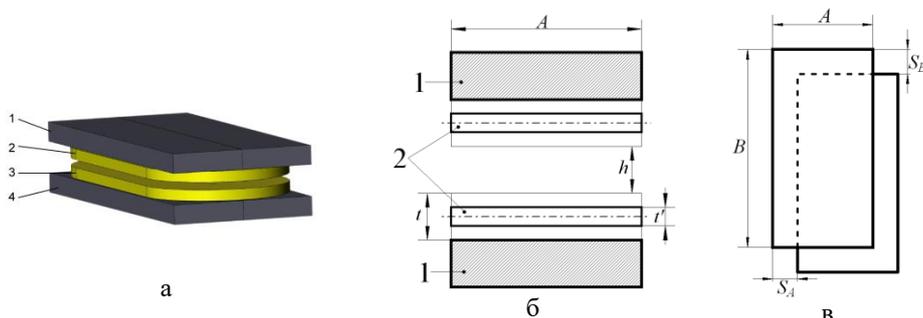


Рис. 4. Геометрические соотношения для плоского трансформатора: а – общий вид (1, 4 – ферромагнитные экраны, 2, 3 – первичная и вторичная обмотки); б – поперечное сечение (1 – экраны, 2 – обмотки); в – вид сверху

Полином (7) можно представить геометрически уже в виде суммы наборов трехмерных поверхностей, расположенных в фазовом пространстве пятого порядка, координатами которого являются δ_σ , δ_ρ , σ , τ и φ . Искомыми величинами являются коэффициенты a_{ijl} , b_{ijl} , c_{ijl} . Картина получается достаточно сложная и решение можно найти с помощью математического моделирования, построенного в виде компьютерного эксперимента для моделей трансформаторов с различными сочетаниями исходных данных.

Так, например, на рис. 5,а показана поверхность (6), полученная в результате моделирования плоского трансформатора с квадратным экраном, т.е. для $\varphi = 1$. Аналогично получена трехмерная поверхность (7), показанная на рис. 5,б, также для квадратного экрана. Изменению коэффициента формы экрана φ будет соответствовать некоторая другая поверхность. Полный вид трехмерных картин $k_M = f(\delta, \sigma, \varphi)$ и $\mu_r = f(\delta, \sigma, \tau, \varphi)$ можно получить, повторяя вычисления по выражениям (6) и (7) для различных значений коэффициента формы φ .

Расчеты показали, что трехмерная картина для коэффициента связи k_M при изменении формы экрана будет представлять серию поверхностей, касающихся в точке $\sigma = 0$ и далее незначительно расходящихся с пересечениями в области повышенных значений σ .

Трехмерная картина для магнитной проницаемости μ_r (7) при изменении коэффициента формы φ представляет серию поверхностей, по форме близких к эквидистантным и располагающихся тем выше, чем больше значение φ . Здесь также направление межосевого смещения обмоток (продольное или поперечное) не влияет на значение относительной магнитной проницаемости μ_r .

Приведенные на рис. 5 трехмерные зависимости позволяют наглядно представить взаимосвязи между основными магнитными характеристиками в виде коэффициента связи k_M и относительной магнитной проницаемости в функции коэффициента формы $\varphi = B/A$ при межосевых относительных смещениях катушек трансформатора $\sigma_\alpha = S_A/A$ или $\sigma_\beta = S_B/B$.

Отметим, что для рабочего диапазона смещений между обмотками, когда взаимное перекрытие обмоток превышает половину соответствующего линейного размера A или B ($\sigma < 0,5$), межосевые смещения σ_α и σ_β в относительном виде влияют на значения k_M и μ_r практически одинаково. По этой причине принято $\sigma_\alpha = \sigma_\beta = \sigma$.

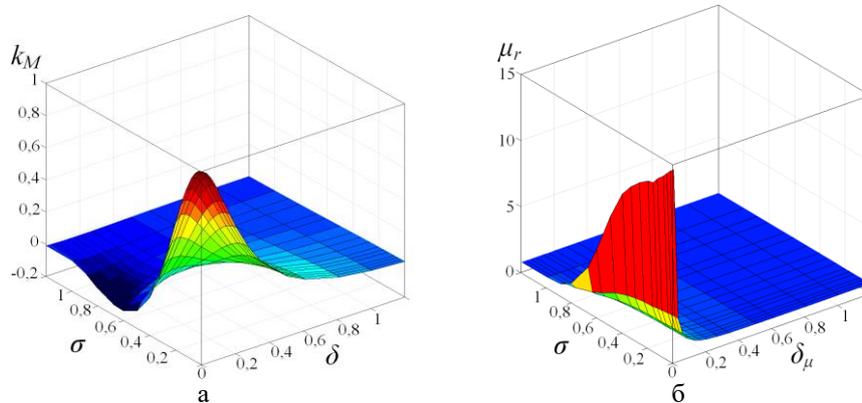


Рис. 5. Зависимости коэффициента магнитной связи k_M и относительной магнитной проницаемости обмотки μ_r от смещения σ и зазора δ для плоского трансформатора

Цель расчета, как и ранее, формулируется в следующем виде: при заданных ограничениях на условия применения и принятых исходных данных определить конструкцию трансформатора, обеспечивающую передачу заданной активной мощности.

В качестве исходных данных принимаются: номинальный ток заряда I_{AB} и конечное напряжение U_{AB} полностью заряженной аккумуляторной батареи, т.е. значение номинальной передаваемой мощности. В результате расчета определяются ширина A и длина B катушки, а также сечение провода и числа витков первичной и вторичной катушек. При этом принимается, что обводы катушки со скругленными углами вписываются в контур прямоугольного ферритового экрана. При ограничении поперечного размера A может потребоваться увеличение числа каналов передачи электроэнергии, т.е. реализация ВчТ на нескольких отдельных трансформаторах с соответствующим включением обмоток.

Поперечный размер A трансформатора ограничивается отношением к диаметру аппарата. В [11] объясняются причины, связанные с указанным ограничением, при этом предлагается считать, что размер A сердечника трансформатора не должен превышать 15 % от диаметра аппарата в месте установки его приемной части.

Последовательность расчета можно представить в виде блок-схемы, показанной на рисунке 6, в которой общий подход методики аналогичен алгоритму расчета для трансформаторов с чашечными сердечниками, но отличается в деталях.

Предварительно, с использованием полиномов (6), (7) должны быть определены значения коэффициента связи k_M и относительной магнитной проницаемости μ_r обмотки, а также выбрано значение ширины A сердечника с учетом рекомендаций по соотношению размеров сердечника и диаметра АНПА. Далее, в соответствии с приведенной последовательностью расчета определяются число витков W_2 , сечение S_2 , выбирается ширина b_2 и высота h_2 провода вторичной обмотки (блок 4). Для обмоток ВчТ должен применяться провод литцендрат, при этом наиболее удобно использование проводов прямоугольного сечения с соотношением высоты к ширине от 1 до 3 [18]. Поэтому, если полученное отношение высоты сечения провода к его ширине не превышает трёх (блок 5), то выполняется расчет числа витков W_1 и сечения S_1 , и выбирается ширина b_1 и высота h_1 провода первичной обмотки (блок 6). Если провод первичной обмотки имеет коэффициент соотношения сторон меньше трёх (проверка условия в блоке 7), то расчет завершается.

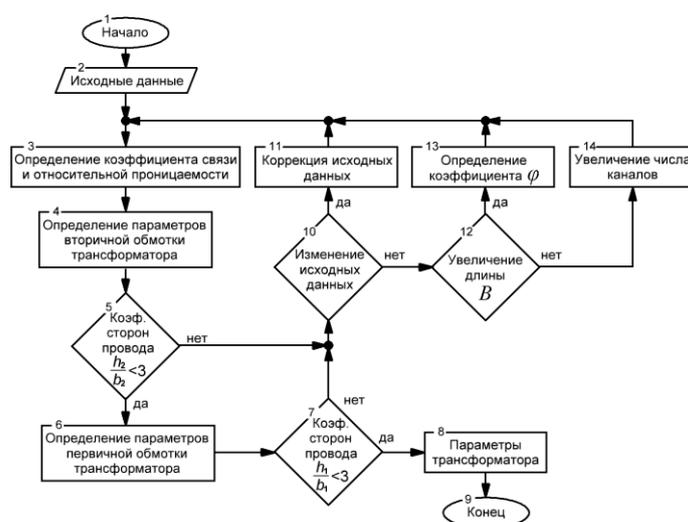


Рис. 6. Блок-схема алгоритма расчёта трансформатора

Приведенная последовательность вычислений имеет место при выполнении условий в соответствующих блоках и является самой короткой, приводящей к законченному решению. Другая, расширенная последовательность вычислений получается, если, например, не выполняется требование по соотношению сторон провода (блок 5). В этом случае вычисления от блока 5 через блок 10 переходят к коррекции исходных данных (блок 11), что сводится к изменению составляющих набора заданных параметров, но приводящих к решению поставленной задачи. Это может быть, например, выбор другого типа провода или увеличение ширины трансформатора A . Если этот вариант неприемлем, то расчет следует к блоку 12, в котором определяется возможность увеличения длины трансформатора B . Далее, если проявляются ограничения по длине трансформатора B , то расчет переходит к блоку 14 и увеличивается общее число каналов передачи энергии, т. е. увеличение числа трансформаторов.

Возможны и другие последовательности вычислений, зависящие от выполнения указанных в блок-схеме условий, и приводящие к корректировке исходных данных. При этом уточнение параметров провода, типа сердечника, а также числа пар сердечников, образующих трансформаторы системы, может потребовать двух-трех итерации.

Справедливость методики подтверждают графики на рис. 7, где показана внешняя характеристики трансформатора, полученная расчетным путем по известным выражениям [19] (график 1) и результаты натурального эксперимента для трансформатора, изготовленного по результатам расчета предложенной методики (маркеры 2).

Конструкция трансформатора с плоскими магнитными экранами позволяет выполнять ее модификацию с целью максимального повышения эффективности процесса передачи электроэнергии. Так, например, здесь несложно получить трансформатор с изогнутым профилем, практически совпадающим с обводами поперечного сечения АНПА [20]. При этом достигается минимально возможный немагнитный зазор между обмотками, что способствует повышению коэффициента магнитной связи (рис. 8). Кроме этого, полученная гладкая форма корпуса подводного аппарата имеет такое эксплуатационное преимущество как уменьшение лобового сопротивления и шумности при движении.

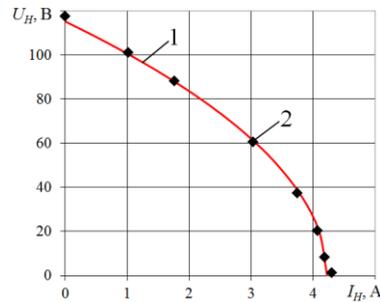


Рис. 7. Внешние характеристики системы бесконтактной передачи электроэнергии: 1 – аналитический расчет; 2 – натурный эксперимент

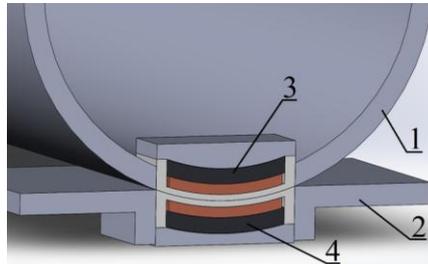


Рис. 8. Размещение трансформатора с изогнутым профилем: 1 – корпус АНПА; 2 – средство базирования; 3, 4 – приёмная и передающая части трансформатора соответственно

В связи с отсутствием ферритовых экранов с заданной кривизной, как показано на рис. 8, изогнутый профиль можно выполнить с помощью набора ферритовых стержней, плоскости которых будут отклонены в соответствии с кривизной поверхности аппарата. Так как обмотка обладает достаточной гибкостью, то придать ей изогнутый профиль не представляет труда. Однако экран, составленный из наклонных ферритовых стержней, будет соприкасаться с обмоткой только в нескольких точках, а среднее расстояние между обмотками и их экранами будет расти с уменьшением диаметра аппарата.

Можно ожидать, что уменьшение диаметра аппарата приведёт к снижению коэффициента магнитной связи между обмотками трансформатора. Для проверки этого эффекта было выполнено математическое моделирование и экспериментальное измерение коэффициента магнитной связи трансформатора с общей шириной магнитного экрана 74 мм, составленного из двух стержней по 37 мм для различных диаметров АНПА (рис. 9).

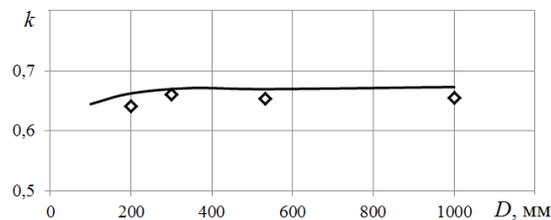


Рис. 9. Зависимость коэффициента магнитной связи от диаметра изгиба профиля трансформатора: маркеры – экспериментальное измерение; сплошная линия – математическое моделирование

Из рис. 9 следует, что уменьшение диаметра изгиба профиля до 300 мм практически не сказывается на коэффициенте магнитной связи. Таким образом, результаты расчёта конструктивных параметров трансформатора с плоскими экранами сохраняют своё значение при изгибе его профиля до указанного значения.

Заключение. Предложен подход к определению конструктивных параметров трансформатора системы бесконтактной передачи электроэнергии для заданных исходных условий, определяющих основные энергетические характеристики системы. Подход предлагается в виде частных методик для двух вариантов выполнения трансформаторов: на чашечных сердечниках и с плоскими магнитными экранами. Выбранные способы представления параметров в относительном виде для указанных исполнений трансформаторов позволяет исключительно просто масштабировать результаты решения с целью изменения передаваемой мощности для заряда аккумуляторных батарей с иными энергетическими характеристиками. Разработка методик расчета сопровождалась сбалансированным сочетанием математического моделирования и натурального эксперимента, обеспечивающих достоверное подтверждение адекватности принятых математических моделей и оптимальное использование материальных ресурсов при постановке эксперимента.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Герасимов В.А., Филоженко А.Ю., Чепурин П.И. Структура системы электроснабжения автономного необитаемого подводного аппарата // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 3 (140). – С. 47-55.
2. Stanimir S. Valtchev, Elena N. Baikova, Luis R. Jorge. Electromagnetic Field as the Wireless Transporter of Energy // Facta Universitatis, Ser: Elec. Energ. – December 2012. – Vol. 25, No. 3. – P. 171-181.
3. Wang X., Shang J., Luo Z., Tang L., Zhang X., Li J. Reviews of power systems and environmental energy conversion for unmanned underwater vehicles // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2012. – Vol. 16, Issue 4. – P. 1958-1970. – URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111006095> (дата обращения 27.02.2020).
4. Li-yan Q. Research on Design of Plate-type Electromagnetic Coupler in Underwater Inductive Power Transmission // MATEC Web of Conferences. – 2015. – Vol. 31. – 5 p. – DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20153108004>.
5. Saishenagha D., Devika M. Wireless charging system using high power, high frequency magnetic interface for underwater electric vehicles // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016. – Vol. 11. – P. 6977-6981.
6. Пат. 2564199 Российская федерация, МПК H02J 7/00 (2006/01). Устройство для бесконтактной передачи электроэнергии на подводный объект / Герасимов В.А., Кувшинов Г.Е., Попов О.С., Филоженко А.Ю., Чепурин П.И. № 2014123766/02; заявл. 10.06.2014; опубл. 27.09.2015, Бюл. № 27.
7. Kraskovskiy M.V., Gerasimov V.A., Kuvshinov G.E., Filozhenko A.Yu. The Use of Resonance for Current Downloading of the Transistor Keys of the Inverter // International Journal of Control Theory and Applications. – 2016. – Vol. 9, Issue 13. – P. 305-311.
8. Wang S., Song B., Duan G., Du X. Automatic wireless power supply system to autonomous underwater vehicles by means of electromagnetic coupler // J. Shanghai Jiaotong Univ. (Sci.). – 2014. – Vol. 19 (1). – P.110-114.
9. Илларионов Г.Ю., Щербатюк А.Ф., Кушнерик А.А. Донные причальные устройства для автономных необитаемых подводных аппаратов // Двойные технологии. – 2011. – № 1. – С. 13-21.
10. Hobson B., McEwen R., Erickson J., Hoover T., McBride L., Shane F., Bellingham J. The development and ocean testing of an AUV docking station for a 21” AUV. IEEE Xplore. – 7 p. – Doi: 10.1109/OCEANS.2007.4449318.
11. Герасимов В.А., Красковский М.В., Филоженко А.Ю., Чепурин П.И. Обеспечение передачи заданной мощности в системе бесконтактного заряда аккумуляторных батарей подводного аппарата // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2017. – Т. 17, № 4. – С. 48-58.

12. Герасимов В.А., Комлев А.В., Красковский М.В., Филоженко А.Ю. Методика расчета конструктивных параметров трансформатора бесконтактной системы заряда аккумуляторных батарей подводного аппарата // Подводные исследования и робототехника. – 2018. – № 1 (25). – С. 21-29.
13. ANSYS Maxwell - Low Frequency Electromagnetic Field Simulation // ANSYS. – Режим доступа: <http://www.ansys.com/Products/Electronics/ANSYS-Maxwell> (дата обращения: 12.02.2018).
14. Герасимов В.А., Комлев А.В., Красковский М.В., Филоженко А.Ю., Чемезов И.А. Определение конструктивных параметров трансформатора системы бесконтактной передачи электроэнергии // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – № 1 (195). – С. 208-219.
15. Герасимов В.А., Филоженко А.Ю., Илларионов Г.Ю., Папкеев С.В. Подводное базирование автономных необитаемых подводных аппаратов на донных причальных устройствах // Стратегическая стабильность. – 2018. – № 1 (82). – С. 30-36.
16. Haibing W., Kehan, Zh., Yan Zh., Baowei S. Comparison of two electromagnetic couplers in an inductive power transfer system for Autonomous Underwater Vehicle docking application. – 2016. – P. 1-5. – 10.1109/OCEANSAP.2016.7485443.
17. Герасимов В.А., Красковский М.В., Филоженко А.Ю. Методика расчёта трансформатора с плоскими экранами для бесконтактной системы заряда аккумуляторных батарей подводного аппарата // Подводные исследования и робототехника. – 2019. – № 2. – С. 13-22.
18. RUPALIT PROFILE – прямоугольные многожильные провода // DACPOL. – URL: <https://www.dacpol.eu/ru/rupalit-profile-prjamougolnye-mnogozhilnye-provoda/product/rupalit-profile> (дата обращения: 27.02.2020).
19. Герасимов В.А., Копылов В.В., Кувшинов Г.Е., Наумов Л.А., Себто Ю.Г., Филоженко А.Ю., Чепурин П.И. Математическая модель устройства для бесконтактной передачи электроэнергии на подводный объект // Подводные исследования и робототехника. – 2012. – № 2 (14). – С. 28-34.
20. Пат. 2648231 Российская федерация. МПК H02J 50/12 (2016/01). Устройство для бесконтактной передачи электроэнергии на подводный аппарат / Герасимов В.А., Филоженко А.Ю., Красковский М.В. №2017114815, заявл. 26.04.2017, опубл. 23.03.2018, Бюл. №9.

REFERENCES

1. Gerasimov V.A. Filozhenko A.Yu. Chepurin P.I. Struktura sistemy elektrosnabzheniya avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata [Structure of the system noncontact energy issue of the autonomous undersea device], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 3 (140), pp. 47-55.
2. Stanimir S. Valtchev, Elena N. Baikova, Luis R. Jorge. Electromagnetic Field as the Wireless Transporter of Energy, *Facta Universitatis, Ser: Elec. Energ.*, December 2012, Vol. 25, No. 3, pp. 171-181.
3. Wang X., Shang J., Luo Z., Tang L., Zhang X., Li J. Reviews of power systems and environmental energy conversion for unmanned underwater vehicles, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, Vol. 16, Issue 4, pp. 1958-1970. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111006095> (accessed 27 February 2020).
4. Li-yan Q. Research on Design of Plate-type Electromagnetic Coupler in Underwater Inductive Power Transmission, *MATEC Web of Conferences*, 2015, Vol. 31, 5 p. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20153108004>.
5. Saishenagha D., Devika M. Wireless charging system using high power, high frequency magnetic interface for underwater electric vehicles, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2016, Vol. 11, pp. 6977-6981.
6. Gerasimov V.A., Kuvshinov G.E., Popov O.S., Filozhenko A.Yu., Chepurin P.I. Ustroystvo dlya beskontaktnoy peredachi elektroenergii na podvodnyy ob"ekt [Device for contactless transmission of electric power to underwater object]. Patent 2564199 Russian Federation, MPK H02J 7/00 (2006/01). No. 2014123766/02; date of filing. 10.06.2014; date of publication. 27.09.2015, Bull. № 27, 13 p.
7. Kraskovskiy M.V., Gerasimov V.A., Kuvshinov G.E., Filozhenko A.Yu. The Use of Resonance for Current Downloading of the Transistor Keys of the Inverter, *International Journal of Control Theory and Applications*, 2016, Vol. 9, Issue 13, pp. 305-311.

8. Wang S., Song B., Duan G., Du X. Automatic wireless power supply system to autonomous underwater vehicles by means of electromagnetic coupler, *J. Shanghai Jiaotong Univ. (Sci.)*, 2014, Vol. 19 (1), pp. 110-114.
9. Illarionov G.Yu., Shcherbatyuk A.F., Kushnerik A.A. Donnye prichal'nye ustroystva dlya avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov [Docking station for autonomous underwater vehicles], *Dvoynye tekhnologii* [Dual technology], 2011, No. 1, pp. 13-21.
10. Hobson B., McEwen R., Erickson J., Hoover T., McBride L., Shane F., Bellingham J. The development and ocean testing of an AUV docking station for a 21" AUV. *IEEE Xplore*, 7 p. Doi: 10.1109/OCEANS.2007.4449318.
11. Gerasimov V.A., Kraskovskiy M.V., Filozhenko A.Yu., Chepurin P.I. Obespechenie peredachi zadannoy moshchnosti v sisteme beskontaktnogo zaryada akkumulyatornykh batarey podvodnogo apparata [Provision of transmission of a given power in the system of contactless charge of underwater vehicle batteries], *Vestnik YuUrGU. Seriya «Energetika»* [Bulletin of South Ural State University. Series "Power Engineering"], 2017, Vol. 17, No. 4, pp. 48-58.
12. Gerasimov V.A., Komlev A.V., Kraskovskiy M.V., Filozhenko A.Yu. Metodika rascheta konstruktivnykh parametrov transformatora beskontaktnoy sistemy zaryada akkumulyatornykh batarey podvodnogo apparata [Transformer design parameters calculation method of the non-contact charging system batteries underwater vehicle], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater Investigation and Robotics], 2018, No. 1 (25), pp. 21-29.
13. ANSYS Maxwell - Low Frequency Electromagnetic Field Simulation, *ANSYS*. Available at: <http://www.ansys.com/Products/Electronics/ANSYS-Maxwell> accessed 12 February 2018).
14. Gerasimov V.A., Komlev A.V., Kraskovskiy M.V., Filozhenko A.Yu., Chemezov I.A. Opredelenie konstruktivnykh parametrov transformatora sistemy beskontaktnoy peredachi elektroenergii [Determination of structural parameters of the transformer of the system non-contact power transmission], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2018, No. 1 (195), pp. 208-219.
15. Gerasimov V.A., Filozhenko A.Yu., Illarionov G.Yu., Pashkeev S.V. Podvodnoe bazirovanie avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov na donnykh prichal'nykh ustroystvakh [The basing of an autonomous underwater vehicle on the docking station], *Strategicheskaya stabil'nost'* [Strategic stability], 2018, No. 1 (82), pp. 30-36.
16. Haibing W., Kehan, Zh., Yan Zh., Baowei S. Comparison of two electromagnetic couplers in an inductive power transfer system for Autonomous Underwater Vehicle docking application, 2016, pp. 1-5. 10.1109/OCEANSAP.2016.7485443.
17. Gerasimov V.A., Kraskovskiy M.V., Filozhenko A.Yu. Metodika rascheta transformatora s ploskimi ekranami dlya beskontaktnoy sistemy zaryada akkumulyatornykh batarey podvodnogo apparata [The transformer calculating method with flat screens for the underwater vehicle non-contact battery charge system], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater Investigation and Robotics], 2019, No. 2, pp. 13-22.
18. RUPALIT PROFILE – pryamougol'nye mnogozhil'nye provoda [RUPALIT PROFILE - rectangular litz wire], *DACPOL*. Available at: <https://www.dacpol.eu/ru/rupalit-profile-pryamougolnye-mnogozhilnye-provoda/product/rupalit-profile> (accessed 27 February 2020).
19. Gerasimov V.A., Kopylov V.V., Kuvshinov G.E., Naumov L.A., Sebto Yu.G., Filozhenko A.Yu., Chepurin P.I. Matematicheskaya model' ustroystva dlya beskontaktnoy peredachi elektroenergii na podvodnyy ob'ekt [Mathematical modeling for contactless electric power transfer to underwater vehicle], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater Investigation and Robotics], 2012, No. 2 (14), pp. 28-34.
20. Gerasimov V.A., Filozhenko A.Yu., Kraskovskiy M.V. Ustroystvo dlya beskontaktnoy peredachi elektroenergii na podvodnyy apparat [Device for contactless transmission of electric power to underwater vehicle]. Patent 2648231 Russian Federation. MPK H02J 50/12 (2016/01). No. 2017114815; date of filing. 26.04.2017; date of publication. 23.03.2018, Bull. No. 9, 15 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.Ф. Верёвкин.

Герасимов Владимир Александрович – Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской Академии наук; e-mail: gerasimov@marine.febras.ru; 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а; тел.: +79025223824; к.т.н.; профессор; зав. лабораторией 07.

Комлев Антон Владимирович – e-mail: kom86@bk.ru; тел.: +79502884801; к.т.н.; с.н.с. лаборатории 07.

Филоженко Алексей Юрьевич – e-mail: filozhenko_a@mail.ru; тел.: +79140678041; к.т.н.; с.н.с. лаборатории 07.

Gerasimov Vladimir Aleksandrovich – The Institute of the problems sea technology, Far eastern branch to Russian Academy of the sciences; e-mail: gerasimov@marine.febras.ru; 5a, Suhanova, Vladivostok, 690091, Russia; phone: +79025223824; cand. of eng. sc.; professor; head of the laboratory 07.

Komlev Anton Vladimirovich – e-mail: kom86@bk.ru; phone: +79502884801; cand. of eng. sc.; senior researcher of the laboratory 07.

Filozhenko Aleksey Jurievich – e-mail: filozhenko_a@mail.ru; phone: +79140678041; cand. of eng. sc.; senior researcher of the laboratory 07.

УДК 629.12

DOI 10.18522/2311-3103-2020-1-170-187

Н.К. Киселев, Л.А. Мартынова, И.В. Пашкевич**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ В СОСТАВЕ СТЕНДА ОТЛАДКИ И СОПРОВОЖДЕНИЯ АНПА***

Целью исследований является разработка комплекса математических моделей, обеспечивающих исходными данными математическую модель работы гибридной системы энергообеспечения для последующего встраивания в стенд отладки и сопровождения. Работа является развитием опубликованной ранее математической модели функционирования гибридной системы энергообеспечения автономного необитаемого подводного аппарата. В работе по результатам анализа целей и задач моделирования разработаны математические модели источников электроэнергии – аккумуляторной батареи и электрохимического генератора. Поскольку управления параметрами работы аккумуляторной батареи и электрохимического генератора зависит от параметров движения аппарата, то дополнительно были разработаны математические модели маршевого движителя и интегрированной системы управления аппаратом. Внешние условия функционирования аппарата и маршрутное задание теоретически интегрированного иерархического моделирования с изменяемым разрешением была определена наиболее целесообразная степень детализации разрабатываемых математических моделей. Ввиду необходимости учета неравномерности обдува газами топливных элементов в электрохимическом генераторе математическая модель основана на решении нелинейной системы уравнений, включающей в себя уравнение Навье-Стокса, уравнения сохранения импульса, энергии и заряда. При разработке математической модели аккумуляторной батареи была учтена неравномерность заряда отдельных аккумуляторов; математическая модель учитывала параметры отдельных аккумуляторов по данным их изготовителя. Результатами моделирования явились зарядно-разрядные характеристики аккумуляторной батареи. В математической модели основного потребителя электроэнергии - маршевого движителя - реализована зависимость создаваемой тяги от требуемой скорости движения аппарата, что позволило получать объем электроэнергии, потребляемой маршевым движителем. В математической модели интегрированной системы управления в зависимости от текущего положения аппарата реализованы регуляторы движения для формирования управления элементами движительной системы, обеспечивающие типовые режимы маневрирования аппарата. Кроме того, реализовано управление параметрами функционирования гибридной системой энергообеспечения - переключение источников электроэнергии, переключение процессов заряда аккумуляторной батареи. В математической модели имитатора тактической обстановки реализованы возможности задания маршрута и внешних

* Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты № 19-08-00253, № 20-08-00130.

условий. Кроме того, реализована модель движения аппарата с учетом действующих на аппарат сил и моментов. Разработанный комплекс математических моделей, обеспечивающий данными математическую модель функционирования гибридной системы энергообеспечения, может быть использован в составе стенда отладки и сопровождения автономного необитаемого подводного аппарата.

Автономный необитаемый подводный аппарат; гибридная система энергообеспечения; математическая модель; степень детализации.

N.K. Kiselev, L.A. Martynova, I.V. Pashkevich

THE MATHEMATICAL MODEL OF THE FUNCTIONING OF A HYBRID ENERGY SUPPLY SYSTEM AS PART OF A DEBUGGING AND MAINTENANCE STAND AUV

The aim of the research is to develop a complex of mathematical models that provide initial data for a mathematical model of the hybrid energy supply system for subsequent integration into the stand for debugging and maintenance. The work is a development of the previously published mathematical model of the functioning of the hybrid energy supply system of an autonomous underwater vehicle. In the work, based on the results of the analysis of the goals and objectives of modeling, mathematical models of electric power sources — a storage battery and an electrochemical generator — are developed. Since control over the operating parameters of the battery and the electrochemical generator depends on the parameters of the vehicle's movement, additional mathematical models of the marching propulsion engine and the integrated control system of the vehicle have been developed. The external conditions for the functioning of the vehicle and the route task were set in a specially developed tactical situation simulator. Based on the theory of integrated hierarchical modeling with variable resolution, the most appropriate degree of detail of the developed mathematical models was determined. In view of the need to take into account the non-uniformity of gas blowing of fuel elements in an electrochemical generator, the mathematical model is based on solving a non-linear system of equations, including the Navier-Stokes equation, equations of conservation of momentum, energy and charge. When developing a mathematical model of the battery, the uneven charge of individual batteries was taken into account; The mathematical model took into account the parameters of individual batteries according to their manufacturer. The simulation results were the charge-discharge characteristics of the battery. In the mathematical model of the main consumer of electricity - the marching propulsion - the dependence of the generated thrust on the required speed of the vehicle is implemented, which allowed to obtain the amount of electricity consumed by the marching propulsion. In the mathematical model of an integrated control system, depending on the current position of the vehicle, motion controllers are implemented to form control elements of the propulsion system, providing typical modes of maneuvering the vehicle. In addition, the control of the functioning parameters of the hybrid energy supply system was implemented - switching of electric power sources, switching of battery charge processes. In the mathematical model of a tactical situation simulator, the possibilities of defining a route and external conditions are realized. In addition, a model of the vehicle movement was implemented taking into account the forces and moments acting on the vehicle. The developed complex of mathematical models, which provides the data with a mathematical model of the functioning of the hybrid energy supply system, can be used as a part of the stand for debugging and maintenance of an autonomous underwater vehicle.

Autonomous uninhabited underwater vehicle; hybrid energy supply system; mathematical model; level of detail.

Введение. Разработка тяжелого автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) [1] связана с применением новых технических решений, в числе которых – формирование принципиально новой системы энергообеспечения (СЭО) – гибридной, в которой используются разнородные источники электроэнергии, работающие на различных физических принципах. В связи с этим, а также с тем, что проведение морских испытаний экономически затратно, целесообразно проведение предварительного математического моделирования функциони-

рования АНПА на специальном стенде отладки и сопровождения. Для этого необходима разработка математических моделей подсистем АНПА, в том числе и гибридной СЭО.

Представляемая работа является развитием результатов, изложенных в [2] в части более детального моделирования источников электроэнергии гибридной СЭО и основного потребителя электроэнергии – маршевого движителя – в различных режимах движения АНПА. Необходимость более детального моделирования вызвана тем, что используемые в гибридной СЭО разнородные источники электроэнергии – литий-ионная аккумуляторная батарея (ЛИАБ), электрохимический генератор (ЭХГ) и используемые в нем реагенты из хранилища реагентов (ХР) – каждая сама по себе представляет собой сложную систему. С другой стороны, внешние условия, определяющие режим функционирования гибридной СЭО, и связанные с этим переходные процессы, требовали взаимодействия модели гибридной СЭО с математическими моделями внешних систем – имитатора тактической обстановки (ИТО) и интегрированной системы управления (ИСУ).

Поскольку на функционирование гибридной СЭО влияние оказывает не только функционирование входящих в нее источников электроэнергии, но и объем потребляемой энергии подсистемами АНПА в различных скоростных режимах его движения, то в математической модели гибридной СЭО также должна быть учтена зависимость расхода электроэнергии от скорости движения АНПА.

В связи с этим возникает задача разработки математических моделей источников электроэнергии гибридной СЭО и математических моделей основных потребителей АНПА для проведения исследований и использования их в составе полномасштабного стенда отладки и сопровождения АНПА.

Целью работы являлась разработка комплекса математических моделей, обеспечивающих данными математическую модель функционирования гибридной СЭО.

Постановка задачи. При движении АНПА в соответствии с маршрутным заданием в работе СЭО можно условно выделить четыре этапа, отличающиеся используемыми источниками электроэнергии и режимами их работы:

- ◆ режим экономичного хода;
- ◆ высокоскоростной режим;
- ◆ режим экономичного хода с одновременной подготовкой к высокоскоростному режиму;
- ◆ режим экономичного хода с одновременным восстановлением параметров гибридной СЭО после быстрого режима.

Для формализованного представления перечисленных этапов представим модель функционирования гибридной СЭО в матричном виде:

$$\dot{x} = \mathbf{A}x + \mathbf{B}u, \quad (1)$$

где x – вектор состояния гибридной СЭО размерности 2;

u – вектор управления гибридной СЭО размерности 4;

\mathbf{A} – матрица динамики гибридной СЭО размерности 2×1 ;

\mathbf{B} – матрица эффективности источников электроэнергии гибридной СЭО размерности 4×2 .

В выражении (1) состояние гибридной СЭО описывается состояниями двух источников электроэнергии – ХР и ЛИАБ:

$$x = [Q_{\text{ХР}} \quad Q_{\text{ЛИАБ}}]^T.$$

Состояния источников электроэнергии выражаются одним параметром - запасом энергоресурса ХР $Q_{ХР}$ и запасом электроэнергии ЛИАБ $Q_{ЛИАБ}$.

Изменение состояния x имеет вид:

$$x = [q_{ХР} \quad q_{ЛИАБ}]^T,$$

где $q_{ХР}$ – удельный расход реагентов в энергетическом эквиваленте; $q_{ЛИАБ}$ – удельный расход энергии ЛИАБ.

Матрица **A** состоит из элементов a_{ij} , принимающих значения 0 или 1: 0 в случае отсутствия на борту АНПА источника электроэнергии или нахождения его в нерабочем состоянии, 1 – при работе источника электроэнергии:

$$A = [a_1 \quad a_2].$$

Управление u определяется удельным расходом электроэнергии на маршевый движитель (МД) $q_{МД}$, обеспечивающий поступательное движение АНПА за счет вращения гребного винта, на нужды АНПА $q_{АНПА}$, на потери электроэнергии при саморазряде ЛИАБ $q_{СР}$, на заряд или разряд ЛИАБ $q_{ЗР}$:

$$u = [q_{МД} \quad q_{АНПА} \quad q_{СР} \quad q_{ЗР}]^T.$$

Элементами матрицы **B** являются параметры b_{ij} , принимающие значения 0, -1 или 1: 0 в случае неиспользования, -1 – в случае расхода, +1 – в случае пополнения энергоресурса:

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} \end{bmatrix}.$$

В режиме экономичного хода:

$$A = [1 \quad 1],$$

при саморазряде:

$$B = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix},$$

при заряде после саморазряда или после высокоскоростного режима:

$$B = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & +1 \end{bmatrix}.$$

В высокоскоростном режиме:

$$A = [1 \quad 1],$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Результаты моделирования направлены на получение значений входящих в выражение (1) параметров: $q_{ХР}$ – удельного расхода реагентов в энергетическом эквиваленте; $q_{ЛИАБ}$ – удельного расхода электроэнергии ЛИАБ; $q_{МД}$ – удельного расхода электроэнергии на работу МД; $q_{АНПА}$ – удельного потребления на общие нужды АНПА; $q_{СР}$ – удельного расхода электроэнергии ЛИАБ при саморазряде; $q_{ЗР}$ – удельной электроэнергии, приобретаемой ЛИАБ при ее заряде, которой соответствует расход электроэнергии, вырабатываемой ЭХГ с использованием реагентов из ХР.

Определение состава математических моделей. Структурная схема взаимодействия математической модели гибридной СЭО и математических моделей остальных подсистем АНПА представлена на рис. 1.

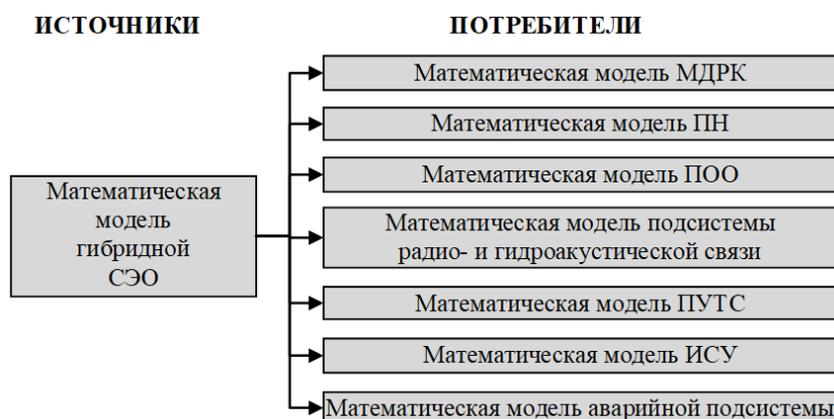


Рис. 1. Структурная схема взаимодействия математической модели гибридной СЭО и остальных подсистем АНПА (принятые сокращения: МДРК – маршевый движительно-рулевой комплекс, ПН – подсистема навигации, ПОО – подсистема освещения обстановки, ПУТС – подсистема управления техническими средствами, ИСУ – интегрированная система управления)

Структурная схема детализации математической модели МДРК на математические модели составных частей МДРК приведена на рис. 2 (аббревиатура «ММ» означает «математическая модель»).

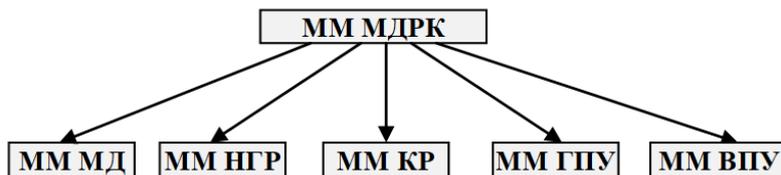


Рис. 2. Структурная схема декомпозиции математической модели МДРК (принятые сокращения: МД – маршевый движитель, НГР – носовые горизонтальные рули, КР – кормовые рули, ГПУ – горизонтальные подруливающие устройства, ВПУ – вертикальные подруливающие устройства)

Полагаем, что потребление на нужды АНПА постоянно и несоизмеримо меньше потребления МДРК, равно среднестатистическому расходу приборов, механизмов и устройств. Полагаем также, что затраты электроэнергии на НГР, КР, ГПУ и ВПУ несоизмеримо меньше по сравнению с электроэнергией, потребляемой МД.

С учетом принятых допущений структурная схема математических моделей примет вид, представленный на рис. 3.

Проанализируем события, оказывающие влияние на удельный расход электроэнергии, вырабатываемый источниками питания. В выражении (1), описывающем состояние гибридной СЭО, удельный расход реагентов в энергетическом эквиваленте $q_{ХР}$ определяется удельным потреблением реагентов для вырабатываемой ЭХГ электроэнергии с учетом потерь на преобразование химической энергии

топлива в электрическую и тепловую энергию. Потребление реагентов в ЭХГ определяется объемом потребления, который включает в себя потребление МД $q_{\text{МД}}$, потребление на нужды АНПА $q_{\text{АНПА}}$, а также потребление на заряд ЛИАБ $q_{\text{ЗР}}$ – в случае ее разряда ниже определенного порогового уровня.

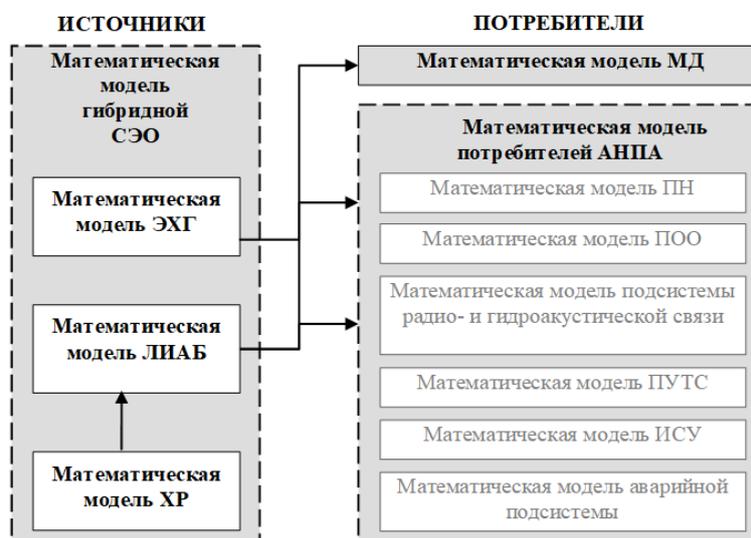


Рис. 3. Структурная схема взаимодействия математических моделей функционирования гибридной СЭО, источников электроэнергии и потребителей АНПА

Поэтому для формирования данных для математической модели функционирования гибридной СЭО целесообразно использовать математические модели, обеспечивающие:

- ◆ формирование электроэнергии при работе ЭХГ;
- ◆ формирование электроэнергии при работе ЛИАБ;
- ◆ потребление электроэнергии при заряде ЛИАБ;
- ◆ формирование зарядно-разрядных характеристик ЛИАБ;
- ◆ потребление электроэнергии МД;
- ◆ потребление электроэнергии на нужды АНПА.

Удельный расход энергии ЛИАБ $q_{\text{ЛИАБ}}$ определяется особенностями процессов заряда-разряда ЛИАБ и потреблением МД $q_{\text{МД}}$ в высокоскоростном режиме. Удельный расход на работу МД $q_{\text{МД}}$ - основного потребителя электроэнергии, определяется скоростью вращения гребного винта $n_{\text{ГВ}}$, поэтому в математической модели потребления электроэнергии гребным винтом учтена скорости его вращения.

Характеристики ЛИАБ $q_{\text{СР}}$ и $q_{\text{ЗР}}$ определяются путем интегрирования аналогичных характеристик отдельно взятых аккумуляторов, образующих в совокупности аккумуляторную батарею.

Переход гибридной СЭО из одного режима функционирования в другой происходит по командам ИСУ, а команды ИСУ определяются заложенными в нее алгоритмами, маршрутным заданием и текущей обстановкой. При моделировании маршрутное задание и текущая обстановка задаются ИТО.

Таким образом, для функционирования гибридной СЭО в составе стенда отладки и сопровождения целесообразно задействовать математические модели ХР, ЭХГ, ЛИАБ, МД, ИСУ и ИТО.

Следующей задачей, которая требовала своего решения, являлось определение необходимой степени детализации воспроизводимых процессов в каждой из используемых математических моделей.

Определение степени детализации. При определении необходимой степени детализации воспроизводимых процессов в используемых математических моделях учитывались основополагающие принципы моделирования [3–5]. В соответствии с указанными принципами модели высокого уровня абстракции недостаточно точно отражают моделируемые процессы, с другой стороны модели низкого уровня с излишней детализацией процессов требует использования большого количества параметров и данных, которые не всегда можно определить или измерить, тем более – с высокой точностью и для рассматриваемых условий моделирования. В соответствии с [3–5] моделирование функционирования рассматриваемых процессов выбиралось из условий чувствительности результата моделирования к входным параметрам и соответствия результатов моделирования целям моделирования. Выбор степени детализации основывался на использовании теории интегрированного иерархического моделирования с изменяемым разрешением [5–13]. В соответствии с этой теорией модель $\{M\}$ каждого моделируемого элемента характеризуется:

- ◆ фазовыми величинами, описывающими состояние объекта $\{X\}$;
- ◆ вектором компонент управления $\{U\}$;
- ◆ вектором внешних величин $\{K\}$.

В общем виде модель представим в виде: $M = M\{X, U, K\}$.

Для модели гибридной СЭО в данной записи $\{X\}$ и $\{U\}$ повторяют матричную запись уравнения (1). $\{K\}$ представляет собой условия перехода гибридной СЭО из одного фазового состояния в другое, определяемое переходом АНПА из одного скоростного режима в другой, выполняемого по командам ИСУ АНПА. Формирование команды со стороны ИСУ может быть вызвано необходимостью повышения управляемости и устойчивости движения АНПА. По окончании такой необходимости по команде со стороны ИСУ после высокоскоростного режима АНПА возвращается в режим экономичного хода.

Рассмотрим подробнее перечисленные характеристики для моделей ХР, ЭХГ, ЛИАБ, МД, ИСУ и ИТО. Поскольку функционирование ХР и ЭХГ неразрывно связаны между собой, то в дальнейшем будем описывать ЭХГ как источник электроэнергии, и при обсуждении расхода реагентов будем рассматривать потребление ЭХГ.

Состояние $\{X_{\text{ЭХГ}}\}$ определяется тем, включен или выключен ЭХГ, а также оставшимся энергоресурсом в ХР. Управление ЭХГ $\{U_{\text{ЭХГ}}\}$ определяется параметрами, регулирующими удельную вырабатываемую электроэнергию и включение/выключение ЭХГ. Вектор внешних величин $\{K_{\text{ЭХГ}}\}$ определяется на входе – командой ИСУ об изменении удельного потребления; на выходе – объемом потребления электроэнергии потребителями. Поэтому при моделировании функционирования ЭХГ воспроизводились процессы, оказывающие влияние на формирование удельной электроэнергии. Влияние оказывает неоднородность обдува газами топливных элементов и равномерный низкоомный токовый ток по всей площади электродов.

ЛИАБ представляет собой сборку из ряда последовательно подключенных батарейных модулей, а модули состоят из параллельно подключенных аккумуляторов. Из-за этого возникает неравномерность емкости и напряжения в аккумуляторах, которая учтена при моделировании. Состояние $\{X_{\text{ЛИАБ}}\}$ определяется удельным разрядом при подключении к ней потребителей, удельным разрядом при саморазряде, удельным зарядом, проведение которого необходимо после разряда

ЛИАБ, включенным/выключенным состоянием. В математической модели учтено, что удельные зарядные характеристики ЛИАБ определяются не только характеристиками отдельных аккумуляторов, но и их совокупностью, поскольку в процессе заряда-разряда происходит балансировка уровней между аккумуляторами, в связи с чем характеристики батареи в целом не могут быть получены обычным суммированием характеристик отдельных аккумуляторов. Управление $\{U_{\text{ЛИАБ}}\}$ ЛИАБ заключается в подключении/отключении ЛИАБ от потребителей. Вектор внешних величин $\{K_{\text{ЛИАБ}}\}$ на входе представляет собой команды ИСУ, на выходе – объем потребления электроэнергии потребителями.

Состояние МД $\{X_{\text{МД}}\}$ определяется тягой, создаваемой гребным винтом. Управление МД $\{U_{\text{МД}}\}$ определяется скоростью вращения гребного винта. Вектор внешних величин $\{K_{\text{МД}}\}$ на входе содержит скорость вращения гребного винта; на выходе – энергию, затрачиваемую на вращение гребного винта с заданной скоростью.

Состояние ИСУ $\{X_{\text{ИСУ}}\}$ описывается параметрами состояния подсистем АНПА, предшествующего текущему состоянию. Управление $\{U_{\text{ИСУ}}\}$ содержит параметры текущего состояния подсистем АНПА, текущего положения АНПА на маршрутной траектории и параметры его движения. Управление в виде команд раздается в подсистемы АНПА. Вектор внешних величин $\{K_{\text{ИСУ}}\}$ на входе определяется требуемыми параметрами движения АНПА-курсом, скоростью, глубиной, текущими внешними условиями выполнения маршрутного задания, задаваемыми в ИТО, на выходе – командами, подаваемыми со стороны ИСУ в ЭХГ, ЛИАБ, ХР, МД.

Состояние ИТО $\{X_{\text{ИТО}}\}$ определяется внешними условиями и маршрутным заданием, в соответствии с которыми оператор на стенде отладки и сопровождения указывает положение АНПА, закладывает в ИСУ АНПА маршрутное задание и задает параметры внешней среды. Управление $\{U_{\text{ИТО}}\}$ определяется изменением внешних условий или положения АНПА в пространстве, задаваемыми оператором. Внешние условия отсутствуют.

Исходя из формализованного представления моделей, в работе была определена степень детализации математических моделей источников и потребителей электроэнергии.

Ниже приведено описание разработанных или используемых математических моделей источников электроэнергии, входящих в состав гибридной СЭО, математической модели МД, математической модели ИСУ в части управления гибридной СЭО и движением АНПА, а также математической модели ИТО. Математическая модель гибридной СЭО подробно описана в [2] и в данной работе не приводится.

Математическая модель ЭХГ. При разработке математической модели функционирования ЭХГ использован подход, реализованный в [14–15] и учитывающий параметры потоков равномерного постоянного обдува топливных элементов кислородом с катодной стороны и топливом с анодной стороны. Математическая модель функционирования ЭХГ основана на совместном решении уравнений Навье-Стокса, сохранения массы, сохранения импульса, сохранения энергии. В уравнениях используются данные производителя ЭХГ. Решение нелинейной системы уравнений осуществляется численным методом.

Результаты решения этих уравнений позволили получить вольтамперную и мощностную характеристики ЭХГ, оценить влияние локальных концентраций реагентов, влажности, давления и рабочей температуры на ЭДС. Наличие перечисленных данных позволяет, в свою очередь, получить удельные характеристики вырабатываемой ЭХГ электроэнергии.

Математическая модель ЛИАБ. К настоящему времени разработано большое количество математических моделей функционирования ЛИАБ [16–21]. Одной из причин необходимости моделирования формирования зарядно-разрядных

характеристик ЛИАБ является то, что в случае зарядки аккумуляторной батареи, состоящей из большого количества аккумуляторов, имеющих разброс параметров, ее практически невозможно заряжать до достижения среднего напряжения на аккумуляторе, как это рекомендуются для единичного аккумулятора. Из-за опасности перезаряда отдельных аккумуляторов заранее прекращают заряд, в результате чего ЛИАБ в целом остается недозаряженной. Часто применяют специализированные методы зарядки, основанные на организации обратной связи между системой управления батареей и зарядным устройством, предполагающих снижение тока зарядки батареи до величины тока балансировки, но это приводит к существенному увеличению времени зарядки. В связи с этим математическая модель ЛИАБ учитывает неравномерность заряда каждого аккумулятора и ориентирована на оценку степени заряженности каждого аккумулятора и получение итоговой оценки заряда по всей ЛИАБ в целом.

Предварительно была проанализирована необходимая степень детализации моделируемых процессов, в результате которой выявлено, что моделирование зарядно-разрядных характеристик отдельно взятого аккумулятора можно заменить результатами экспериментальных измерений отдельных аккумуляторов. Как следовало из описания целей моделирования функционирования ЛИАБ, достаточно использовать математическую модель для получения зарядно-разрядных характеристик с учетом влияния неравномерности заряда/разряда входящих в нее аккумуляторов. Поэтому в работе при оценке уровня заряда каждого аккумулятора реализована математическая модель, учитывающая разброс значений емкости и напряжения аккумуляторов [20]. Математическая модель основана на предварительном получении изменения напряжения на аккумуляторе от степени его заряда. В результате оценивается разброс напряжений на аккумуляторах относительно среднего значения. Определяется среднее значение напряжения на аккумуляторах. Учитывая, что суммарный разброс равен нулю, формируется система линейных уравнений относительно разности напряжений на различных аккумуляторах; количество уравнений совпадает с количеством неизвестных. В результате решения определяются напряжения каждого аккумулятора, что, в свою очередь, позволяет оценить степень заряда ЛИАБ в целом.

Математическая модель МД. Математическая модель работы МД предназначена для определения энергопотребления МД. Потребление МД зависит от тяги, создаваемой двигателем. Тяга определяется той скоростью, с которой движется АНПА. Для того чтобы АНПА осуществляло движение с определенной скоростью, к его МД необходимо приложить движущую силу, преодолевающую сопротивление морской среды. Движущая сила создается работающим гребным винтом, который, как и всякий механизм, часть энергии тратит непроизводительно.

При определении затрачиваемой на вращение гребного винта мощности N_3 с необходимой угловой скоростью учитывалось, что затрачиваемая и полезная мощности связаны между собой пропульсивным коэффициентом η ($\eta < 1$):

$$N_3 = \frac{N_{\Pi}}{\eta}, \quad (2)$$

Полезная мощность, необходимая для преодоления сопротивления морской среды, определяется формулой:

$$N_{\Pi} = R \cdot V, \quad (3)$$

где R – сила сопротивления.

Для записи в формализованном виде полагаем, что сила сопротивления R_i равна силе тяги Te [22], тогда

$$N_{\Pi} = Te \cdot V . \quad (4)$$

Тяга маршевого движительного комплекса Te зависит от числа оборотов гребного винта $n_{ГВ}$, скорости набегающего потока жидкости V , равного скорости АНПА, плотности воды ρ , диаметра гребного винта $D_{ГВ}$, формирующих коэффициентов момента винта K_2 , а также гидродинамических характеристик конкретного АНПА, и определяется выражением [22]:

$$Te = 2\pi \frac{K_2 \rho n_{ГВ}^3 D_{ГВ}^5}{V} . \quad (5)$$

Для определения пропульсивного коэффициента использована формула Лаппа [23]:

$$\eta = 0.885 - 0.00115 n_{ГВ} \sqrt{L} , \quad (6)$$

где $n_{ГВ}$ – частота вращения гребного винта МД, 1/с; L – длина АНПА между перпендикулярами.

Подставляя (3)–(6) в (2), получаем выражение для расчета удельного энергозатраченного на МД.

При расчете изменения скорости вращения МД полагаем, что изменение скорости вращения гребного винта меняется по линейному закону:

$$\frac{dn_{ГВ}}{dt} = C_f \quad (7)$$

где C_f – скорость изменения оборотов гребного винта; положительное значение соответствует движению вперед, отрицательное значение – движению задним ходом.

Математическая модель ИСУ. В ходе моделирования функционирования АНПА периодически происходит оценка параметров движения АНПА. По результатам сопоставления текущих значений параметров АНПА движения с целевыми их значениями в ИСУ происходит определение параметров органов управления: углы перекаладки носовых рулей и кормовых рулей, скорость вращения маршевого движителя, скорость и направление вращения подруливающих устройств – носовых и лаговых. Для определения параметров органов управления движения АНПА используется модель регуляторов движения АНПА. Математическая модель ИСУ в части управления движением АНПА реализует соответствующие регуляторы движения АНПА по курсу, скорости, глубине и дифференту. При управлении гибридной СЭО в ИСУ реализован алгоритм переключения потребителей с одного источника электроэнергии на другой в зависимости от сложившихся внешних условий и состояния гибридной СЭО, которое определяется удельным расходом энергоресурса.

Математическая модель ИТО. Оператор в ИТО задает тактический эпизод, характеризуемый положением АНПА на морской электронной карте, возможные препятствия, характеристики гидрологической и гидроакустической обстановки. Кроме того, в ИТО задаются целевые значения курса, скорости, глубины, определение момента перехода АНПА из одного скоростного режима в другой, момент времени начала выполнения маршрутного задания.

В ходе моделирования движения АНПА осуществляется пересчет параметров движения АНПА с использованием системы дифференциальных уравнений в форме Коши:

$$\frac{dv_i}{dt} (M + M_{пр}) = \sum F_i ; \quad (8)$$

$$\frac{d\omega_i}{dt}(J + J_{\text{пр}}) = \sum M_i, \quad (9)$$

где M – масса аппарата, $\text{H} \cdot \text{с}^2/\text{м}$;

$M_{\text{пр}}$ – присоединенные массы воды, $\text{H} \cdot \text{с}^2/\text{м}$;

U_x, U_y, U_z – проекции (составляющие) вектора скорости на оси связанной системы координат, м/с ;

$\sum F_i$ – суммы проекций всех сил, действующих на объект, на оси связанной системы координат, Н ;

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проекции вектора угловой скорости аппарата, с^{-1} ;

J_x, J_y, J_z – моменты инерции массы относительно главных осей, проходящих через центр тяжести полного подводного объема, $\text{тс} \cdot \text{м}$;

$\sum M_i$ – суммы моментов всех сил, действующих на объект относительно осей связанной системы координат, $\text{Н} \cdot \text{м}$.

В результате решения данной системы определяются линейные и угловые ускорения, угловые значения дифферента, курса, крена.

По полученным значениям происходит расчет координат АНПА в неподвижной системе координат с использованием выражений [24]:

$$\begin{cases} \xi = v_x \cdot \cos \varphi \cdot \cos \psi + v_y \cdot (\sin \theta \cdot \sin \varphi - \cos \theta \cdot \cos \varphi \cdot \sin \psi) + \\ + v_z \cdot (\cos \theta \cdot \sin \varphi + \sin \theta \cdot \cos \varphi \cdot \sin \psi) \\ \zeta = -v_x \cdot \cos \psi \cdot \sin \varphi + v_y \cdot (\cos \varphi \cdot \sin \theta + \cos \theta \cdot \sin \varphi \cdot \sin \psi) + \\ + v_z \cdot (\cos \varphi \cdot \cos \theta - \sin \varphi \cdot \sin \psi \cdot \sin \theta) \\ \eta = v_x \sin \psi + v_y \cdot \cos \psi \cdot \cos \theta - v_z \cdot \cos \psi \cdot \sin \theta \end{cases}$$

где ψ, φ, θ – дифферент, курс, крен АНПА соответственно; ξ, ζ, η – координаты положения АНПА в неподвижной системе координат.

Математическая модель ИТО является стартовой для начала моделирования функционирования АНПА и его подсистем.

Работа стенда отладки и сопровождения организована следующим образом. Оператор загружает в ИСУ АНПА маршрутное задание, в котором определена маршрутная траектория, по которой должен следовать АНПА. В соответствии с маршрутным заданием в ИТО формируется некоторая тактическая обстановка для АНПА: оператор указывает положение АНПА на морской электронной карте, положение объектов и препятствий, параметры рельефа, течения и гидроакустические условия, задаются параметры траектории движения АНПА. После этого в ИСУ происходит определение значений регуляторов движения АНПА по курсу, крену, дифференту, скорости и глубине. В процессе движения АНПА в соответствии с маршрутным заданием имитаторы исполнительных механизмов (рулей, подруливающих устройств, маршевого движителя, уравнительно-дифферентных систем и т.п.) сообщают об отработке команд в ИСУ. В зависимости от скорости вращения гребного винта МД оценивается его потребление энергоресурса. В зависимости от заданного в маршрутном задании скоростного режима движения АНПА в ИСУ определяется тип источника электроэнергии – либо ЛИАБ, либо ЭХГ, и со стороны ИСУ выдается соответствующая команда в СЭО. Моделируется процесс саморазряда ЛИАБ, и в случае достижения некоторого нижнего порога

ИСУ выдает команду на подключение ЛИАБ для заряда. При достижении верхнего порога процесс заряда ЛИАБ прекращается. При смене скоростного режима ИСУ выдает соответствующую команду на подключение ЛИАБ в качестве источника МД и отключение ЭХГ.

Модель движения АНПА расположена внутри ИТО и интегрирована с моделью внешней среды. С использованием динамической модели АНПА происходит определение изменения текущих координат и параметров движения АНПА с учетом работы органов управления движения АНПА, параметры текущего его состояния, которые передаются в ИСУ и в ИТО. ИТО принимает от модели движения вектор состояния АНПА, отображает его положение на электронной морской карте. В ИСУ происходит оценка соответствия положения АНПА маршрутной траектории. По результатам анализа в ИСУ вырабатываются параметры органов управления движением АНПА, передаются на исполнительные устройства, и т.д. – весь описанный выше процесс – повторяется.

Адекватность разработанных математических моделей подтверждена отражением физических процессов, происходящих в источниках электроэнергии из состава гибридной СЭО, при расходе энергоресурса, использованию в качестве модели АНПА и МД близкого аналога с соответствующими тактико-техническими характеристиками и коэффициентами динамической модели регуляторов движения.

Численный эксперимент. Разработанные математические модели функционирования гибридной СЭО и смежных с ней систем АНПА были программно реализованы в виде единого работающего имитационного комплекса моделей и использованы для проведения исследований, направленных на оценку способности источников электроэнергии обеспечить потребности АНПА при движении с заданной скоростью.

При проведении численного эксперимента рассматривались наиболее энергоемкие этапы движения АНПА, связанные с набором скорости. Такие этапы возникают как на старте выполнения маршрутного задания, так и при переходе из режима экономичного хода в высокоскоростной режим движения. И в том, и в другом случае основным потребителем электроэнергии является МД.

Рассматривались различные значения целевой скорости, до которых АНПА должен был разогнаться. Выбор целевой скорости движения АНПА связан с внешними условиями: при движении в зоне отсутствия опасности для повышения устойчивости целесообразна скорость $V_{ЭК}$, при движении в зоне повышенной опасности, связанной с вероятным возникновением препятствий, целесообразна более медленная скорость $V_{ЭК} / 2$. При ускорении АНПА для перехода из режима экономичного хода в высокоскоростной режим рассмотрены несколько вариантов целевой скорости: от $0,5 V_{ВС}$ до $V_{ВС}$ (здесь $V_{ЭК}$ и $V_{ВС}$ – некоторые номинальные значения скоростей АНПА в режиме экономичного хода и в высокоскоростном режиме соответственно).

Как показали предварительные исследования, при разгоне АНПА требуется большой объем электроэнергии. Изменение потребления электроэнергии с течением времени приведено на рис. 4 для различных вариантов разгона, отличающихся целевой скоростью. По горизонтальной оси отложено время в тактах, представляющих собой некоторый постоянный промежуток времени при моделировании, через который происходит оценка изменения состояния рассматриваемых объектов, по вертикальной оси – электроэнергия, кВт·с. Результаты численного эксперимента показали, что зависимости увеличения объема потребляемой энергии с возрастанием целевой скорости носят нелинейный характер и имеют ярко выраженный максимум на начальном участке разгона.

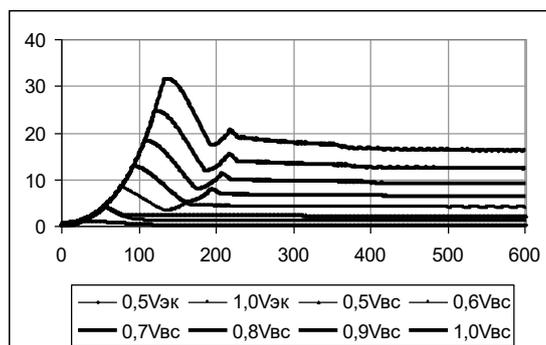


Рис. 4. Изменение потребляемой энергии с течением времени

Результаты, приведенные на рис. 4, позволили определить уровни энергопотребления, которые должны быть обеспечены источниками энергии, чтобы произошел разгон АНПА до заданной скорости. Поэтому на следующем этапе исследований анализировались возможности источников электроэнергии по обеспечению АНПА требуемым объемом.

В случае использования ЭХГ учитывались особенности его работы, связанные с некоторым снижением КПД при повышенном использовании топлива из-за нарушения равномерности температуры обдува топливных элементов в рабочей камере. Рассматривался вариант, при котором ЭХГ способен был выдавать до 5 кВт·с. Результаты моделирования приведены на рис. 5 пунктирной линией в виде допустимых пределов работы ЭХГ (варианты 1,2) и ЛИАБ (варианты 3–8). На этом же рис. 5 приведены сплошной линией пиковые значения потребления энергии при разгоне. Рассмотрены варианты увеличения скорости АНПА из состояния покоя: в варианте 1 – до $0,5 V_{ЭК}$, в варианте 2 – до $V_{ЭК}$.

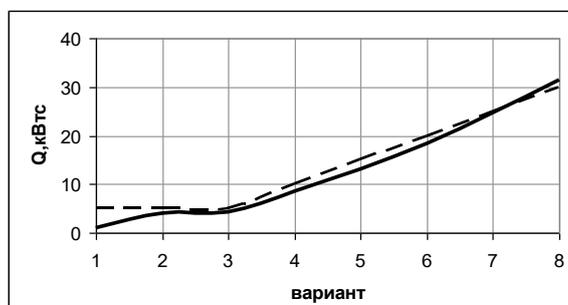


Рис. 5. Зависимость максимального энергопотребления от скорости движения

Из результатов, приведенных на рис. 5, следует, что для вариантов 1-2 возможностей ЭХГ оказалось достаточно. Что касается возможностей ЛИАБ по обеспечению АНПА, то энергоресурс АНПА зависел от количества аккумуляторов, соединенных в единую батарею. Использование чрезмерного количества аккумуляторов приводит к существенному перегрузу АНПА, недостаточное количество может не обеспечить потребности АНПА. При проведении исследований рассмотрены 6 вариантов ЛИАБ, отличающихся количеством аккумуляторов, соединенных в батарею. Каждый из вариантов характеризовался объемом выдаваемой энергии. Рассматривались варианты, обеспечивающие возможность выдачи 5, 10, 15, 20, 25 и 30 кВт·с соответственно (варианты приведены на рис. 5 пунктирной линией).

По результатам проведенных исследований оказалось, что при использовании ЛИАБ варианты 3-7 обеспечивают достижение скорости $0,5 V_{BC} - 0,9 V_{BC}$, а вот последний вариант 8 – лишь до 30 кВт·с, в то время как требуется свыше 30 кВт·с. Выходом из положения при имеющейся ЛИАБ может стать поэтапный разгон, исключающий необходимость резкого увеличения потребляемой энергии.

При разгоне АНПА для движения в высокоскоростном режиме также оценивалась достаточность имеющегося у ЛИАБ объема запасенной энергии. Для этого при моделировании оценивался объем энергии, необходимый для разгона и стабильного движения АНПА с целевой скоростью в течение 600 тактов. Результаты моделирования приведены на рис. 6 (варианты 3-8). По горизонтальной оси отложены варианты изменения скорости, по вертикальной – полный затраченный объем энергии Q , кВт·с.

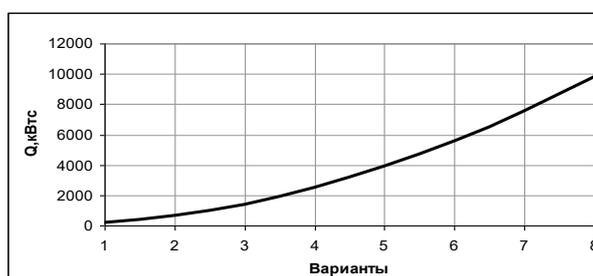


Рис. 6. Зависимость общего расхода энергоресурса от целевой скорости

Из результатов, приведенных на рис. 6 видно, что при запасе ЛИАБ, например, 4 кВт·с, энергии ЛИАБ хватит лишь для разгона до $0,7V_{BC}$ (вариант 5), для разгона на большие скорости энергии окажется недостаточно. Детальный анализ показал, что при этом наиболее энергоемким является период нарастания энергопотребления до максимального значения. На рис. 7 приведены результаты длительности нарастания энергопотребления до максимального значения – для тех же вариантов 3-8 ускорения в высокоскоростном режиме.

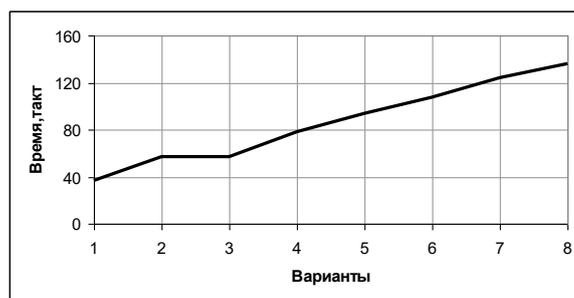


Рис. 7. Зависимость длительности нарастания энергопотребления от целевой скорости

Результаты численного эксперимента показали, что, например, для варианта 5, по крайней мере, после 100-го такта наступит спад расходимого энергоресурса. Однако при этом скорость к 100-му такту достигнет лишь 50 % от своего целевого значения.

Заключение. Разработан комплекс имитационных моделей, обеспечивающих формирование исходных данных для функционирования разработанной ранее математической модели работы гибридной системы энергообеспечения и составляющих ее элементов – электрохимического генератора, хранилища реагентов, литий-ионной аккумуляторной батареи, а также – математической модели движительно-рулевого комплекса, интегрированной системы управления и имитатора тактической обстановки.

Используемая в работе теория интегрированного иерархического моделирования с изменяемым разрешением, а также анализ математических моделей отдельных элементов гибридной системы обеспечения, позволили выбрать наиболее целесообразную степень детализации разрабатываемых моделей, и с учетом выбора – сформировать адекватные математические модели.

Разработанный имитационный комплекс математических моделей позволил во взаимосвязи проанализировать возможности источников электроэнергии гибридной системы энергообеспечения и потребности потребителей автономного обитаемого подводного аппарата, обеспечивающих его движение с заданными целевыми параметрами.

Разработанный комплекс математических моделей и математическую модель гибридной системы энергообеспечения планируется использовать в составе стенда отладки и сопровождения АНПА.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Аполонов Е.М., Бачурин А.А., Горохов А.И., Пономарев Л.О.* О возможности и необходимости создания сверхбольшого обитаемого подводного аппарата // Сб. материалов XIII Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». – Ростов-на-Дону – Таганрог: ЮФУ, 2018. – С. 34-42.
2. *Мартынова Л.А.* Математическая модель работы гибридной системы энергообеспечения автономного обитаемого подводного аппарата большой дальности // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 1 (203). – С. 212-227.
3. *Моисеев Н.Н.* Алгоритмы развития. 1987. – М.: Наука. – 350 с.
4. *Микони С.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов. – М.: РАН, 2018. – 314 с.
5. *Davis P.K.* Exploratory analysis enabled by multiresolution, multiperspective modeling // Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference. – P. 293-302.
6. Modeling and simulation: Technology for the United States Navy and Marine Corps, Washington, D.C.:National Academy Press, 1997. – Vol. 9. – P. 2000-2035.
7. *Morgan G., Henrion M.* Uncertainty: A guide to dealing with uncertainty in quantitative risk and policy analysis. Cambridge MA: Cambridge University Press. National Research Council. 1992. – 346 p.
8. *McEver J., Davis P.K., Bigelow J.H.* Implementing multiresolution models and families of models: from entity level simulation to personal-computer stochastic models and simple repro models // Proceedings of the SPIE. – 2000. – Vol. 4026. – <https://doi.org/10.1117/12.389372>.
9. *Davis P.K.* Multiresolution multiperspective modeling (MRMPM) as an enabler of exploratory analysis. – <https://doi.org/10.1117/12.389362>.
10. *Bigelow J.H., Davis P.K., McEver J.* Case history of using entity-level simulation as imperfect experimental data for informing and calibrating simpler analytical models for interdiction. Proc. SPIE 4026, Enabling Technology for Simulation Science IV, (23 June 2000). – <https://doi.org/10.1117/12.389380>.
11. *Bankes S.C.* Exploratory modeling for policy analysis // Operations Research. – 1993. – Vol. 41, No. 3. – <https://doi.org/10.1287/opre.41.3.435>.
12. *Lempert R., Schlesinger M.E., Bankes S.C.* When we don't know the costs or the benefits: adaptive strategies for abating climate change // Climatic Change. – 1996. – Vol. 33, No. 2. – P. 235-274.

13. Lucas T. The stochastic versus deterministic argument for combat simulations: tales of when the average won't do // *Military Operations Research*. – 2000. – Vol. 5, No. 3. – DOI: 10.5711/morj.5.3.9.
14. Янченко В.С. Моделирование энергетической системы мобильной техники с топливными элементами // *Транспорт на альтернативном топливе*. – 2012. – № 3 (27). – С. 56-57.
15. Смирнов Д.Б. Моделирование распределения токов в твердооксидных топливных элементах планарной геометрии методом конечных элементов. – ИФФТ РАН, 2014. – 18 с.
16. Plett G.L. *Battery Management Systems*. Vol. 1. *Battery Modeling*. Artech House. Boston-London. 2015. – 343 p.
17. Plett G. L. *Battery Management Systems*. Vol. 2. *Equivalent-Circuit Methods*. Artech House. Boston-London. 2016. – 329 p.
18. Брянецев А.А., Букреев В.Г. Методика и алгоритм определения параметров модели Шеффа для описания нелинейной вольт-амперной характеристики заряда литий-ионного аккумулятора // *Доклады ТУСУР*. – 2019. – Т. 22, № 1. – С. 95-99.
19. Хандорин М. М. Метод, алгоритмы и микропроцессорное устройство оценивания параметров литий-ионной аккумуляторной батареи космического аппарата: автореф. дисс. ... канд. тех. наук. – Томск, 2018. – 21 с.
20. Моделирование режима зарядки литий-железо-фосфатной аккумуляторной батареи с учетом разброса параметров отдельных аккумуляторов. – <http://estorsys.ru/publikatsii/116-modelirovanie-rezhima-zaryadki-litij-zhelezo-fosfatnoj-akkumulyatornoj-batarei-s-uchetom-razbrosa-parametrov-otdelnykh-akkumulyatorov> (дата обращения 06.02.2020).
21. Проценко Н.А., Лапшин В.Ю., Бледнова Ж.М. Расчетно-экспериментальная оценка распределения температур в случае технологических сбоев в работе литий-ионного аккумулятора космического назначения // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2010. – Т. 12, № 4 (3). – С. 596-600.
22. Войткунский Я. И. *Справочник по теории корабля*. – Л.: Судостроение. 1985. Т. 1. – 764 с.
23. Теоретические основы управления судном. – <http://sea-library.ru/upravlenie-sudnom/359-teoreticheskie-osnovy-upravleniya-sudnom.html> (дата обращения 05.11.2019).
24. Васильев К.К., Гурман Д.А. Моделирование алгоритмов навигации и управления для автономных необитаемых подводных аппаратов // *Автоматизация процессов управления*. – 2013. – № 3 (33). – С. 27-31.

REFERENCES

1. Appolonov E.M., Bachurin A.A., Gorokhov A.I., Ponomarev L.O. O vozmozhnosti i neobkhodimosti sozdaniya sverkhbol'shogo neobitaemogo podvodnogo apparata [On the possibility and necessity of creating an extra-large uninhabited underwater vehicle], *Sbornik materialov XIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya»* [Proceedings of the XIII All-Russian Scientific and Practical Conference "Perspective Systems and Control Problems"]. Rostov-on-Don – Taganrog: YuFU, 2018, pp. 34-42.
2. Martynova L.A. Matematicheskaya model' raboty gibridnoy sistemy energo-obespecheniya avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata bol'shoy dal'nosti [A mathematical model of the hybrid energy supply system of an autonomous uninhabited underwater vehicle of long range], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 1 (203). pp. 212-227.
3. Moiseev N.N. *Algoritmy razvitiya* [Development Algorithms]. Moscow: Science, 1987, 350 p.
4. Mikoni S.V., Sokolov B.V., Yusupov R.M. Kvalimetriya modeley i polimodel'nykh kompleksov. [Qualimetry of models and polymodel complexes]. Moscow: RAN, 2018, 314 p.
5. Davis P.K. Exploratory analysis enabled by multiresolution, multiperspective modeling, *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*, pp. 293-302.
6. *Modeling and simulation: Technology for the United States Navy and Marine Corps*, Washington, D.C. National Academy Press, 1997, Vol. 9, pp. 2000-2035.
7. Morgan G., Henrion M. *Uncertainty: A guide to dealing with uncertainty in quantitative risk and policy analysis*. Cambridge MA: Cambridge University Press. National Research Council, 1992, 346 p.
8. McEver J., Davis P.K., Bigelow J.H. Implementing multiresolution models and families of models: from entity level simulation to personal-computer stochastic models and simple repro models, *Proceedings of the SPIE*, 2000, Vol. 4026. Available at: <https://doi.org/10.1117/12.389372>.

9. *Davis P.K.* Multiresolution multiperspective modeling (MRMPM) as an enabler of exploratory analysis. Available at: <https://doi.org/10.1117/12.389362>.
10. *Bigelow J.H., Davis P.K., McEver J.* Case history of using entity-level simulation as imperfect experimental data for informing and calibrating simpler analytical models for interdiction. Proc. SPIE 4026, Enabling Technology for Simulation Science IV, (23 June 2000). Available at: <https://doi.org/10.1117/12.389380>.
11. *Bankes S.C.* Exploratory modeling for policy analysis, *Operations Research*, 1993, Vol. 41, No. 3. Available at: <https://doi.org/10.1287/opre.41.3.435>.
12. *Lempert R., Schlesinger M.E., Bankes S.C.* When we don't know the costs or the benefits: adaptive strategies for abating climate change, *Climatic Change*, 1996, Vol. 33, No. 2, pp. 235-274.
13. *Lucas T.* The stochastic versus deterministic argument for combat simulations: tales of when the average won't do, *Military Operations Research*, 2000, Vol. 5, No. 3. Doi: 10.5711/morj.5.3.9.
14. *Yanchenko V.S.* Modelirovanie energeticheskoy sistemy mobil'noy tekhniki s toplivnymi elementami [Modeling the energy system of mobile equipment with fuel cells], *Transport na alternativnom toplive* [Transport on alternative fuel], 2012, No. 3 (27). pp. 56-57.
15. *Smirnov D.B.* Modelirovanie raspredeleniya tokov v tverdotsidnykh toplivnykh elementakh planarnoy geometrii metodom konechnykh elementov [Modeling the distribution of currents in solid oxide fuel cells of planar geometry by the finite element method]. IFFT RAS, 2014, 18 p.
16. *Plett G. L.* Battery Management Systems. vol. 1. Battery Modeling. Artech House. Boston-London, 2015, 334 p.
17. *Plett G. L.* Battery Management Systems. Vol. 2. Equivalent-Circuit Methods. Artech House. Boston-London, 2016, 332 p.
18. *Bryantsev A.A., Bukreev V.G.* Metodika i algoritm opredeleniya parametrov modeli Sheferda dlya opisaniya nelineynoy vol't-ampernoy harakteristiki zaryada litiy-ionnogo akkumulyatora [Methods and algorithm for determining the parameters of the Shepherd's model to describe the non-linear current-voltage characteristics of the charge of a lithium-ion battery], *Doklady TUSUR* [Doklady TUSUR], 2019, Vol. 22, No. 1. pp. 95-99.
19. *Handorin M.M.* Metod, algoritmy i mikroprocessornoe ustroystvo otsenivaniya parametrov litiy-ionnoy akkumulyatornoy baterei kosmicheskogo apparata: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Method, algorithms and microprocessor-based device for evaluating the parameters of a lithium-ion battery of a spacecraft: abstract cand. of eng. sc. diss.]. Tomsk 2018, 21 p.
20. Modelirovanie rezhima zaryadki litiy-zhelezo-fosfatnoy akkumulyatornoy baterei s uchetom razbrosa parametrov otdel'nykh akkumulyatorov [Modeling the charging mode of a lithium-iron-phosphate battery, taking into account the variation in the parameters of individual batteries]. Available at: <http://estorsys.ru/publikatsii/116-modelirovanie-rezhima-zaryadki-litii-zhelezo-fosfatnoj-akkumulyatornoj-baterei-s-uchetom-razbrosa-parametrov-otdelnykh-akkumulyatorov> (accessed 06 February 2020).
21. *Protosenko N.A., Lapshin V.Yu., Blednova Zh.M.* Raschetno-eksperimental'naya otsenka raspredeleniya temperatur v sluchae tekhnologicheskikh sboev v rabote litiy-ionnogo akkumulyatora kosmicheskogo naznacheniya [Calculation and experimental estimation of temperature distribution in the event of technological failures in the operation of a lithium-ion battery for space purposes], *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossiyskoy akademii nauk* [Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2010, Vol. 12, No. 4 (3). pp. 596-600.
22. *Voitkunsky Ya. I.* Spravochnik po teorii korablya [Handbook of ship theory]. Leningrad Shipbuilding, 1985, Vol. 1, 764 p.
23. Teoreticheskie osnovy upravleniya sudnom [The theoretical basis of the management of the vessel]. Available at: <http://sea-library.ru/upravlenie-sudnom/359-teoreticheskie-osnovy-upravleniya-sudnom.html> (accessed 05 November 2019).
24. *Vasiliev K.K., Gourmet D.A.* Modelirovanie algoritmov navigatsii i upravleniya dlya avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov [Modeling of navigation and control algorithms for autonomous uninhabited underwater vehicles], *Avtomatizatsiya processov upravleniya* [Automation of control processes], 2013, No. 3 (33), pp. 27-31.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Э.В. Мельник.

Киселев Николай Константинович – АО «ЦКБ «Лазурит»; e-mail: kiselevu@gmail.com; 603951, г. Нижний Новгород, ул. Свободы, 57; тел.: 89200218810; зам. главного конструктора.

Мартынова Любовь Александровна – АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»; e-mail: martynowa999@bk.ru; 197046, Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, 30; тел.: 89219411395; д.т.н.; с.н.с.; в.н.с.

Пашкевич Иван Владимирович – e-mail: iv@bk.ru; тел.: 89119330006; главный специалист.

Kiselev Nikolay Konstantinovith – JSC Central Design Bureau Lazurit; e-mail: kiselevu@gmail.com; 57, Svobody av., Nizhniy Novgorod, 603951, Russia; phone: 879200218810; post-graduate student; deputy chief designer.

Martynova Liubov Alexandrovna – JSC CSRI Elektropribor; e-mail: martynowa999@bk.ru; 30, Malaya Posadskaya av, Sankt-Peterburg, 197046, Russia; phone: +79219411395; dr. of eng. sc.; senior researcher; leading researcher.

Pashkevich Ivan Vladimirovich – e-mail: iv@bk.ru; phone: +79119330006; chief specialist.

Раздел IV. Связь, навигация и наведение

УДК 004.93'12

DOI 10.18522/2311-3103-2020-1-188-199

В.А. Бондаренко, В.А. Павлова, В.А. Тупиков, Н.Г. Холод

НЕЙРОСЕТЕВОЙ АЛГОРИТМ ПОЛНОКАДРОВОГО РАСПОЗНАВАНИЯ НАДВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

Исследованы современные нейросетевые архитектуры для осуществления автоматического обнаружения и распознавания надводных объектов и препятствий заданных классов по всей области изображения, применимые к выполнению в реальном или условно реальном времени для задач оптоэлектронной системы технического зрения с целью автоматизации и повышения безопасности гражданского судовождения. Дана формальная постановка задачи автоматического обнаружения объектов на изображениях. Проанализирован текущий научно-исследовательский задел в области алгоритмов детектирования объектов на изображениях, основанных на искусственных свёрточных нейронных сетях, произведено их сравнение и сделан обоснованный выбор в пользу наиболее эффективной нейросетевой архитектуры по соотношению вычислительной сложности и точности распознавания. Исследованы имеющиеся в открытом доступе базы данных образов надводных объектов, подходящие для применения при обучении алгоритмов с использованием искусственных нейронных сетей. Сделан вывод о недостаточности имеющихся данных для обучения нейросетевых алгоритмов, в результате чего авторами выполнен самостоятельный сбор исследовательских изображений и видеопоследовательностей, произведена подготовка и разметка собранных данных, содержащих надводные объекты и иные препятствия, представляющие навигационную опасность для судов. На основе выбранной архитектуры разработан новый нейросетевой алгоритм автоматического обнаружения и распознавания надводных объектов, выполняемого по всей области изображения (т.е. полнокадрового), выполнено обучение искусственной нейронной сети по подготовленной базе данных образов типовых объектов. Полученный алгоритм протестирован авторами на валидационном наборе данных, произведена оценка качества его работы с помощью различных метрик, а также оценена производительность алгоритма. Сделаны выводы о необходимости расширения собранной базы данных образов типовых объектов, предложены дальнейшие шаги по повышению точности разработанного программно-алгоритмического комплекса и его внедрению в состав перспективной судовой оптоэлектронной системы технического зрения.

Безэкипажное судовождение; автоматическое обнаружение и распознавание; искусственная нейронная сеть; базы данных образов.

V.A. Bondarenko, V.A. Pavlova, V.A. Tupikov, N.G. Holod

REALTIME NEURAL NETWORK ALGORITHM FOR FULL-FRAME MARINE SURFACE OBJECTS RECOGNITION

The article explores modern neural network architectures for the automatic detection and recognition of marine surface objects and obstacles of given classes throughout the full image area, applicable for execution in real or near real time on an optoelectronic vision system to automate and improve the safety of civil marine navigation. A formal statement of the problem of automatic detection of objects on images is given. The state-of-the-art algorithms for detecting objects in images based on use of artificial convolutional neural networks were reviewed, their comparison was made and a reasonable choice was made in favor of the most efficient neural

network architecture in terms of computational complexity to recognition accuracy. The subject area is studied, as well as publicly available databases of surface objects suitable for use in the training of algorithms using artificial neural networks. The article concluded that there is insufficient labeled data for training neural network algorithms, as a result of which the authors independently collected research images and video sequences, prepared and labeled the collected data containing surface marine objects and other obstacles that represent a navigation hazard for ships. Based on the selected neural network architecture, a new neural network algorithm for automatic full-frame detection and recognition of surface objects was developed, and an artificial neural network was trained using the prepared database of images of typical objects. The resulting algorithm was tested by the authors on a validation data set, the quality of its work was estimated using various metrics, and the algorithm's performance was measured. Conclusions are made about the necessity to expand the collected database of images of typical marine objects, further steps are proposed to improve the accuracy of the developed software and algorithmic complex and its implementation to be used in a marine optoelectronic machine vision system for automation and improving the safety of civil navigation.

Unmanned marine navigation; automatic detection and recognition; artificial neural network; image database.

Введение. В настоящее время активно развивается отрасль морских перевозок, в частности за счет увеличения грузооборота во многих значимых морских торговых путях. Дальнейшему расширению морских грузоперевозок может способствовать снижение издержек путем уменьшения численности экипажа судов.

Поэтому становятся особо востребованными системы, обеспечивающие возможность автоматического управления судами и возможность дистанционного управления судами из берегового центра. Важной частью подобных систем является система, позволяющая передавать информацию об окружающих морское судно объектах в систему автоматического управления движением судна.

Задача создания такой системы является нетривиальной, поскольку, во-первых, подобная система должна иметь высокую скорость работы и не допускать задержек, а во-вторых, должна обеспечивать высокую надежность распознавания объектов, представляющих навигационную опасность для морских судов.

Среди алгоритмов детектирования объектов на изображении особо выделяются искусственные свёрточные нейронные сети (ИСНС) [1, 2], которые на данный момент являются наилучшими моделями для решения подобного типа задач с точки зрения точности распознавания. Кроме того, нейронные сети допускают эффективную реализацию с использованием систем массового параллелизма на GPU и FPGA.

Данная работа посвящена построению прототипа детектора надводных объектов на изображениях с помощью искусственной свёрточной нейронной сети распознавания по всей области изображения (полнокадрового).

Формальная постановка задачи. Пусть имеется изображение I . Алгоритм распознавания должен, получив на вход данное изображение, предоставить на выходе n последовательностей вещественных чисел

$$(x_1^j, y_1^j, x_2^j, y_2^j, c_1^j, \dots, c_i^j, \dots, c_k^j),$$

где n – количество обнаруженных объектов на изображении, $1 \leq j \leq n$ – номер текущего распознанного объекта, x_1^j, y_1^j – координаты левой верхней вершины прямоугольника, ограничивающего объект (bounding box), x_2^j, y_2^j – координаты его правой нижней вершины, k – количество классов объектов, которые способна обнаруживать нейронная сеть, c_i^j – оценка вероятности того, что j -ый объект принадлежит классу с номером i .

В данной работе в качестве алгоритмов рассматриваются только искусственные свёрточные нейронные сети. Для того, чтобы данные алгоритмы смогли работать, необходимо обучить их на некоторой обучающей выборке X , для каждого

изображения $I \in X$ известны координаты ограничивающих прямоугольников для всех объектов интереса, присутствующих на нем. Создание данной выборки является одним из самых важных и сложных вызовов, встающих при обучении искусственных нейронных сетей. Процесс создания такой выборки для данной задачи будет подробно рассмотрен ниже.

Обзор литературы. Существующие архитектуры свёрточных нейронных сетей для обнаружения объектов на изображениях можно разделить на две категории: одноэтапные (one-stage) и двухэтапные (two-stage).

Двухэтапные нейросетевые алгоритмы детектирования объектов на изображениях включают в себя два этапа.

Первый этап заключается в поиске подозрительных зон на изображении, т. е. зон, возможно содержащих интересующие нас объекты. Данный этап может происходить без использования нейронных сетей с помощью информации о контрасте, по ключевым точкам или перебирая все возможные положения объекта с помощью процедуры selective search. Однако зоны, полученные вышеперечисленными методами, зачастую имеют очень низкое качество в том смысле, что много областей либо содержат слишком большое количество фона, либо содержат только небольшую часть объекта, либо содержат более одного объекта. Поэтому более предпочтительно на данном этапе использовать свёрточные нейронные сети, не содержащие полносвязных слоев (fully convolutional).

Второй этап заключается в классификации зон, найденных на первом этапе. На данном этапе для классификации всегда используются обычные свёрточные искусственные нейронные сети.

Среди двухэтапных алгоритмов детектирования объектов на изображении особо известны Fast-RCNN [3] и Faster-RCNN [4].

Fast-RCNN представляет собой свёрточную искусственную нейронную сеть, включающую в себя как детектор подозрительных зон, так и классификатор найденных объектов. При этом детектирующая сеть является частью классифицирующей сети, поэтому нет необходимости многократного запуска нейронной сети на одном изображении, достаточно лишь одного запуска. Подозрительные зоны находятся на основе откликов нейронной сети на глубоких слоях с помощью процедуры selective search. Весь алгоритм обучается совместно как единая сеть. Данный алгоритм работает существенно быстрее, чем наивные способы детектирования объектов с помощью исчерпывающего поиска, однако время работы остается неприемлемо большим.

Faster-RCNN представляет собой усовершенствование алгоритма Fast-RCNN, призванное решить проблему определения подозрительных зон. Данная архитектура содержит специальный модуль, отвечающий за обнаружение подозрительных зон, который называется Region Proposal Network (RPN). Этот модуль получает на вход карту признаков и для каждой позиции определяет координаты нескольких прямоугольников фиксированного размера, которые используются в качестве подозрительных зон в детекторе. Такие прямоугольники называют якорями (anchors). Детектор представляет собой сеть Fast-RCNN. При этом RPN и Fast-RCNN имеют общие свёрточные слои, что позволяет ускорить обработку изображений.

Для обучения Faster-RCNN используется специальная процедура, состоящая из 4 этапов:

1. Обучается RPN для обнаружения подозрительных зон.
2. Обучается Fast-RCNN с использованием подозрительных зон, которые выдает RPN.
3. RPN переинициализируется весами, полученными при обучении Fast-RCNN. При этом, общая часть двух сетей замораживается.

4. С фиксированными общими слоями окончательно дообучается Fast-RCNN.

Причина введения такой сложной процедуры обучения заключается в том, что стандартная процедура, выделяющая область для классификатора, не является дифференцируемой по декартовым координатам, из-за чего при совместном обучении веса RPN при настройке не будут учитывать направление сдвига координат прямоугольника подозрительной области.

Данные модификации позволили увеличить точность детектирования объектов, а также достичь скорости обработки изображений, равной пяти кадрам в секунду (с применением GPU).

Одноэтапные нейросетевые алгоритмы детектирования объектов на изображении не включают в себя стадию поиска подозрительных зон на изображении, а сразу нацелены на обнаружение объектов. Преимуществом данного вида алгоритмов является их простота и относительно высокая скорость работы, а среди их недостатков можно отметить более низкую точность детектирования объектов по сравнению с двухэтапными алгоритмами, а также меньшую гибкость алгоритма.

Самыми известными представителями данного вида алгоритмов являются архитектуры Yolo [5] и Single Shot detector (SSD) [6].

Детектор Yolo является одним из первых одноэтапных детекторов объектов на изображении, при этом он постоянно модернизировался, поэтому существует три версии этого алгоритма: v1, v2 и v3. На входном изображении наносилась сетка с фиксированным заранее размером ячейки и выбиралось максимальное число B объектов, которые могут присутствовать внутри ячейки. Искусственная нейронная сеть предсказывает для каждой ячейки $4B$ чисел – координаты прямоугольника объекта, центр которого лежит в этой ячейке, значение, определяющее вероятность того, что в данной ячейке присутствует объект, а также по C чисел для каждого объекта – вероятности того, что в ячейке присутствует объект i -го класса при условии, что какой-либо объект в ячейке присутствует (здесь C – количество классов, которые может распознавать детектор).

Дальнейшие версии Yolo содержат модификации, призванные повысить точность автоматического обнаружения объектов и стабильность обучения искусственной нейронной сети. В частности, начиная со второй версии для определения размеров прямоугольников используются заранее созданные шаблонные прямоугольники – якоря. Кроме того, размер входных изображений увеличился и произошли изменения в архитектуре сети, такие как отказ от полносвязных слоев в пользу полносверточной искусственной нейронной сети и добавление слоев батч-нормализации [7]. Также были приняты меры для повышения устойчивости алгоритма к изменениям масштаба объектов.

Детектор SSD основан на идее детектора MultiBox [8], которая заключается в предсказании ограничивающих прямоугольников в разных масштабах. Якоря для SSD выбираются вручную, что позволяет избежать этапа предобучения якорей и позволяет алгоритму работать при любых входных данных. Многомасштабные карты признаков позволяют существенно увеличить точность обнаружения и распознавания объектов, что является большим преимуществом по сравнению с первыми версиями Yolo.

В табл. 1 представлено сравнение современных нейросетевых архитектур полнокадрового обнаружения и распознавания.

Таблица 1

Сравнение современных архитектур полнокадрового распознавания объектов

Ранг	Метод	Скорость (кадров в сек.)	Средняя точность (%)	Название публикации	Год
1	2	3	4	5	6
1	CenterNet ResNet-18	142	28.1	Objects as Points	2019
2	TTFNet	54.4	35.1	Training-Time-Friendly Network for Real-Time Object Detection	2019
3	CenterNet DLA-34	52	37.4	Objects as Points	2019
4	YOLOv3-320	45	28.2	YOLOv3: An Incremental Improvement	2018
5	YOLOv3-418	34	31.0	YOLOv3: An Incremental Improvement	2018
6	CornerNet-Squeeze	33	34.4	CornerNet-Lite: Efficient Keypoint Based Object Detection	2019
7	SSD512-HarDNet85	32	35.1	HarDNet: A Low Memory Traffic Network	2019
8	RefineDet320 + VoVNet-57	21.2	33.9	An Energy and GPU-Computation Efficient Backbone Network for Real-Time Object Detection	2019
9	YOLOv3-608	20	33	YOLOv3: An Incremental Improvement	2018
10	CenterNet Hourglass-104	14	40.3	Objects as Points	2019
11	NAS-FPNLite MobileNetV2 (7 @ 64)	н/д	25.7	NAS-FPN: Learning Scalable Feature Pyramid Architecture for Object Detection	2019

Применяемый подход. В рамках данной работы для детектирования объектов на изображении использовалась искусственная нейронная сеть архитектуры CenterNet [9]. Данная нейронная сеть относится к классу одноэтапных алгоритмов детектирования объектов. В отличие от многих других детекторов, CenterNet не использует наборы якорей, а обучение признаку размера объекта происходит с помощью регрессии. Положение объектов определяется с помощью предсказания карты ключевых точек, каждая ключевая точка представляет собой центр некоторого объекта. В отличие от других алгоритмов обнаружения объектов, CenterNet не позволяет предсказывать более одного объекта на ячейку карты признаков, поэтому при неудачном выборе размеров выходной карты признаков, некоторые объекты не смогут быть распознанными.

Преимуществом данного алгоритма являются высокая скорость работы, даже по сравнению с другими одноэтапными детекторами, которая, в частности, достигается благодаря тому, что CenterNet позволяет избежать довольно затратной и сложно распараллеливаемой операции постобработки результата Non-Maxima Suppression (NMS), заменяя её еще более простой и быстрой операцией взятия локальных максимумов карты ключевых точек. В связи с вышеперечисленными доводами, было принято решение использовать именно этот нейросетевой алгоритм обнаружения объектов для детектирования надводных объектов в реальном времени.

Подготовка обучающей выборки. Одним из самых важных этапов работы с задачами машинного обучения является подготовка данных для обучения. От качества этих данных очень сильно зависит качество будущей модели, наличие выбросов и некачественная разметка способны подорвать качество автоматического обнаружения настолько, что даже выбор самой лучшей модели не позволит компенсировать низкое качество данных.

В настоящее время существует множество открытых баз данных изображений, содержащих данные для различных задач. В частности, для задачи детектирования судов и других надводных объектов существуют несколько наборов данных, такие как Seaships dataset и singapore maritime dataset.

Seaship Dataset [10] представляет собой набор из 31455 изображений, содержащих шесть основных типов морских судов (перевозчик руды, насыпной грузовой, грузовой корабль, контейнеровоз, рыболовное судно и пассажирское судно). Изображения представляют собой нарезку некоторого числа видеозаписей, снятых с камер, расположенных на берегу реки. Запись происходила в разное время суток с разных мест, однако все корабли расположены примерно с одного ракурса. Однако в открытом доступе находится лишь небольшая часть этого набора данных, которая включает в себя семь тысяч изображений.

База Singapore maritime dataset [11] содержит около 80 видеозаписей морской обстановки, часть из которых снята с палубы судна, остальные сняты с берега. Записи сняты в разное время суток и в разных погодных условиях, однако длительность каждой видеозаписи невелика и составляет порядка одной минуты. Все видеозаписи имеют высокое разрешение (1920x1080). Часть видеозаписей была сформирована в ближнем инфракрасном диапазоне, что может быть полезно для распознавания морских объектов в сложных погодных условиях. Однако на большинстве фрагментов видеозаписей присутствуют лишь минимальные изменения между соседними кадрами, а также для некоторых видеозаписей отсутствует разметка.

В связи с тем, что ни один открытый набор данных не удовлетворяет требованиям, предъявляемым в данной работе, было принято решение подготовить свой набор данных, взяв за основу вышеперечисленные открытые наборы данных, добавив к ним еще около 100 видеозаписей морской обстановки, большая часть из

которых была получена из открытых источников, остальные были сняты вручную. Половина из них представляет записи, снятые с берега, другая половина – с борта крупного морского судна или катера.

После нарезки данных видеозаписей получилось более 10000 изображений, после объединения с данными из других наборов суммарно получилось около 40000 изображений.

Следующим шагом подготовки данных стала разметка еще неразмеченных данных и унификация разметки, т. е. приведение разметок всех частей набора к одному формату и одному списку классов.

Было принято решение распознавать пять классов надводных объектов: малое судно, буй, крупногабаритное судно, военное судно, льдины, а также был введен отдельный класс для сложно идентифицируемых надводных объектов (прочие помехи).

Для осуществления разметки подготовленных данных (т.е. выделения объектов на изображениях и маркирования их меткой класса) было принято решение воспользоваться одним из сервисов автоматизации удалённого выполнения заданий. На данный момент существует несколько подобных сервисов, например Amazon Mechanical Turk [12] или его отечественный аналог – Яндекс. Толока [13]. Выбор был сделан в пользу отечественного сервиса. Данный сервис позволяет удалённо выдавать задания пользователям для выполнения за определенную плату. Имеется набор шаблонов для заданий и возможность реализовать интерфейс задания с помощью языка программирования javascript.

Шаблонное задание для выделения объектов на изображении имеет минимальный функционал и оказалось не очень удобным в рамках данной задачи. Поэтому было принято решение добавить дополнительные возможности, а именно:

1. Окно выбора класса объекта.
2. Дополнительные горячие клавиши вдобавок к базовым.
3. Возможность перемещать прямоугольники с помощью мыши и клавиш-стрелок на клавиатуре.
4. Возможность переносить разметку с одного изображения на следующие.

Так как исходные данные представляли собой видеопоследовательность, то часто соседние изображения отличаются незначительно. Поэтому можно разметить вручную только одно изображение, перенести разметку на остальные, и при необходимости откорректировать её.

Запуск задания происходил в два этапа: на первом этапе задание запускалось в тестовом режиме. На этом этапе происходила отладка функционала, а также приведение всех размеченных наборов данных к требуемой классификации. В течение месяца задания выполняла контрольная группа из 5 человек. В ходе тестирования пользователи из контрольной группы разметили 31550 изображений в течение месяца.

Полученная база данных образов надводных объектов состоит из 42220 изображений, содержащих около 254000 объектов, из них 36440 малых судов, 6822 буюв, 175608 больших судов, 4819 военных судов.

Обучение искусственной нейронной сети. Для проведения экспериментов, собранный набор данных был разделен на три части, одна из которых использовалась для обучения нейронной сети, вторая – для валидации и настройки параметров, а третья использовалась при финальном тестировании. Разделение было проведено таким образом, чтобы каждая часть разбиения содержала изображения из всех наборов данных, входящих в состав данного набора.

Для обучения искусственной нейронной сети была выбрана библиотека PyTorch [14]. Первоначально была реализована функция подготовки изображений, которая включает в себя считывание изображений, аугментацию (добавление в

выборку искусственно сгенерированных изображений с наложением искажений и шумов) и вычисление эталонных карт центров и размеров объектов. В качестве видов аугментации использовались зеркальное отражение, вырезание случайной области изображения, содержащей некоторый объект, зашумление гауссовским шумом, изменения контраста и яркости.

Карты центров объектов представляют собой изображения, в которых единичную яркость имеют только пиксели с координатами, соответствующими центру некоторого объекта данного класса. Количество таких карт для изображения равно количеству классов для распознавания. Для более стабильного обучения применяется неравномерное гауссово размытие карт признаков с помощью прямоугольного ядра, зависящего от размеров объекта. В отличие от подхода из оригинальной статьи, который заключался в размытии с квадратным окном, данное представление карты центров объектов лучше работает для объектов с большим соотношением сторон. Подобные объекты широко представлены в обучающей выборке.

Функция потерь для данной нейронной сети состоит из нескольких слагаемых. Первое слагаемое отвечает за качество детектирования центров объектов. Оно представляет собой модифицированный focal loss [15] и имеет вид:

$$L_k = \frac{-1}{N} \begin{cases} (1 - \widehat{Y}_{xyc})^\alpha \log(\widehat{Y}_{xyc}) & \text{if } Y_{xyc} = 1 \\ (1 - \widehat{Y}_{xyc})^\beta (\widehat{Y}_{xyc})^\alpha & \\ \log(1 - \widehat{Y}_{xyc}) & \text{otherwise} \end{cases}$$

где Y_{xyc} – Истинная карта центров объектов, \widehat{Y}_{xyc} – карта предсказанных центров объектов. Второе слагаемое отвечает за качество определения центров объектов и представляет собой L1 loss, т.е. средний модуль разницы между истинными размерами объектов и предсказанными. Так как большая часть истинной маски размеров объектов заполнена нулями, функция потерь считается не по всей маске, а только по тем позициям, которые являются центром некоторого объекта. Это позволяет избежать деградации сети и предсказания нулевых размеров для всех объектов.

Для повышения скорости работы сети размер карт признаков в 4 раза меньше, чем размер входного изображения, что с одной стороны значительно уменьшает объем вычислений, а с другой стороны не влияет на качество обнаружения объектов, поскольку маловероятно наличие объектов, расстояние между центрами которых меньше четырех пикселей. В оригинальной статье также сеть обучалась предсказывать разницу между истинным центром объекта и положением пикселя, который отвечает за её центр в карте признаков. Однако в данной работе было принято решение от этого отказаться, поскольку использование данной величины лишь незначительно повышает точность распознавания.

В ходе экспериментов были обучены две искусственные свёрточные нейронные сети. Они отличались в основном своими кодерами – слоями, извлекающими признаки с изображений. В одной сети в качестве кодера использовалась архитектура resnet18 [16], архитектура, основанная на residual связях, которые позволяют сети иметь очень большую глубину. Во второй сети использовалась MobileNetv2 [17] – легковесная архитектура, основанная на операции сепарабельной свертки, позволяющей ускорить вычисления и уменьшить количество параметров сети.

В качестве декодера, т. е. той части сети, которая восстанавливает карты центров и размеров объектов по признакам, в обоих вариантах сетей использовалась последовательность из нескольких деформируемых свёрточных слоев с билинейной интерполяцией для повышения пространственных размеров объектов. Деформируемые свёрточные слои – это слои, которые имеют возможность выучить форму своего рецептивного поля, в отличие от обычных свёрточных слоев, в которых она всегда имеет фиксированный размер и форму (квадрат).

Обучение обоих вариантов искусственной нейронной сети производилось в течение 100 эпох (полных циклов обучения по всем данным). Сеть с resnet18 была инициализирована весами сети такой же архитектуры, обученной на открытом наборе данных Coco [18]. В течение первой эпохи в ней обучались только слои, непосредственно восстанавливающие карты центров и размеров объектов, остальные слои были заморожены.

У сети с mobilenet v2 кодер инициализировался весами модели, предобученной на наборе данных ImageNet [19], остальные веса инициализировались случайным образом. В течение первой эпохи веса кодера были заморожены.

В качестве оптимизатора использовался алгоритм Adam [20], позволяющий автоматически корректировать скорость обучения (learning rate) в процессе обучения с помощью накопления информации о градиентах в предыдущие итерации. Базовый learning rate был выбран равным 0.0003, и он уменьшался в 4 раза каждые 20 эпох.

График функции потерь (ошибки) на валидационной выборке представлен на рис. 1.

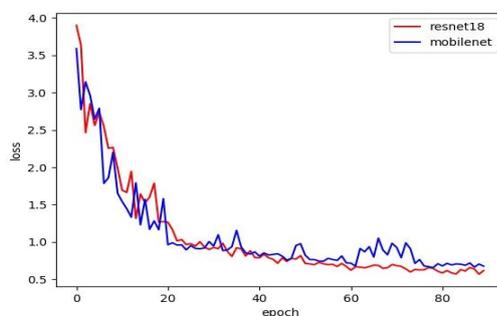


Рис 1. График функции потерь для двух вариантов искусственных сверточных нейронных сетей

В качестве метрик оценки качества обнаружения объектов использовались Mean Average Precision (mAP) и Mean average Recall (mAR).

Mean average precision представляет собой усреднение метрики average precision (AP) для всех порогов IoU от 0.5 до 1 с заданным шагом:

$$mAP = \frac{1}{|iou|} \sum_{thr \in iou} AP(thr).$$

AP для фиксированного порога thr вычисляется следующим образом: для каждого найденного объекта происходит поиск сопоставления среди истинных объектов. Соответствие объявляется истинным, если отношение площади пересечения к площади объединения (Intersection over Union, IoU) предсказанного и истинного объектов больше порога thr. Соответствия сортируются согласно убыванию уверенности сети в предсказанном объекте. Для любого набора из первых k соответствий можно посчитать точность (precision) и полноту (recall):

$$precision = \frac{TP}{TP + FP}$$

$$recall = \frac{TP}{TP + FN}$$

где TP – число верно определенных объектов, FP число ошибочно найденных объектов, FN – число объектов, которые не были найдены. С ростом k полнота монотонно увеличивается, а точность может как увеличиваться, так и уменьшаться. AP определяется как площадь под графиком, отражающим зависимость точности от полноты, и имеет вид:

$$AP = \int_0^1 precision(r)dr.$$

Mean Average Recall представляет собой среднее значение полноты при различных выборах порога для IoU, учитывая только те пороги, которые больше, чем 0.5

$$AP@[IoU = a:b] = 2 \int_a^b recall(IoU)dIoU.$$

Результаты тестирования полученных искусственных свёрточных нейронных сетей на тестовой выборке представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты тестирования полученных ИСНС

Оцениваемый параметр	ResNet18	MobileNet v2
$AP@[IoU=0.5:0.95]$	0.226	0.178
$AP@[IoU=0.5]$	0.645	0.494
$AP@[IoU=0.5:0.95]$ малые объекты	0.169	0.098
$AP@[IoU=0.5:0.95]$ большие объекты	0.304	0.276
$AR@[IoU=0.5:0.95]$	0.333	0.282
$AR@[IoU=0.5:0.95]$ малые объекты	0.223	0.141
$AR@[IoU=0.5:0.95]$ большие объекты	0.445	0.426
Скорость обработки (GeForce 1060 6GB)	36 к/сек	40 к/сек

Как видно, сеть с кодером ResNet18 работает ощутимо лучше, чем с MobileNet v2, при том, что скорость работы сетей примерно одинаковая. Также стоит отметить, что качество обнаружения малых объектов ниже, чем больших. На рис. 2 представлена генерируемая ИСНС карта предсказаний центров объектов в кадре, а на рис. 3 – результат обработки получаемых карт с выделением распознанных объектов.



Рис. 2. Генерируемая ИСНС карта предсказаний центров объектов в кадре

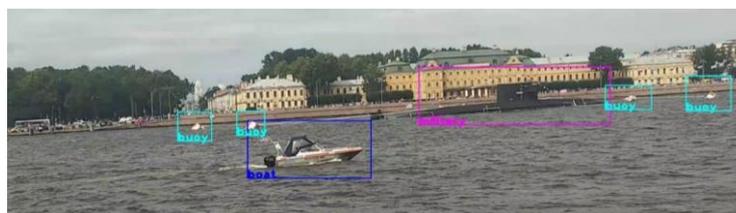


Рис. 3. Результат распознавания объектов в кадре (голубой прямоугольник – буи, синий – малые суда, фиолетовый – военные суда)

Заключение. Резюмируя изложенное, можно сделать следующие выводы.

Представленные алгоритмы обнаружения объектов на изображениях с помощью искусственных свёрточных нейронных сетей доказали свою применимость в решении задач автоматического обнаружения и распознавания надводных объектов в реальном времени и их можно применять при разработке систем технического зрения перспективных систем автоматизации и повышения безопасности гражданского судоходства.

Скорость работы полученных искусственных нейронных сетей достаточна для того, чтобы обрабатывать более 30 кадров в секунду, при условии наличия вычислителя с возможностями массового параллелизма (например GPU или ПЛИС).

Достигнутые точность и полнота распознавания достаточно велики, но не являются предельными, так как полученная база размеченных образов обладает недостаточным качеством разметки ввиду того, что её проводили необученные пользователи. Повысив качество разметки, можно увеличить точность и значительно повысить эффективность автоматического обнаружения и распознавания.

В качестве дальнейших шагов по улучшению алгоритма (помимо повышения объема базы данных образов и качества её разметки) планируется реализовать возможность анализа нескольких предыдущих кадров видеопоследовательности, что позволит улучшить качество распознавания мелких (менее 32x32 пикселей) объектов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. MIT Press, 2016, 781 p.
2. Deng L. and Deep D.Yu. Learning: Methods and Applications, *Foundations and Trends in Signal Processing*, 2013, Vol. 7, No. 3–4, pp. 197-387.
3. Girshick R. Fast r-cnn, *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*, 2015, ppP. 1440-1448.
4. Ren S. et al. Faster r-cnn: Towards real-time object detection with region proposal networks, *Advances in neural information processing systems*, 2015, pp. 91-99.
5. Redmon J. et al. You only look once: Unified, real-time object detection, *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2016, pp. 779-788.
6. Liu W. et al. Ssd: Single shot multibox detector, *European conference on computer vision*, Springer, Cham, 2016, pp. 21-37.
7. Ioffe S., Szegedy C. Batch normalization: Accelerating deep network training by reducing internal covariate shift, *arXiv preprint arXiv:1502.03167*, 2015.
8. Szegedy C. et al. Scalable, high-quality object detection, *ArXiv abs/1412.1441*, 2015.
9. Zhou X., Wang D., Krähenbühl P. Objects as points, *ArXiv abs/1904.07850*, 2019.
10. Shao Z. et al. Seaships: A large-scale precisely annotated dataset for ship detection, *IEEE Transactions on Multimedia*, 2018, Vol. 20, No. 10, pp. 2593-2604.
11. Prasad D.K. et al. Video processing from electro-optical sensors for object detection and tracking in a maritime environment: a survey, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, Vol. 18, No. 8, pp. 1993-2016.
12. Crowston K. Amazon Mechanical Turk: A Research Tool for Organizations and Information Systems Scholars. In: Bhattacharjee A., Fitzgerald B. (eds) *Shaping the Future of ICT Research. Methods and Approaches*. IFIP Advances in Information and Communication Technology. Vol. 389. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012.
13. Yandex Toloka url: <https://toloka.yandex.ru> (accessed 18 February 2020).
14. Paszke A., Gross S., Massa F. and others. PyTorch: An Imperative Style, High Performance Deep Learning Library, *Advances in Neural Information Processing Systems 32*, Curran Associates, Inc., 2019, pp. 8024-8035.
15. Lin T.Y. et al. Focal loss for dense object detection, *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*, 2017, pp. 2980-2988.

16. He K. et al. Deep residual learning for image recognition, *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2016, pp. 770-778.
17. Sandler M. et al. Mobilenetv2: Inverted residuals and linear bottlenecks, *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2018, ppP. 4510-4520.
18. Lin T., Maire M., Belongie S.J., Bourdev L.D., Girshick R.B., Hays J., Perona P., Ramanan D., Dollár P. and Zitnick C.L. Microsoft COCO: Common Objects in Context, 2014. DOI: 10.1007/978-3-319-10602-1_48.
19. Deng J., Dong W., Socher R., Li L., Kai Li and Li Fei-Fei. ImageNet: A large-scale hierarchical image database, *2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Miami, FL, 2009*, pp. 248-255.
20. Kingma D.P., Ba J. Adam: A method for stochastic optimization, *arXiv preprint arXiv:1412.6980*, 2014.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. П.К. Шульженко.

Тупиков Владимир Алексеевич – АО «Научно-производственное предприятие «Авиационная и морская электроника»; e-mail: tupikov@nppame.ru; 198097, г. Санкт-Петербург, ул. Маршала Говорова, 29, лит. «О», а/я 51; тел.: 88123274667; д.т.н.; профессор; зам. ген. директора; директор научно-производственного комплекса робототехнических систем специального назначения (НПК РТС СН).

Павлова Валерия Анатольевна – e-mail: pavlova@nppame.ru; к.т.н.; зам. директора НПК РТС СН по НИОКР.

Бондаренко Владимир Александрович – e-mail: bondarenko@nppame.ru; начальник центра средств интеллектуальной обработки изображений.

Холод Николай Григорьевич – e-mail: nikkholod@mail.ru; научный сотрудник.

Tupikov Vladimir Alekseevich – SPE "Research and Production Enterprise "Air and Marine Electronics"; e-mail: tupikov@nppame.ru; 198097, Saint Petersburg, street Marshal Govorov, 29, lit. "O", P.O.B 51; phone: 88123274667; dr. of eng. sc.; professor; Deputy Director General; Director of Research and production complex of special purpose robotic systems.

Pavlova Valeria Anatolyevna – e-mail: pavlova@nppame.ru; cand. of eng. sc.; Deputy Director of research at Research and production complex of special purpose robotic systems.

Bondarenko Vladimir Alexandrovich – e-mail: bondarenko@nppame.ru; chief of intellectual image processing center.

Holod Nicolai Grigorievich – e-mail: nikkholod@mail.ru; researcher.

УДК 004.896

DOI 10.18522/2311-3103-2020-1-199-218

В.П. Андреев, В.Л. Ким, С.Р. Эприков

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ ФРЕЙМВОРК ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МОДУЛЬНЫХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ С ИЕРАРХИЧЕСКОЙ АРХИТЕКТУРОЙ*

В настоящей работе рассматриваются основные проблемы, связанные с необходимостью интеграции разнородных робототехнических компонентов в единую систему при одновременном росте сложности навигационных алгоритмов мобильных роботов. Цель данной работы – представить иерархическую модульную архитектуру для реконфигурируемых мобильных роботов в качестве решения поставленных проблем. В этой архитектуре мобильный робот рассматривается как комбинация модулей, которые в свою очередь состоят из более простых блоков – субмодулей. Каждый субмодуль включает в себя мало-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №19-07-00892а).

мощный микроконтроллер и отвечает только за базовые функции. Набор submodule обра- зует модуль – транспортную платформу, ногу робота, манипулятор и т.д. Кроме того, одной из основных задач проекта является предоставление фреймворка, основанного на этой архитектуре, для быстрого прототипирования роботов из унифицированных моду- лей. В статье описываются изготовленные прототипы модулей, кратко рассматривается протокол межмодульного взаимодействия submodule, объединённых CAN-шиной. Пред- ставлены результаты экспериментов по тестированию протокола и приводится их ана- лиз. Показана работоспособность предложенного решения, ограничения и краткий план дальнейших действий по реализации проекта.

Модульный робот; мобильный робот; распределённое управление; шинная топология; протокол коммуникации; CAN; компьютерные сети.

V.P. Andreev, V.L. Kim, S.R. Eprikov

HARDWARE-SOFTWARE FRAMEWORK FOR DEVELOPMENT OF MODULAR MOBILE ROBOTS WITH HIERARCHICAL ARCHITECTURE

In this paper, we consider the main problems associated with the need to integrate various robotic components into a single system while increasing the complexity of the navigation algo- rithms of mobile robots. The work aims to present a hierarchical modular architecture for recon- figurable mobile robots as a solution to the problems posed. In this architecture, a mobile robot is considered as a combination of modules, which in turn consist of simpler blocks - submodules. Each submodule includes a low-power microcontroller and is responsible only for the basic func- tions. A set of submodules forms a module - a transport platform, a robot leg, a manipulator, etc. Besides, one of the main objectives of the project is to provide a framework based on this architec- ture for rapid prototyping of robots from unified modules. The article describes the manufactured prototypes of the modules, briefly discusses the protocol of intermodule interaction of submodules connected by a CAN bus. The results of experiments on testing the protocol are presented and their analysis is given. The efficiency of the proposed solution limitations and a short plan of fur- ther actions for the implementation of the project are shown.

Modular robot; mobile robot; distributed control; bus topology; communication protocol; CAN; computer networks.

1. Введение. Одним из наиболее распространённых подходов к проектированию технических устройств и обеспечения их универсальности является разделе- ние структуры технической системы на отдельные функциональные узлы – моду- ли. Модульный подход широко известен в автомобильной индустрии, станко- строении и компьютерной технике. Например, в компьютерах почти все основные компоненты стандартизованы, и интерфейсы для их связи хорошо проработаны. Благодаря этому почти любой опытный пользователь может собрать персональ- ный компьютер, используя совместимые компоненты-модули. В настоящее время модульные робототехнические системы активно развиваются, и они уже не огра- ничены лабораторными прототипами, но начинают появляться на рынке [1–2].

Модульный подход в мобильной робототехнике направлен на решение суще- ственной проблемы – обеспечение интеграции и интероперабельности широкого спектра аппаратных и программных компонентов конкретной робототехнической системы (РТС). Современные специалисты-робототехники сталкиваются с общей проблемой «изобретения велосипеда» – значительная часть времени тратится на интеграцию аппаратных/программных интерфейсов вместо реализации новых ал- горитмов.

Другая проблема заключается в том, что успешное выполнение роботами за- дач в реальных условиях требует от бортового компьютера выполнение большого числа математических вычислений с данными разных типов в реальном времени. Вычислительная нагрузка возрастает ещё больше при необходимости обработки видеопотоков и осуществления навигации с построением карты местности. Мо-

дульный подход к построению мобильных роботов может решить эту проблему, если вычисления, выполняемые на одном компьютере, будут распределены между вычислительными устройствами модулей.

Цель работы: представить аппаратно-программный фреймворк **ModRob** (ModRob framework) – иерархическую модульную архитектуру для мобильных роботов, позволяющую ускорить разработку РТС за счёт применения унифицированных компонентов (модулей). Предлагаемая архитектура является распределённой робототехнической системой с узлами, реализованными на встраиваемых вычислительных устройствах – микроконтроллерах или одноплатных компьютерах.

Статья организована следующим образом: в разделе 2 представлен краткий обзор аналогичных исследований, в разделе 3 подробно раскрывается предлагаемая модульная архитектура и основные виды разрабатываемых модулей, в разделе 4 кратко описан протокол межмодульного информационного взаимодействия и аппаратное обеспечение субмодулей, в разделе 5 описаны эксперименты и анализируются полученные результаты. В конце статьи приводятся выводы и заключение.

2. Обзор. Исследователи, занимающиеся модульными архитектурами роботов, стремятся достичь, в основном, двух целей:

1. Упростить работу других учёных и инженеров за счёт предоставления унифицированных робототехнических компонентов и/или универсальных программных интерфейсов. Как было отмечено ранее, сегодня имеется большое разнообразие несовместимых аппаратных и программных компонентов роботов, которые должны быть объединены в единую систему.

2. Разработка роботов для задач недетерминированного характера. Модульный подход позволяет создавать реконфигурируемые роботы, пригодные для выполнения миссий в обстановках с непредсказуемыми условиями.

Первая цель тесно пересекается с разработкой аппаратных и программных фреймворков, межплатформенного программного обеспечения (middleware) и операционных систем (ОС) для роботов (например, ROS). Фреймворки, межплатформенное программное обеспечение (ПО) и ОС преследуют одну цель – предоставить инструменты для быстрого прототипирования роботов. Проведённый аналитический обзор подобных систем показал, что большинство из них работает преимущественно с программным обеспечением роботов, не затрагивая аппаратную составляющую. Подробные обзоры существующих фреймворков уже опубликованы другими авторами, например [3]. Поэтому сконцентрируем наше внимание на исследованиях, включающих в себя не только программную, но и аппаратную часть модульных мобильных роботов.

В статье [4] представлена модульная мини робототехническая платформа AMiRo, в основе которой лежит идея распределения вычислительной нагрузки между различными модулями. Платформа содержит мощное аппаратное обеспечение и развитую открытую программную архитектуру. Стандартная конфигурация робота содержит три базовых модуля: *модуль движения* (управление движением, вычисление пройденного пути и т.п.), *модуль визуализации статуса и беспроводной связи*, а также *силовой модуль* (энергообеспечение). Модули имеют достаточно универсальный, но сложный электрический интерфейс: передача пяти различных уровней напряжения, поддержка 6 стандартов коммуникации (основной – CAN). Программная архитектура модулей достаточно нетривиальна, однако предоставляет широкие возможности для работы со сторонними приложениями. Тем не менее, добавление в систему модулей сторонних производителей может быть затруднено из-за многоуровневой архитектуры ПО и малых габаритов робота.

В работе [5] описывается набор модулей, преимущественно модульных приводов с последовательными упругими элементами, позволяющий ускорить разработку модульных *шагающих* роботов. Каждый модуль-привод управляет одним

бесщёточным двигателем постоянного тока по положению, скорости и моменту. Кроме приводных модулей есть также специализированные: сенсорные, модуль-шведское колесо, головной модуль. Все модули реализованы на микроконтроллерах серии ARM Cortex; межмодульное информационное взаимодействие осуществляется по сети с помощью семейства технологий Ethernet с использованием протоколов UDP/TCP. К достоинствам системы можно отнести распределённость вычислений, простоту реконфигурации, возможность подключения устройств сторонних производителей. Однако распределение вычислительных ресурсов выполняется лишь на нижнем (исполнительном) уровне модульной архитектуры системы управления робота, что не позволит решить проблему real time при усложнении целевой функции робота.

Интернациональный проект CLAWAR [6] был начат в 1997 году и координировался Университетом Портсмута. Проект CLAWAR разрабатывал концепцию функциональных модулей, требования и спецификацию к ним. Согласно концепции объектно-ориентированный подход использовался для методологии проектирования модульных компонентов. Проект описывает три основных типа модулей: человеко-машинный интерфейс, модули-актуаторы и сенсорные модули. По сравнению с другими подобными архитектурами Вирк Г.С. (Virk G.S.) представляет иерархическую модульную архитектуру: вся система разделяется на модули, которые в свою очередь разделяются на субмодули. Концепция CLAWAR достаточно перспективна, однако судя по информации из открытых источников, эта архитектура ещё не была реализована ни в одном из современных роботов.

В [7] представлена модульная архитектура для автономных мобильных роботов, основанная на так называемой «непрерывной» модульности аппаратного и программного обеспечения. Аппаратное обеспечение состоит из четырёх уровней: уровень движения, сенсорный уровень, актуаторный уровень и управляющий уровень. Межмодульная коммуникация в роботе основана на CAN-шине. Программная архитектура реализована на межплатформенном ПО MIRO. Эффективность роботов была показана на соревновании RoboCup 2003, для которого серия роботов была изготовлена меньше чем за год. Несмотря на наличие распределённых вычислений, авторы не раскрывают детали коммуникационного процесса между модулями, что не позволяет судить о наличии свойства реконфигурируемости с использованием модулей сторонних производителей.

Модульные реконфигурируемые антропоморфные роботы представлены в работах [8–10]. В [8] распределённые вычисления выполняются на функциональных модулях: модуль-голова, главный модуль, левая/правая рука, колёсный модуль. Авторы разработали собственный коммуникационный интерфейс реального времени Responsive Link для межмодульного взаимодействия. Кроме этого коммуникационный интерфейс также включает в себя два USB порта и порта IEEE 1394. Используя предложенную архитектуру, авторы изготовили реконфигурируемый антропоморфный робот. Основным недостатком системы заключается в необходимости использования специального встраиваемого процессора Responsive Processor, способного поддерживать интерфейс Responsive Link, что осложняет интеграцию компонентов сторонних производителей. В работе [9] предложен аналогичный подход к проектированию гуманоидного робота. Согласно этому подходу все модули являются полнофункциональными устройствами, причём модули способны взаимодействовать между собой, даже если на их вычислителях установлены различные операционные системы. Свойство достигается за счёт программной архитектуры и специальной архитектуры программного соединения, определяю-

шей 5 стандартов информационных моделей. Межмодульная коммуникация основана на TCP/IP и RS485. Хилд М. (Hild M.) и Спрангер М. (Spranger M.) также разработали модульный антропоморфный робот Myon с распределённой управляющей архитектурой DISTAL [10]. Основные особенности робота: автономная работа модулей и возможность реконфигурации даже при включённом роботе. Для межмодульного информационного взаимодействия авторы разработали две коммуникационные шины: Spinal Cord («спинной мозг») и Extended Spinal Cord (расширенный спинной мозг»). К недостаткам системы можно отнести отсутствие программного интерфейса между модулями, а также наличие распределённых вычислений лишь на уровне управления приводами.

Концепция модульного сервисного робота DRP I представлена в работе [11]. DRP I состоит из полнофункциональных модулей на одноплатных компьютерах и дополнительных электронных блоков для управления и тестирования. ПО каждого модуля состоит из уровня ОС, уровня виртуальной машины, прикладного программного интерфейса (API) и прикладного приложения. Межплатформенное ПО робота основано на IEEE 1394. Реализовано «горячее» подключение модулей робота с автоматической реконфигурацией навигационных алгоритмов. Несмотря на все достоинства представленной архитектуры, отсутствуют современные робототехнические решения, основанные на ней.

Группа исследователей в работе [12] представила парадигму построения распределённых архитектур систем управления мобильных роботов – ASEBA. ASEBA представляет собой полностью централизованную систему, состоящую только из микроконтроллеров, управляющих датчиками и приводами. Все модули (микроконтроллеры) объединены CAN-шиной. В ASEBA реализовано управление по событиям за счёт виртуальных машин, запускаемых на микроконтроллерах. С нашей точки зрения данная архитектура не обеспечит работу РТС в реальном масштабе времени в случае выполнения даже не очень сложных работ.

В статье [13] представлена система R2P, которая имеет сходство с нашим проектом. R2P – открытый аппаратно-программный фреймворк, позволяющий комбинировать различные модули в режиме «plug-and-play». Модули R2P реализованы на микроконтроллерах ARM Cortex-M3, взаимодействующих по шине CAN с использованием авторского протокола RTCAN. Недостатком RTCAN является фрагментация всех сообщений, что может приводить к коллизиям CAN-фреймов. Также из приведённого в статье материала неясно, по какому принципу тот или иной программный узел R2P должен быть развёрнут на аппаратном модуле, что не приводит к пониманию требований к вычислительным ресурсам модулей.

Имеющий сходства с R2P фреймворк RoboCAN [14] также представляет собой модульную архитектуру на CAN-шине. RoboCAN в свою очередь является частью фреймворка RIDE. Все модули основаны на микроконтроллерах и поддерживают режим «plug-and-play». Стоит отметить, что в RoboCAN используется собственный протокол, который незначительно лучше общеизвестного CANOpen: полоса пропускания коммуникационного канала в RoboCAN лишь на 25% меньше чем в CANOpen (при неработающих приводах). Также нет ясности относительно устойчивости данного протокола к образованию коллизий и относительно достаточности его пропускной способности для обеспечения межмодульного информационного взаимодействия при различных режимах работы РТС.

В статье [15] представлен набор для прототипирования модульных мобильных роботов преимущественно в образовательных целях. Набор включает различные блоки-модули: управляющий модуль, блок питания, приводные модули, мо-

дули передачи данных, редукторы и т.д. Модули соединяются по шине RS485 либо напрямую к управляющему модулю. Модули набора имеют встроенные электронные/электромеханические устройства (электронная плата модуля не отвязана от исполнительного устройства). Такой подход позволяет легко собирать мобильные роботы, однако ограничивает область применения набора: например, если пользователю понадобятся более мощные двигатели или иные датчики.

Амбициозный проект H-ROS представлен в статье [16]. Цель проекта – разработать универсальный аппаратно-программный фреймворк для обеспечения интеграции и интероперабельности различных компонентов роботов. H-ROS основан на ROS, но использует функциональность новейшей ОС для роботов – ROS 2. Физический уровень межмодульной коммуникации базируется на EtherCAT. Над физическим уровнем располагается ядро Linux с патчем (patch) реального времени PREEMPT_RT. К недостаткам системы можно отнести необходимость использования достаточно мощного в вычислительном плане одноплатного компьютера в *каждом* модуле сети (для развёртывания Linux и ROS 2), что избыточно для модулей, выполняющих низкоуровневое управление исполнительными устройствами. Кроме того, для межмодульного информационного взаимодействия используется достаточно дорогая технология EtherCAT. В настоящий момент, проект H-ROS разработчиками остановлен.

В работе [17] представлена концепция модульной архитектуры роботов на базе так называемого Модуля Оператора-Контроллера (Operator-Controller Module – OCM). Новизна концепции заключается в модульной иерархической структуре робота и организации распределённых вычислений на локальной части (сам робот) и удалённой части (облачные вычисления). Удалённая часть значительно увеличивает вычислительную мощность системы для комплексных алгоритмов без повышения энергопотребления робота, однако существенно снижает автономность мобильной части и надёжность РТС. Авторы разработали прототип мобильного робота с распределённой системой управления, включающей в себя два одноплатных компьютера Raspberry Pi, Arduino Mega, платформу STM32 Discovery и ПЛИС ZynqBerry TE0726-03M. Все устройства кроме ПЛИС объединены CAN-шиной. Отметим, что эта архитектура никак не унифицирует компоненты (модули) робота, что может усложнять реконфигурацию.

Краткий анализ представленных работ показал, что далеко не все архитектуры и фреймворки развиты настолько, чтобы обеспечить надёжным инструментом других специалистов для быстрого прототипирования робототехнических решений. При этом, как правило, реконфигурируемость обеспечивается в пределах предлагаемого комплекта модулей, что не позволяет в полной мере реализовать возможность применения модулей сторонних производителей. Кроме того, большая часть работ рассматривает распределённые вычисления только на низком уровне (приводном), в то время как реализация распределённых вычислений наиболее сложных алгоритмов управления и комплексирования данных практически не рассматривается. Также отметим, что некоторые из представленных систем требуют использования мощных одноплатных компьютеров, что отчасти ослабляет положительный эффект модульного подхода.

3. Иерархическая модульная архитектура мобильных роботов. В рамках данного проекта предлагается использование пирамидальной модульной архитектуры для мобильных роботов различного назначения [18]. На рис. 1 показана схема такой обобщённой иерархической структуры информационно-измерительной и управляющей системы (ИИУС).

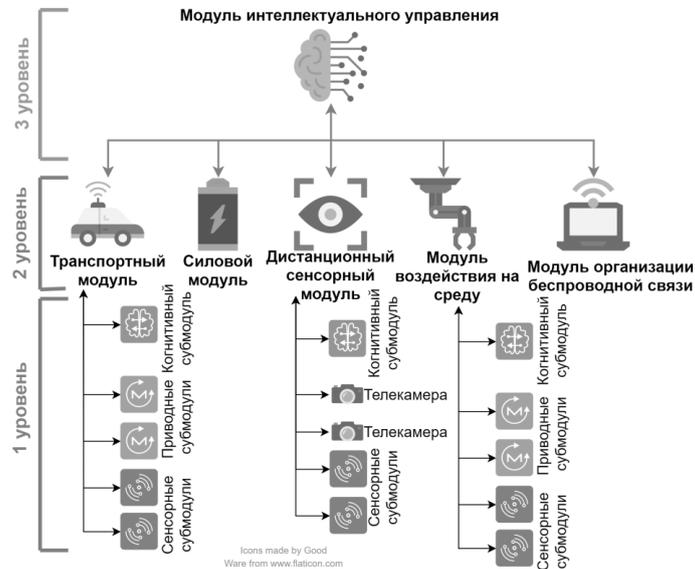


Рис. 1. Обобщённая иерархическая структура ИИУС модульного мобильного робота

На вершине архитектуры располагается модуль интеллектуального управления, отвечающий за планирование и распределение задач между модулями второго уровня (общесистемное управление). В этой архитектуре модули на третьем и втором уровне иерархии отвечают за одну укрупнённую функцию целого робота согласно принципу полной функциональности [19]: *каждый модуль робота должен быть способен любым удобным ему способом выполнять свою целевую функцию, используя только собственные средства для выполнения команд от внешней системы управления*. В общем случае структура системы управления типового мобильного робота может быть разделена на следующие основные функциональные модули [20]:

1. **Модуль интеллектуального управления** – планирование и распределение задач между модулями второго уровня (общесистемное управление).
2. **Транспортный модуль** – перемещение робота в пространстве (транспортная функция).
3. **Силовой модуль** – обеспечивает электропитание компонентов робота (энергетическая функция).
4. **Дистанционный сенсорный модуль** – поиск препятствий и объектов манипулирования (информационная функция).
5. **Модуль воздействия на среду** – технологическая функция.
6. **Модуль организации беспроводной связи** – коммуникация с внешним супервизором.

Разбиение структуры системы управления мобильного робота именно на такие блоки обусловлено наличием всех перечисленных выше функций практически в любом мобильном роботе с элементами интеллектуального или адаптивного управления [21-23]. Например, в [21] рассматривается обобщённая структурная схема системы управления «очувствлённым» роботом, которая включает в себя уровень общего функционирования (*общесистемное управление*), сенсорные устройства (*информационная функция*), технологические операции (*технологическая*

функция), управление приводами (*транспортная и технологическая функция*), а также пульт управления оператора (*коммуникационная функция*). В модульном роботе блоки, отвечающие за аналогичные функции, ещё обязательно должны взаимодействовать между собой напрямую или опосредованно для согласованного функционирования системы.

Некоторые модули второго уровня должны выполнять большой объём работы. Например, транспортный модуль должен отвечать за планирование траектории движения, объезд препятствий, управление приводами, расчёт пройденного пути. Транспортный модуль выполняет все эти задачи в кооперации с сенсорным модулем, который тоже загружен достаточно трудоёмкими задачами: фильтрация и комплексирование показаний датчиков, построение карты местности и т.д.

Согласно нашей концепции построения архитектуры системы управления ModRob каждый полнофункциональный модуль также должен быть построен как модульная архитектура с узлами-субмодулями. Такая архитектура позволит распределить вычислительную нагрузку различной функциональной значимости между субмодулями, особенно в тех случаях, когда число приводов и датчиков может увеличиваться или их тип может изменяться. Дополнительно появляется возможность комбинировать модули как на первом, так и на втором уровнях иерархии соответственно.

Рассмотрим распределённую архитектуру системы управления полнофункционального **транспортного модуля** (рис. 2).



Рис. 2. Распределённая архитектура системы управления транспортного модуля

В этой иерархической структуре взаимодействие транспортного модуля с остальными полнофункциональными узлами робота имеет место в сети на втором уровне иерархии (например, CAN, Ethernet, USB). Предполагается, что это взаимодействие может выполняться в режиме «мягкого» реального времени.

Структура транспортного модуля основана на трёх типах субмодулей:

1. **Когнитивный субмодуль** – отвечает за управление и настройку остальных субмодулей.
2. **Субмодуль-привод** – управляет работой подключаемого к нему электродвигателя (на рис. 2 представлен частный случай – субмодуль для управления двигателем постоянного тока).
3. **Обобщённый сенсорный субмодуль** – позволяет подключать различные датчики расстояний, гироскопы, акселерометры и т.д.

Наличие обобщённого сенсорного субмодуля в транспортном модуле является опциональным; он может быть использован в тех ситуациях, когда сенсорный модуль (на верхнем уровне иерархии) отсутствует в мобильном роботе и существует высокий риск столкновения с препятствиями.

На рис. 2 также представлен **силовой модуль**, обеспечивающий электропитание всех подключённых устройств. Силовой модуль не является частью транспортного модуля и рассматривается как специфичный узел представленной системы, поскольку информационное взаимодействие он осуществляет с *модулями* (второй уровень иерархии), но электропитанием обеспечивает как модули, так и *субмодули*.

Информационное взаимодействие между субмодулями должно осуществляться как минимум в «мягком» реальном времени (например, CAN, I2C или RS485).

Рассмотрим подробнее устройство субмодулей.

Когнитивный субмодуль (Cognition) – вычислительное устройство, основные функции которого программируются пользователем. Например, когнитивный субмодуль может отвечать за установку линейной и угловой скоростей транспортного модуля согласно алгоритму, расчёт позиции робота в пространстве и т.д. Кроме этого когнитивный субмодуль исполняет роль «моста» между компьютером высокого уровня и другими субмодулями (рис. 3). Это необходимо для настройки субмодулей: установки коэффициентов ПИД-регуляторов, параметров фильтрации и интерполяции и т.д. Подключение этого субмодуля к компьютеру может осуществляться по проводной (USB) и беспроводной связи (Wi-Fi).

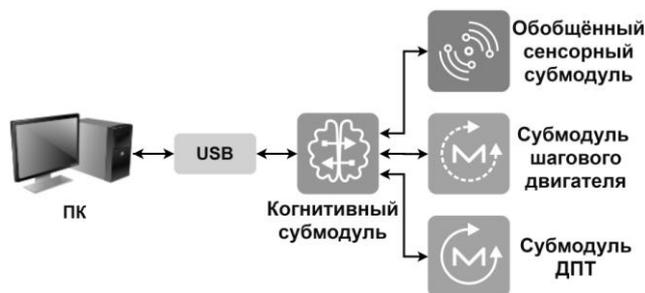


Рис. 3. Настройка субмодулей с помощью компьютера

Субмодуль-привод (Actuator) – электронный контроллер, управляющий различными электродвигателями: коллекторными, бесколлекторными двигателями постоянного тока (ДПТ), шаговыми двигателями, сервомоторами. Основные функции субмодуля: управление валом по скорости, положению и/или моменту. В зависимости от типа регулируемого электродвигателя субмодули-приводы могут быть четырёх основных видов: контроллер коллекторного ДПТ, контроллер бесколлекторного ДПТ, контроллер шагового двигателя, контроллер сервомоторов.

Обобщённый сенсорный субмодуль (General Sensor Submodule) – электронное устройство, предназначенное для подключения различных датчиков, преимущественно дальномеров, энкодеров, концевых выключателей, а также инерционных датчиков (гироскопов, акселерометров). Основные функции субмодуля: сбор и обработка сенсорных данных, комплексирование. Важной особенностью субмодуля является возможность подключения к нему различных моделей датчиков одного и того же типа, например, ультразвуковых дальномеров. Предполагается, что субмодуль должен быть совместим с наиболее распространёнными типовыми сенсорами (рис. 4).



Рис. 4. Подключение различных типовых датчиков к обобщённому сенсорному submodule

4. Лабораторные прототипы submodule и протокол взаимодействия.

В ходе работы над проектом были изготовлены прототипы *когнитивного submodule*, submodule двигателя постоянного тока (ДПТ) и силового модуля. Также были разработаны и изготовлены так называемые **базовые submodule** для проведения тестов и отладки протокола коммуникации.

Все разработанные прототипы submodule имеют следующие основные компоненты: в качестве основного вычислителя – микроконтроллер STM32 ARM-Cortex M3 с частотой 72 МГц, 20 КБ ОЗУ и 64 КБ флеш-памяти, драйвер для CAN-шины TJA1050 и понижающий DC-DC преобразователь напряжения.

Когнитивный submodule: прототип (помимо базовых компонентов) включает в себя контроллер Wemos D1 mini для организации беспроводной связи между модульным роботом (транспортным модулем) и компьютером пользователя. Для отладки когнитивного и других submodule используется UART интерфейс.

Submodule ДПТ: текущий прототип способен управлять двигателями с питающим напряжением до 35 В и номинальным током до 4 А. Замкнутое управление с обратной связью по положению вала и/или его скоростью реализуется, если энкодер подключен к submodule. Submodule ДПТ согласно протоколу межмодульного информационного взаимодействия публикует на шину информацию о скорости и положении вала с заданной частотой (частота публикации определяется когнитивным submodule или компьютером пользователя). На рис. 5 показан первый вариант прототипа submodule ДПТ.

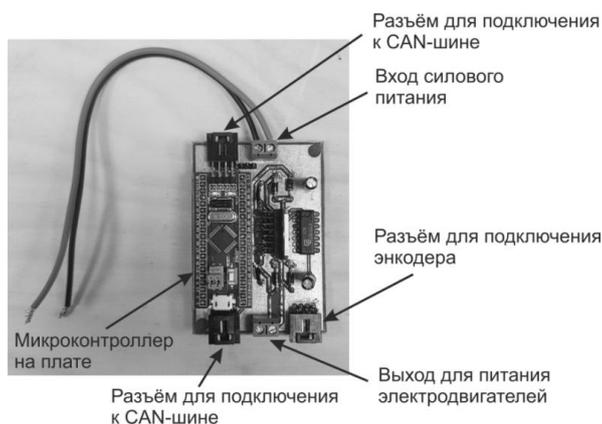


Рис. 5. Первый вариант прототипа submodule ДПТ

Силовой модуль: текущий прототип модуля включает в себя литий-ионные аккумуляторы, два микроконтроллера ATtiny85, DC-DC преобразователь напряжения и вспомогательные электронные компоненты. Выходное напряжение модуля лежит в диапазоне 10–16.8 В, величина тока ограничена 5 А в продолжительном режиме, и 10 А – в кратковременном. В текущих экспериментах используются маломощные моторы, поэтому данные характеристики вполне удовлетворяют поставленным требованиям.

Для *тестирования протокола межмодульной коммуникации и отладки алгоритмов управления submodule* было разработано несколько базовых submodule.

Базовый submodule (BASE_0) представляет собой электронное устройство, включающее в себя только основные компоненты, присущие всем submodule: микроконтроллер, драйвер CAN-шины и силовой преобразователь. Также на плате устройства имеются разъёмы для подключения к шине и вспомогательные электрические контакты, дублирующие выводы платы с микроконтроллером. На рис. 6 приведена фотография четырёх изготовленных базовых submodule, подключённых по шине.

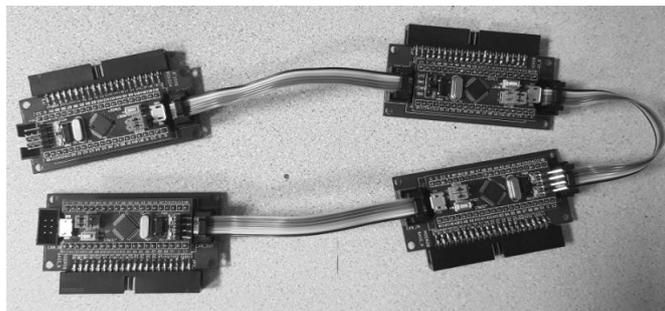


Рис. 6. Базовые submodule, подключённые к шине CAN с помощью шлейфа

Базовый submodule является *универсальным устройством*, способным выполнять функции остальных submodule при подключении необходимой периферии и загрузки соответствующей управляющей программы.

Все submodule подключаются к CAN-шине. Выбор этого стандарта обусловлен следующими его достоинствами: возможность обмена сообщениями в реальном времени, простота реализации, высокая помехоустойчивость, обнаружение коллизий и контроль ошибок. Кроме того, CAN-шина позволяет любому модулю становиться мастером благодаря арбитражу доступа к сети. К недостаткам можно отнести малый объём полезной нагрузки (всего 64 бита) и небольшую пропускную способность шины (до 1 Мбит/с). Тем не менее, именно при иерархической организации системы управления модульного мобильного робота при соблюдении принципа полной функциональности модулей объём межмодульного информационного взаимодействия оказывается небольшим, что позволяет использовать такой хорошо зарекомендовавший себя стандарт.

Рассмотрим кратко *протокол межмодульного взаимодействия* (на первом – нижнем уровне иерархии).

На каждом аппаратном submodule развёрнут программный узел (node). Протокол основан на популярном принципе «подписчик-издатель» (publisher-subscriber). Каждый узел имеет свой идентификатор (modID) и набор перемен-

ных со своими идентификаторами (varID). Программный узел способен принимать и публиковать сообщения. Каждое сообщение занимает только *один* расширенный CAN-фрейм (128 бит). Сообщение содержит следующую основную информацию: адрес модуля, бит интерпретации адреса, значение переменной и адрес типа модуля.

Сообщения приходят ко всем узлам шины. Входящее сообщение интерпретируется либо как «установка» (set), либо как «обновление» (update). В зависимости от режима **сообщение-установка** может:

- ◆ *записать значение* в переменную приёмника (по ID переменной);
- ◆ *установить частоту публикации* на шину какой-либо переменной приёмника (по ID);
- ◆ *подписать переменную* приёмника на какую-либо переменную передатчика (по двум ID).

Сообщение-обновление действует следующим образом: переменная приёмника, которая ранее была подписана на переменную передатчика (сообщением-установкой), получает новое значение (*обновляется*).

Когнитивный submodule, регулирующий работу остальных submodule, подключается к компьютеру верхнего уровня по отдельному каналу коммуникации. В настоящий момент таким каналом является USART. С компьютера на когнитивный submodule («вниз») команды отправляются по последовательному порту (USB-USART). Такими командами могут быть, например, задание целевой скорости вращения вала двигателя submodule ДПП.

Команды от компьютера аналогичны сообщениям-установкам: имеют схожие информационные поля. Все команды записаны в формате JSON. Такой выбор обусловлен широкой распространённостью формата и лёгкостью его восприятия человеком.

Используются всего три вида сообщений:

1. {"op": "setValue", "modID": Int16, "varID": Int8, "value": Float} – установка значения переменной с идентификатором varID модуля с идентификатором modID;
2. {"op": "setPublication", "modID": Int16, "varID": Int8, "frequency": Int} – установка частоты (Гц) публикации переменной с идентификатором varID, принадлежащей модулю с идентификатором modID (0 – нет публикации);
3. {"op": "setSubscription", "modID": Int16, "varID": Int8, "subModID": Int16, "subVarID": Int8} – установка подписки: переменная с идентификатором varID модуля с идентификатором modID подписывается на переменную с идентификатором subVarID модуля с идентификатором subModID, т.е. при изменении переменной subVarID будет изменяться переменная с идентификатором varID, если до этого была установлена *ненулевая* частота публикации переменной с идентификатором subVarID.

Отправка сообщений, публикуемых на CAN-шине «наверх» (к компьютеру верхнего уровня), осуществляется за счёт агрегирования данных на когнитивном submodule. Агрегированные данные также представляются в формате JSON.

5. Экспериментальная часть. Было выполнено тестирование работы submodule с использованием разработанного протокола.

Цель эксперимента: исследовать возможность использования разработанного протокола для управления submodule в реальном времени. Схема эксперимента представлена на рис. 7.

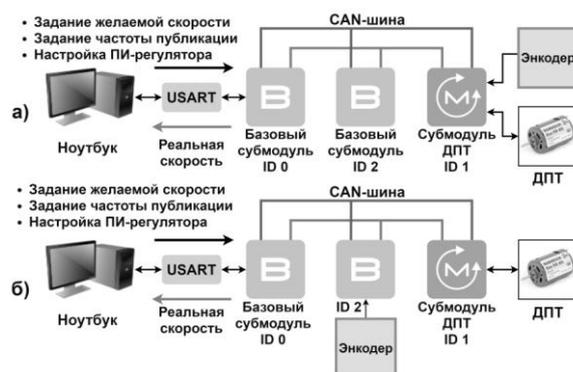


Рис. 7. Схема экспериментальной установки: а – контур скорости субмодуля ДПТ замкнут на самом субмодуле ДПТ; б – контур скорости субмодуля ДПТ замыкается через промежуточный субмодуль

Состав оборудования для проведения эксперимента представлен в табл. 1.

Таблица 1

Состав оборудования для эксперимента

Оборудование	Количество	Основные характеристики
Ноутбук (компьютер верхнего уровня)	1	Операционная система Manjaro Linux 19.0.0
Базовый субмодуль	3	См. раздел 4
Силовой преобразователь L298N	1	Напряжение питания: 5-46 В, максимальный продолжительный ток: 2 А
Интегральная микросхема K155ЛЕ1	1	Четыре логических элемента 2ИЛИ-НЕ
Оптический инкрементальный энкодер	1	Минимальное расстояние между метками: 0.229 мм, напряжение питания: 5 В
Кодовый диск	1	Разрешающая способность: 30 имп/об.
Электродвигатель постоянного тока Raboesch Blue RM-410	1	Номинальное напряжение питания: 7.2 В, номинальная скорость: 7500 об/мин, номинальный ток обмотки якоря 1.3 А, номинальный крутящий момент: 0.022 Нм

Замечание: в составе оборудования нет субмодуля ДПТ, тем не менее, на схеме на рис. 7 он присутствует. Это объясняется тем, что субмодуль ДПТ в этом эксперименте реализован на основе базового субмодуля, а также силового преобразователя L298N и интегральной микросхемы K155ЛЕ1.

Постановка эксперимента. Осуществляется управление ДПТ по скорости вращения вала. Эксперимент разделён на два опыта. В первом опыте (рис. 7,а) электродвигатель с энкодером подключены к субмодулю ДПТ (идентификатор ID 1), т.е. обратная связь по скорости замыкается на этом субмодуле. Во втором опыте энкодер подключается к другому субмодулю с ID 2 (рис. 7,б), т.е. обратная связь по скорости замыкается с помощью этого субмодуля. И в первом и во втором опыте задание целевой скорости вращения вала, а также установка частот публикации и подписок осуществляется с помощью компьютера, подключенного к первому базовому субмодулю (ID 0) по USART.

Первый опыт. Субмодуль ДПТ измеряет скорость вращения вала двигателя и записывает её величину в переменную. Командой "setPublication", отправляемой компьютером, устанавливается частота публикации переменной на шину – 100 Гц. Привод субмодуля ДПТ должен обрабатывать ступенчатые задающие воздействия, подаваемые на его вход: 100, 500, 800, 250, -250, -800, -500, -100 рад/с. Желаемая скорость задаётся командой "setValue". В приводе реализован только контур скорости с ПИД-регулятором. Отметим, что ПИД-регулятор не настроен на оптимальный режим работы. В табл. 2 представлены исходные параметры лабораторной установки для первого опыта.

Таблица 2

Исходные параметры лабораторной установки для первого опыта

Параметр	Значение
Пропускная способность CAN-шины, Мбит/с	1
Скорость работы последовательного порта (USART), бод/с	115200
Частота работы контура скорости в субмодуле ДПТ, Гц	100
Частота публикации переменной скорости на шину, Гц	100
Коэффициент усиления пропорциональной составляющей	3.5
Коэффициент усиления интегральной составляющей	9
Коэффициент усиления дифференциальной составляющей	0.2

Замечание: измеряемая скорость усредняется по 10 точкам.

На рис. 8 непрерывной линией показан график изменения скорости вращения вала электродвигателя. Штриховой линией показан график изменения задающего воздействия (желаемой скорости).

Второй опыт. Как и в первом опыте, привод субмодуля ДПТ должен обрабатывать ступенчатые задающие воздействия, подаваемые на его вход. Измерение скорости производится в субмодуле с ID 2 (к которому подключен энкодер); публикация выполняется с частотой 100 Гц. Для замыкания обратной связи субмодуль ДПТ подписывается на переменную скорости субмодуля с энкодером с помощью команды "setSubscription".

Исходные параметры лабораторной установки для второго опыта такие же, как и для первого.

На рис. 8 штрихпунктирной линией показан график изменения скорости вращения вала электродвигателя, полученный в ходе второго опыта.

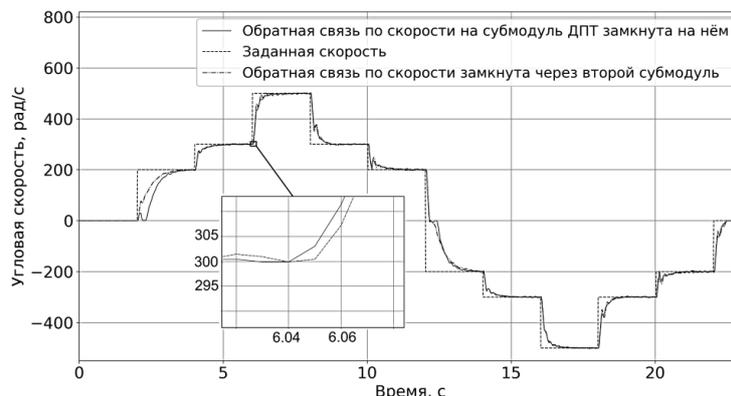


Рис. 8. Сравнение скоростей в первом и втором опыте

Из графиков на рис. 8 видно, что качество переходных процессов изменения скорости во втором опыте практически не изменилось по сравнению с первым опытом, однако к задержке реакции привода на задающее воздействие добавилось запаздывание по сравнению с первым опытом. Запаздывание вызвано наличием субмодуля в цепи обратной связи. Основные причины запаздывания: измерение скорости с периодом 10 мс, публикация с периодом 10 мс, а также обработка приёмником входящих сообщений, которая происходит с периодом 10 мс. Время, затрачиваемое на отправку сообщения по шине (порядка 14–16 мкс), вносит незначительный вклад в общую длительность запаздывания. Таким образом **максимальное запаздывание** должно быть порядка 40–50 мс.

Анализ графиков показал, что **реальное запаздывание** варьируется в диапазоне от 4 мс до 50 мс, что соответствует расчёту. В начальный момент времени (при задающем воздействии 200 рад/с), задержка реакции во втором опыте оказалась даже меньше, чем в первом (на 0.25 с).

Также появились незначительные колебания (но в рамках установившейся ошибки в 5 %) – по 2–3 полных колебания за время регулирования на скоростях более 200 рад/с.

Опыты были повторены для синусоидального задающего воздействия с частотой 0.5 Гц:

$$\omega_3 = 500 \cdot \sin(\pi t),$$

ω_3 – заданная скорость, рад/с.

Все остальные параметры эксперимента остались прежними, кроме параметров ПИД-регулятора, которые стали равными $K_P = 6$, $K_I = 20$ и $K_D = 0.3$. На рис. 9 показаны графики изменения скорости вращения вала двигателя для первого и второго опыта соответственно при синусоидальном воздействии.

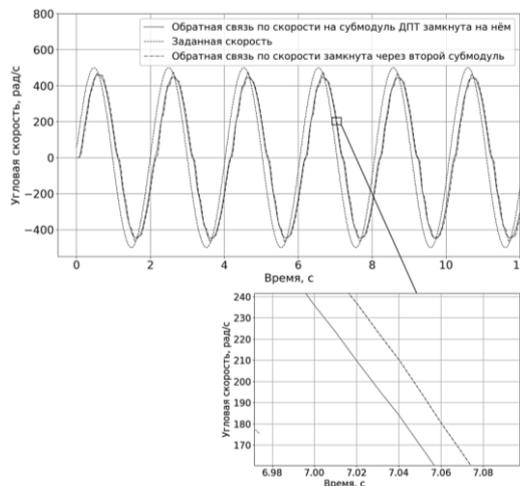


Рис. 9. Сравнение скоростей при подаче синусоидального воздействия

Как и в предыдущем случае, скорости в первом и во втором опытах отличаются незначительно, тем не менее, также присутствует задержка реакции привода. Задержка варьируется в диапазоне от 13 до 25 мс (в начальный момент времени). Средняя величина задержки – 20 мс.

Вывод по эксперименту. Анализ результатов показал, что использование разработанного протокола межмодульной коммуникации позволяет осуществлять управление субмодулями в реальном времени. Строго говоря, поставленный экс-

перимент является *искусственным*, поскольку согласно представленной концепции submodule ДПТ самостоятельно должен рассчитывать скорость электродвигателя. Тем не менее, введение дополнительного submodule в цепь обратной связи по скорости не нарушило функционирование системы, хотя и ухудшило его в допустимых пределах. Привод сохраняет устойчивость, однако возросшая задержка реакции на задающее воздействие может негативно сказаться на работе привода. Это особенно важно в высокоскоростных приводах *промышленных* роботов, но поскольку разрабатываемый нами фреймворк нацелен в первую очередь на *мобильные* роботы, то этот недостаток не является критичным. Скорость большинства мобильных роботов, работающих в помещениях с людьми, редко превышает 1–2 м/с [24–26]. В данном случае задержка реакции робота (транспортного модуля) на задающее воздействие может приводить к позиционной ошибке порядка 0.8–10 см, что не должно являться большой проблемой при наличии дистанционных датчиков, публикующих данные на шину с той же частотой, что и submodule с энкодером (100 Гц).

Добиться уменьшения задержки реакции привода в этом случае можно за счёт увеличения частоты публикации переменной скорости на шину. В то же время следует во столько же раз увеличить частоту измерения скорости на submodule с ID 2 (см. рис. 7,б). Однако улучшения качества работы можно достичь, только если кодовый диск энкодера обладает большим разрешением. Для использованного в данном эксперименте кодового диска с разрешением 30 имп/об увеличение частоты публикации до 200 Гц только ухудшило качество работы привода.

Стоит также отметить, что увеличивать частоту публикации переменных того или иного submodule можно лишь до определённого предела, поскольку CAN-шина будет загружена сообщениями других submodule, которых в одном транспортном модуле может быть 5–10 шт. Анализ работы протокола с большим числом активно публикующих на шину submodule является частью дальнейших исследований.

Выводы. В настоящей статье предложен фреймворк Modrob для разработки мобильных роботов с модульной иерархической архитектурой. К основным отличиям данного фреймворка от приведённых в обзоре можно отнести:

- ◆ иерархическая топология, обеспечивающая распределение задач между модулями как по «вертикали», так и по «горизонтали»;
- ◆ использование полнофункциональных модулей на всех уровнях иерархии: начиная от низкоуровневого управления приводами и заканчивая высокоуровневым управлением мобильными платформами.

Показано, что второй уровень иерархии может быть представлен шестью основными полнофункциональными модулями, каждый из которых должен включать в себя несколько типовых submodule, что должно обеспечить *лёгкость интеграции устройств сторонних производителей*.

Разработана структура транспортного модуля, состоящего из трёх основных типовых унифицированных submodule: когнитивного, приводного и обобщённого сенсорного submodule. Наличие таких унифицированных submodule *облегчает сборку различных транспортных платформ*.

Были изготовлены прототипы submodule для первого уровня иерархии: когнитивный submodule, submodule ДПТ и силовой модуль. Для проведения тестов также были разработаны и изготовлены базовые submodule, позволяющие отладить работу протокола. Экспериментальные исследования, выполненные на изготовленных submodule, показали, что при подключении submodule с уникальными идентификаторами к шине система может начать *работу в режиме plug-and-play*, т.е. без дополнительных настроек.

Разработан протокол межмодульного взаимодействия, использующий минимальный набор типовых сообщений, что позволило использовать CAN-шину для обеспечения функционирования субмодулей *в режиме реального времени*. Эксперимент с тремя субмодулями показал способность протокола работать в режиме реального времени: задержка, вызывающая позиционную ошибку транспортной платформы в 0.8–10 см, не должна сказываться на работе мобильного робота при использовании дистанционных сенсоров.

Предложенный подход и результаты экспериментального исследования показали, что разделение полнофункционального транспортного модуля на подмодули, основанный на иерархическом принципе построения многоуровневой системы управления модульного мобильного робота, позволяет увеличить быстродействие всей системы за счёт распределения вычислительной нагрузки между модулями и субмодулями при использовании в каждом модуле и субмодуле встраиваемых систем – относительно дешёвых микропроцессоров или одноплатных ЭВМ невысокой производительности.

Заключение. Значительная часть дальнейшей работы будет заключаться в исследовании системы с большим числом субмодулей: определение зависимости задержек приёма сообщений и скорости их передачи от числа подписчиков, величины колебаний задержек при передаче пакетов и т.д. Необходимость этого обусловлена тем, что в одной транспортной платформе может быть до 10 субмодулей, активно публикующих данные с частотой 100 Гц и больше.

Важной задачей является изготовление других субмодулей (например, обобщённого сенсорного) и их отладка, что позволит в дальнейшем реализовать макет транспортного модуля, включающего в себя все упомянутые выше блоки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Phidgets Inc. – Products for USB Sensing and Control. – URL: <https://www.phidgets.com/> (дата обращения: 26.02.20).
2. HEBI Robotics. – URL: <https://www.hebirobotics.com> (дата обращения: 26.02.20).
3. *Iñigo-Blasco P., Diaz-del Rio F., Romero-Ternero M., Cagigas-Muñiz D. & Vicente-Diaz S.* Robotics software frameworks for multiagent robotic systems development // *Robotics and Autonomous Systems*. – 2012. – Vol. 60, No. 6. – P. 803-821. – ISSN: 0921-8890.
4. *Herbrechtsmeier S., Korthals T., Schopping T. & Ruckert U.* AMiRo: a modular & customizable open-source mini robot platform // 20th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), Sinaia. 2016. – P. 687-692.
5. *Kalouche S., Rollinson D. & Choset H.* Modularity for maximum mobility and manipulation: control of a reconfigurable legged robot with series-elastic actuators // *IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*. – West Lafayette, IN, USA, 18-20 Oct. 2015. – P. 1-8. IEEE, New York.
6. *Virk G.* CLAWAR Modularity for Robotic Systems // *The International Journal of Robotics Research*. – March-April 2003. – Vol. 22, No. 3-4. – P. 265-277. – ISSN: 02783649.
7. *Steinbauer G., Wotawa F. & Fraser G.* A modular architecture for a multi-purpose mobile robot, *Innovations in Applied Artificial Intelligence // IEA/AIE 2004. Lecture Notes in Computer Science*. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2004. – P. 1007-1015. – ISBN 978-3-540-24677-0. – DOI: 10.1007/978-3-540-24677-0_103.
8. *Taira T., Kamata N. & Yamasaki N.* Design and implementation of reconfigurable modular humanoid robot architecture // *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 2005*, 2-6 Aug. 2005, Edmonton, Alta., Canada. IEEE, New York. – ISSN 2153-0858. – P. 1071-1076. – DOI: 10.1109/IROS.2005.1545122.
9. *Ahn H., Beak Y., Sa I., Kang W., Na J. and Choi J.* Design of reconfigurable heterogeneous modular architecture for service robots // *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 2008*, 22-26 Sept. 2008, Nice, France. IEEE, New York. – P. 1313-1318. – ISSN 2153-0858. – ISBN 978-1-4244-2057-5. – DOI: 10.1109/IROS.2008.4650706.

10. Hild M., Siedel T., Benckendorff C., Thiele C. & Spranger M. Myon, a New Humanoid, In: Language Grounding in Robots, Steels L., Hild M. (eds). – Springer, 2012. – P. 25-44. – ISBN 978-1-4614-3063-6. Boston, MA.
11. Roh S., Yang K., Park J., Moon H., Kim H.-S., Lee H. & Choi H. A modularized personal robot DRP I: design and implementation // IEEE Transactions on Robotics. – 2009. – Vol. 25, No. 2. – P. 414-425. – ISSN 1552-3098. – DOI: 10.1109/TRO.2009.2014499.
12. Magnenat S., Rétornaz P., Bonani M., Longchamp V. & Mondada F. ASEBA: a modular architecture for event based control of complex robots // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. – 2010. – Vol. 16, No. 2. – P. 321-329. – ISSN 1083-4435. – DOI: 10.1109/TMECH.2010.2042722.
13. Bonarini A., Matteucci M., Migliavacca M. & Rizzi D. R2P: An open source hardware and software modular approach to robot prototyping // Robotics and Autonomous Systems. – 2014. – Vol. 62, Issue 7. – P. 1073-1084. – ISSN 0921-8890, DOI: 10.1016/j.robot.2013.08.009.
14. Losada, D.P., Fernández J.L.; Paz E. & Rafael S. Distributed and modular CAN-based architecture for hardware control and sensor data integration // Sensors. – 2017. – Vol. 17 (5). – P. 1013-1030. – ISSN 1424-8220. – DOI: 10.3390/s17051013.
15. Shmakov O., Korolev D., Popov D., Kitaev N. & Korotkov A. Modular Mobile Robotic Kit for Prototyping and Debugging of Control Algorithms // Proceedings of the 28th DAAAM International Symposium. – 2017. – P. 0950-0956.
16. Mayoral V., Hernandez A., Kojcev R., Muguruza I. Zamalloa I. Bilbao A. & Usategi L. The shift in the robotics paradigm – the Hardware Robot Operating System (H-ROS); an infrastructure to create interoperable robot components, NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems (AHS) 2017, Pasadena, CA, USA, 24-27 July 2017. – P. 229-236. – ISSN 2471-769X, ISBN 978-1-5386-3439-4. IEEE, New York. – DOI: 10.1109/AHS.2017.8046383.
17. Jahn U. Wolff C. & Schulz P. Concepts of a modular system architecture for distributed robotic systems // Journal of Computers. – 2019. – Vol. 8, Issue 1. – 16 p. – ISSN 2073-431X. – DOI: 10.3390/computers8010025.
18. Andreev V.P. The Concept of Using the Theory of Multi-Agent Systems to Design Control Systems for Mobile Robots with Modular Architecture // Proceedings of the International Scientific and Technological Conference EXTREME ROBOTICS-2019. – SaintPetersburg: OOO "Izdatel'sko-poligraficheskii kompleks "Gangut" Publ., 2019. – P. 524-534.
19. Андреев В.П., Ким В.Л., Плетнев П.Ф. Принцип полной функциональности модулей в гетерогенных модульных мобильных роботах // Экстремальная робототехника (ЭР-2017): Тр. международной научно-технической конференции. – СПб.: ЦНИИ РТК, 2017. – № 1. – С. 81-91.
20. Андреев В.П., Ким В.Л. Разработка функциональных узлов гетерогенного модульного мобильного робота // Экстремальная робототехника (ЭР-2016): Тр. международной научно-технической конференции. – СПб.: ООО «АП4Принт», 2016. – С. 359-369.
21. Юревич Е.И. Основы робототехники: учебник для вузов. – Л.: Изд-во Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. – 271 с.
22. Siciliano B. Sciacivico L. [et al.]. Robotics Modelling, Planning and Control. – Springer-Verlag London Limited, 2009. – 632 p.
23. Siegwart R., Nourbakhsh I., Scaramuzza D. Introduction to Autonomous Mobile Robots. – Cambridge: The MIT Press, 2004. – 472 p.
24. Технические характеристики сервисного робота Care-O-bot 4. – URL: <https://www.care-obot.de/de/care-o-bot-4/technical-data.html/> (дата обращения: 26.02.20).
25. Kiva Systems: Three Engineers, Hundreds of Robots, One Warehouse. – URL: <https://spectrum.ieee.org/robotics/robotics-software/three-engineers-hundreds-of-robots-one-warehouse> (дата обращения: 26.02.20).
26. Сервисный гуманоидный робот Rollin' Justin, – URL: <https://www.dlr.de/rm/en/desktopdefault.aspx/tabid-11427/#gallery/29202> (дата обращения: 26.02.20).

REFERENCES

1. Phidgets Inc. Products for USB Sensing and Control. Available at: <https://www.phidgets.com/> (accessed 26 February 20).
2. HEBI Robotics. Available at: <https://www.hebirobotics.com> (accessed 26 February 20).

3. Iñigo-Blasco P., Diaz-del Rio F., Romero-Ternero M., Cagigas-Muñiz D. & Vicente-Diaz S. Robotics software frameworks for multiagent robotic systems development, *Robotics and Autonomous Systems*, 2012, Vol. 60, No. 6, pp. 803-821. ISSN: 0921-8890.
4. Herbrechtsmeier S., Korthals T., Schopping T. & Ruckert U. AMiRo: a modular & customizable open-source mini robot platform, *20th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), Sinaia. 2016*, pp. 687-692.
5. Kalouche S., Rollinson D. & Choset H. Modularity for maximum mobility and manipulation: control of a reconfigurable legged robot with series-elastic actuators, *IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*. West Lafayette, IN, USA, 18-20 Oct. 2015, pp. 1-8. IEEE, New York.
6. Virk G. CLAWAR Modularity for Robotic Systems, *The International Journal of Robotics Research*, March-April 2003, Vol. 22, No. 3-4, pp. 265-277. ISSN: 02783649.
7. Steinbauer G., Wotawa F. & Fraser G. A modular architecture for a multi-purpose mobile robot, *Innovations in Applied Artificial Intelligence, IEA/AIE 2004. Lecture Notes in Computer Science*, pp. 1007-1015. Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN 978-3-540-24677-0. DOI: 10.1007/978-3-540-24677-0_103.
8. Taira T., Kamata N. & Yamasaki N. Design and implementation of reconfigurable modular humanoid robot architecture, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 2005, 2-6 Aug. 2005, Edmonton, Alta., Canada*. IEEE, New York. ISSN 2153-0858, pp. 1071-1076. DOI: 10.1109/IROS.2005.1545122.
9. Ahn H., Beak Y., Sa I., Kang W., Na J. and Choi J. Design of reconfigurable heterogeneous modular architecture for service robots, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 2008, 22-26 Sept. 2008, Nice, France*, pp. 1313-1318, IEEE, New York. ISSN 2153-0858. ISBN 978-1-4244-2057-5. DOI: 10.1109/IROS.2008.4650706.
10. Hild M., Siedel T., Benckendorff C., Thiele C. & Spranger M. Myon, a New Humanoid, In: *Language Grounding in Robots*, Steels L., Hild M. (eds). Springer, 2012, pp. 25-44. ISBN 978-1-4614-3063-6. Boston, MA.
11. Roh S., Yang K., Park J., Moon H., Kim H.-S., Lee H. & Choi H. A modularized personal robot DRP I: design and implementation, *IEEE Transactions on Robotics*, 2009, Vol. 25, No. 2, pp. 414-425. ISSN 1552-3098. DOI: 10.1109/TRO.2009.2014499.
12. Magnenat S., Rétornaz P., Bonani M., Longchamp V. & Mondada F. ASEBA: a modular architecture for event based control of complex robots, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2010, Vol. 16, No. 2, pp. 321-329. ISSN 1083-4435. DOI: 10.1109/TMECH.2010.2042722.
13. Bonarini A., Matteucci M., Migliavacca M. & Rizzi D. R2P: An open source hardware and software modular approach to robot prototyping, *Robotics and Autonomous Systems*, 2014, Vol. 62, Issue 7, pp. 1073-1084. ISSN 0921-8890, DOI: 10.1016/j.robot.2013.08.009.
14. Losada, D.P., Fernández J.L.; Paz E. & Rafael S. Distributed and modular CAN-based architecture for hardware control and sensor data integration, *Sensors*, 2017, Vol. 17 (5), pp. 1013-1030. ISSN 1424-8220. DOI: 10.3390/s17051013.
15. Shmakov O., Korolev D., Popov D., Kitaev N. & Korotkov A. Modular Mobile Robotic Kit for Prototyping and Debugging of Control Algorithms, *Proceedings of the 28th DAAAM International Symposium*, 2017, pp. 0950-0956.
16. Mayoral V., Hernandez A., Kojcev R., Muguruza I. Zamalloa I. Bilbao A. & Usategi L. The shift in the robotics paradigm – the Hardware Robot Operating System (H-ROS); an infrastructure to create interoperable robot components, *NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems (AHS) 2017, Pasadena, CA, USA, 24-27 July 2017*, pp. 229-236. ISSN 2471-769X, ISBN 978-1-5386-3439-4. IEEE, New York, DOI: 10.1109/AHS.2017.8046383.
17. Jahn U. Wolff C. & Schulz P. Concepts of a modular system architecture for distributed robotic systems, *Journal of Computers*, 2019, Vol. 8, Issue 1, 16 p. ISSN 2073-431X. DOI: 10.3390/computers8010025.
18. Andreev V.P. The Concept of Using the Theory of Multi-Agent Systems to Design Control Systems for Mobile Robots with Modular Architecture, *Proceedings of the International Scientific and Technological Conference EXTREME ROBOTICS-2019*. SaintPetersburg: OOO "Izdatel'sko-poligraficheskii kompleks "Gangut" Publ., 2019, pp. 524-534.
19. Andreev V.P., Kim V.L., Pletenev P.F. Printsip polnoy funktsional'nosti moduley v geterogennykh modul'nykh mobil'nykh robotakh [The principle of full functionality of modules in heterogeneous modular mobile robots], *Ekstremal'naya robototekhnika (ER-2017): Tr. mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [Extreme robotics (ER-2017): Proceedings of the international scientific and technical conference]*. Saint Peyersburg: TSNII RTK, 2017, No. 1, pp. 81-91.

20. *Andreev V.P., Kim V.L.* Razrabotka funktsional'nykh uzlov geterogenного modul'nogo mobil'nogo robota [Development of functional nodes of a heterogeneous modular mobile robot], *Ekstremal'naya robototekhnika (ER-2017): Tr. mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoй konferentsii* [Extreme robotics (ER-2017): Proceedings of the international scientific and technical conference]. Saint Peetersburg: ООО «AP4Print», 2016, pp. 359-369.
21. *Yurevich E.I.* Osnovy robototekhniki: uchebnyk dlya vtuzov [Fundamentals of robotics: a textbook for higher education institutions]. Leningrad: Izd-vo Mashinostroenie, Leningr. otd-nie, 1985, 271 p.
22. *Siciliano B. Sciacivco L. [et al.]* Robotics Modelling, Planning and Control. Springer-Verlag London Limited, 2009, 632 p.
23. *Siegwart R., Nourbakhsh I., Scaramuzza D.* Introduction to Autonomous Mobile Robots. Cambridge: The MIT Press, 2004, 472 p.
24. Tekhnicheskie kharakteristiki servisnogo robota Care-O-bot 4 [Technical characteristics of the Care-O-bot 4 service robot]. Available at: <https://www.care-o-bot.de/de/care-o-bot-4/technical-data.html/> (accessed 26 February 20).
25. Kiva Systems: Three Engineers, Hundreds of Robots, One Warehouse. Available at: <https://spectrum.ieee.org/robotics/robotics-software/three-engineers-hundreds-of-robots-one-warehouse> (accessed 26 February 20).
26. Servisnyy gumanoidnyy robot Rollin' Justin [Service humanoid robot Rollin' Justin]. Available at: <https://www.dlr.de/rm/en/desktopdefault.aspx/tabid-11427/#gallery/29202> (accessed 26 February 20).

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Ю.В. Подураев.

Андреев Виктор Павлович – Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» (МГТУ «СТАНКИН»); e-mail: andreevvipa@yandex.ru; 127055, Москва, Вадковский пер., 1; тел.: +79652107951; д.т.н.; к.ф.-м.н.; профессор; кафедра сенсорных и управляющих систем.

Ким Валерий Леонидович – e-mail: top7733@gmail.com; тел.: +79153041436; кафедра робототехники и мехатроники; аспирант; ассистент.

Эприков Станислав Робертович – Институт прикладной математики им М.В. Келдыша Российской академии наук; e-mail: stanislav.eprikov@gmail.com; 125047, г. Москва, Миусская пл., 4; тел.: +79175254747; аспирант.

Andreev Victor Pavlovich – Moscow State University of Technology «STANKIN» (MSTU «STANKIN»); e-mail: andreevvipa@yandex.ru; 1, Vadkovsky per., Moscow, 127055, Russia; phone: +79652107951; the department of sensory and drive systems; dr. of eng. sc.; professor.

Kim Valerii Leonidovich – e-mail: top7733@gmail.com; phone: +79153041436; the department of robotics and mechatronics; postgraduate student; assistant.

Eprikov Stanislav Robertovich – The Keldysh Institute of Applied Mathematics; e-mail: stanislav.eprikov@gmail.com; 4, Miusskya pl., Moscow, 125047, Russia; phone: +79175254747; postgraduate student.

УДК 004.932.2

DOI 10.18522/2311-3103-2020-1-218-232

**В.А. Бондаренко, Д.К. Ельцова, А.И. Лизин, В.А. Павлова, М.В. Созинова,
В.А. Тупиков**

МНОГОАГЕНТНЫЙ АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ И СОПРОВОЖДЕНИЯ НЕДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ ОБЪЕКТОВ

В целях разработки робастного алгоритма автоматического обнаружения и сопровождения недетерминированных объектов для встраиваемых вычислительных систем с оптико-электронными устройствами. В рамках данной работы произведено исследование и анализ имеющегося мирового научно-технического опыта в области алгоритмов авто-

матического сопровождения общего назначения. Наиболее успешные из исследованных алгоритмов, подходящие для долговременного устойчивого автоматического сопровождения объектов (без априорного знания о типе объекта слежения) на сегодняшний день уже вышли за рамки решения задачи исключительно сопровождения, и включают в себя синергетическое сочетание нескольких разнородных алгоритмов сопровождения, а также как минимум один алгоритм автоматического обнаружения и/или классификации. В статье показано что наиболее устойчивые современные алгоритмы автоматического сопровождения представляют собой многоагентную систему, принимающую решение о текущем положении, размерах и других параметрах сопровождаемого образа на основе интеллектуального голосования составляющих систему модулей, осуществляющих самостоятельное слежение за объектом и формирование его модели. Индивидуальные модели каждого из модулей уточняются по результатам принятия коллективного решения. Авторами исследования выделены наиболее эффективные из применяемых базовых алгоритмов, подходящие для применения во встраиваемых вычислительных системах робототехнических комплексов, и разработан новый многоагентный алгоритм автоматического обнаружения и сопровождения недетерминированных объектов. Представленный многоагентный алгоритм включает в себя модуль выделения и сопоставления ключевых точек на изображениях, модуль кластеризации и фильтрации ключевых точек с применением алгоритма DBSCAN, модуль сопровождения на основе алгоритма вычисления оптического потока и модуль классификации ключевых точек. Проведено полунатурное тестирование разработанного алгоритма и оценена его эффективность в решении задач не только автоматического сопровождения объектов, но и задач автоматического обнаружения объектов по нескольким эталонным образам. В заключении представлены предложения по дальнейшему повышению точности разработанного алгоритма и по его оптимизации и внедрению в состав специального программного обеспечения бортовых вычислительных систем летательных аппаратов.

Многоагентный алгоритм; автоматическое обнаружение; автосопровождение; ключевые точки; оптический поток; встраиваемые системы.

**V.A. Bondarenko, D.K. Eltsova, A.I. Lizin, V.A. Pavlova, M.V. Sozinova,
V.A. Tupikov**

MULTI-AGENT ALGORITHM FOR AUTOMATIC DETECTION AND TRACKING OF NON-DETERMINISTIC OBJECTS

In order to develop a robust algorithm for the automatic detection and tracking of non-deterministic objects for embedded computing systems, in this work, a study and analysis in the field of state-of-the-art general-purpose automatic tracking algorithms is performed. The most successful of those algorithms suitable for long-term stable automatic tracking of objects (without a priori knowledge of the type of object being tracked) have already gone beyond solving exclusively tracking problems, and include a synergistic combination of several heterogeneous tracking algorithms, as well as at least one automatic detection and / or classification algorithm. Thus, the authors of the article conclude that the most stable modern automatic tracking algorithms are a multi-agent system that makes a decision about the current position, size and other parameters of the tracked object image based on intelligent voting of system's submodules that independently monitor the object and form its model. Individual models of each of the submodules are updated based on the results of a collective decision. The authors of the study identified the most effective of the applied basic algorithms suitable for use in embedded computing systems of robotic systems, and developed a new multi-agent algorithm for the automatic detection and tracking of non-deterministic objects. The presented multi-agent algorithm includes a submodule for extracting and matching key points in images, a clustering and filtering submodule for key points using the DBSCAN algorithm, a tracking submodule based on the optical flow calculation algorithm, and a key point classification submodule. A semi-natural testing of the developed algorithm was carried out and its effectiveness in solving tasks not only of automatic tracking of objects, but also in tasks of automatic objects detection using several reference images were evaluated. In conclusion, the authors present steps for further improving the accuracy and performance of the developed algorithm for its forthcoming implementation for on-board computing systems of aerial vehicles.

Multi-agent algorithm; automatic detection; auto tracking; key points; optical flow; embedded systems.

Введение. В современных системах технического зрения всё ещё остро стоит проблема автоматического сопровождения недетерминированных объектов в сложных условиях наблюдения. Ни один из вариантов решения данной задачи, представленных в общедоступных научных трудах, не гарантирует уверенного долговременного сопровождения, однако анализ тенденций в разработке новых алгоритмов позволяет сделать вывод, что они чаще всего представляют собой группу разнородных связанных алгоритмов обработки изображений, осуществляющих параллельную, согласованную во времени обработку изображения, его анализ, и дальнейшее принятие совместного решения о положении, размерах и иных параметрах сопровождаемого объекта. В ходе обзора современных алгоритмов выделены три наиболее эффективных на данный момент многоагентных алгоритма: TLD [1], CMT [2] и STRUCK [3]. Эти алгоритмы показывают высокую устойчивость к частичным или полным перекрытиям объекта слежения, а также к различным постепенным изменениям масштаба, разворота и ракурса наблюдения объекта.

Алгоритм TLD основан на использовании подхода Сопровождение-Обучение-Обнаружение (Tracking-Learning-Detection). Помимо краткосрочного сопровождения объекта от кадра к кадру, производится обнаружение всех локальных появлений объекта и на их основе строится модель объекта слежения. Модуль обучения призван снизить ошибки работы алгоритма, путем коррекции модели по результатам сопровождения. Однако, согласно данному алгоритму, обнаружение производится по всему кадру изображения с окнами разных масштабов, а для обучения используются вейвлеты Хаара. Это существенно увеличивает вычислительную сложность алгоритма и не позволяет использовать его в системах реального времени.

Алгоритм CMT (Consensus-based Matching and Tracking) основан на сопровождении объекта по ключевым точкам. Обнаружение производится посредством голосования каждой отобранной точки за центр объекта. За счет использования быстрых детекторов и бинарных дескрипторов, алгоритм способен работать в реальном масштабе времени, а отказ от обновления информации об объекте слежения (сравнение осуществляется с первоначально составленным эталонным описанием) снижает риск возникновения ошибок при сопровождении.

Однако, отказ от обновления информации об объекте является основным недостатком этого алгоритма, поскольку в реальных условиях наблюдения взятые на сопровождение объекты могут претерпевать сильные масштабные, поворотные и перспективные изменения.

Алгоритм Struck (Structured Output Tracking with Kernels) использует для классификации метод опорных векторов (SVM), который обучается в процессе работы для обеспечения адаптивного сопровождения. Алгоритм предполагает механизм бюджетирования, который предотвращает неограниченный рост числа применяемых для обучения векторов признаков сопровождаемого объекта.

Основные недостатки – это достаточно высокая вычислительная сложность, а также относительная низкая устойчивость к шуму, так как у алгоритма отсутствуют методы отбора применяемых для обучения признаков.

На основе анализа сильных сторон описанных алгоритмов авторами был разработан новый многоагентный алгоритм автоматического обнаружения и сопровождения объектов, позволяющий осуществлять устойчивое автоматическое сопровождение объектов в различных условиях наблюдения, сохраняя при этом возможность применения во встраиваемых системах в режиме реального времени.

Применяемый подход. На вход реализованного алгоритма подаются видеопоследовательность I, \dots, I_n и описывающий прямоугольник, задающий первоначальное положение объекта для сопровождения (захват на сопровождение). Основная задача алгоритма сопровождения – автоматическое нахождения положения

объект интереса на дальнейшей последовательности изображений, если объект не найден на протяжении указанного времени, сообщить оператору об этом и/или запустить алгоритм обнаружения объекта. На рис. 1 представлена общая блок-схема разработанного многоагентного алгоритма автоматического сопровождения.

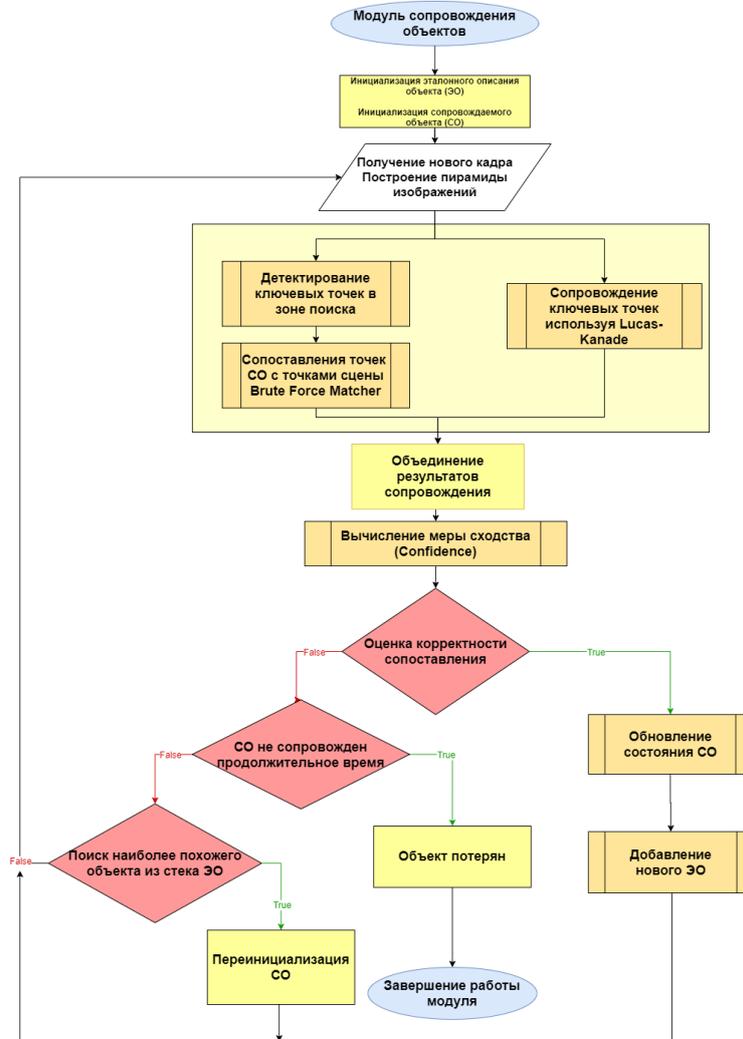


Рис. 1. Общая блок-схема разработанного алгоритма сопровождения

Рассмотрим каждый шаг алгоритма подробнее.

Пирамида изображений. Пирамидой изображений называется сгруппированный набор кратномасштабных изображений сцены. Использование пирамидальной структуры для выделения и сопоставления ключевых точек имеет следующие полезные свойства:

1. Сокращение времени обработки изображений.
2. Определение более точных начальных приближений для обработки нижних уровней по результатам обработки верхних уровней.
3. Масштабная инвариантность получаемого описания.
4. Иерархическая структура объекта.

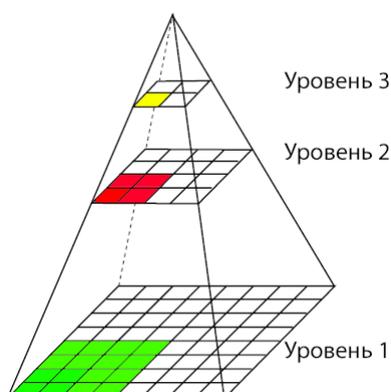


Рис. 2. Схематическое представление пирамиды изображений

Принцип построения пирамиды изображения представлен на рис. 2. Такая пирамида является последовательностью из N изображений. Каждый последующий уровень пирамиды представляет собой сжатое в K раз изображение предыдущего уровня (в применённом подходе $K = [1.2-1.5]$, $N = [8-10]$). Представленная пирамида используется для детекции ключевых точек и вычисления оптического потока, о котором будет рассказано далее.

Получив пирамиду изображений, появляется возможность воспользоваться ее свойствами для получения ключевых точек и их описания. В ходе анализа алгоритмов детектирования ключевых точек были рассмотрены [4] следующие алгоритмы:

- ◆ SIFT;
- ◆ ORB;
- ◆ Harris;
- ◆ Fast.

Детектор ORB оказался лучшим, среди рассмотренных, решением по отношению скорости работы к точности.

Детектор и дескриптор ORB. Основной используемой группой алгоритмов стали *детекторы ключевых точек*. Алгоритмы этой группы находят ключевые точки на изображении и описывают их так называемыми *дескрипторами*, позволяя отличить одну точку от другой. Главным преимуществом таких алгоритмов является существенное снижение обрабатываемой информации. В работах [5, 6] сформулированы основные требования к ключевым точкам. Наилучшие результаты данные алгоритмы демонстрируют на пирамиде изображений.

ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF) является развитием алгоритмов Fast и BRIEF [7]. Основные этапы алгоритма можно описать следующим образом:

1. Особые точки обнаруживаются на исходном изображении и на нескольких изображениях из пирамиды уменьшенных изображений при помощи быстрого древовидного алгоритма FAST.
2. Для обнаруженных точек вычисляется мера Харриса, кандидаты с низким значением меры Харриса отбрасываются.
3. Вычисляется угол ориентации особой точки.
4. Последовательность точек для бинарных сравнений в дескрипторе BRIEF поворачивается в соответствии с вычисленным углом.
5. По полученным точкам вычисляется бинарный дескриптор BRIEF.

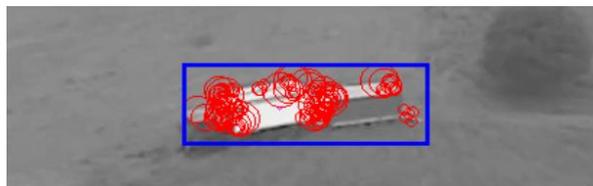


Рис. 3. Пример выделения ключевых точек

Как было представлено на блок-схеме, на первом этапе сопровождения на вход подаются координаты описывающего прямоугольника объекта. В данной области, используя детектор ORB, производится обнаружение ключевых точек (рис. 3). Полученные ключевые точки являются эталонным описанием объекта и будут использованы при дальнейшем сопровождении.

Поскольку было получено описание объекта и его положение на кадре, можно предположить, что на следующем кадре видеопотока сопровождаемый объект все еще находится в некоторой окрестности от предыдущего положения. Поэтому при последующем сопровождении, поиск объекта будет производиться не по всему кадру, а только в некоторой зоне (размер которой может корректироваться в процессе сопровождения на основе анализа скорости и направления движения объекта), что существенно уменьшает время работы детектора ключевых точек, а также уменьшает накладные расходы для построения пирамиды изображений.

Для уменьшения количества ключевых точек, не относящихся к объекту, был применен алгоритм кластеризации DBSCAN, позволяющий значительно снизить количество ключевых точек, не принадлежащих к объекту, что в свою очередь ускоряет сопоставление ключевых точек и повышает его точность.

Алгоритм DBSCAN. Данный подход эффективно разбивает наборы точек на группы по принципу минимального количества соседей и плотности распределения [8]. Большим отличительным плюсом данного алгоритма является отсутствие необходимости задания количества кластеров заранее.

Опишем подход более формально:

Пусть задано множество объектов X , для которых определена некоторая функция расстояния $\rho(x,y)$ и константы ϵ – максимальное расстояние между соседними объектами и m – количество соседей. Тогда:

1. Существует область $E(x)$, для которой $\forall y \in X : \rho(x,y) \leq \epsilon$. Такая область называется ϵ -окрестность объекта x .
2. Корневым объектом называется объект $p \in X$, если его ϵ -окрестность содержит не менее m объектов: $|E(p)| \geq m$.
3. Объект $q \in X$ непосредственно плотно-достижим из объекта p , если $q \in E(p)$ и p – корневой объект.
4. Объект $q \in X$ называется достижимым из объекта p , если существует путь p_1, p_2, \dots, p_n , где $p_1 = p, p_n = q$, такой, что $\forall i \in 1 \dots n - 1: p_{i+1}$ непосредственно плотно достижим из p_i .

Алгоритм выбирает необработанный корневой объект p из стека точек, помечает его и помещает всех его непосредственно плотно-достижимых соседей в список обхода. Далее для каждого объекта q из списка: помечается эта точка, и, если она тоже корневая, все её соседи добавляются в список обхода. Легко заметить, что кластеры помеченных точек, сформированные в ходе работы этого алгоритма, максимальны (т.е. их нельзя расширить еще одной точкой, чтобы удовлетворялись условия) и связаны в смысле плотно-достижимости. Отсюда следует, что, если не все точки были пройдены, можно перезапустить обход из какого-нибудь другого корневого объекта, и новый кластер не поглотит предыдущий. На рисунке 4 приведен пример визуализации результатов работы алгоритма кластеризации DBSCAN.

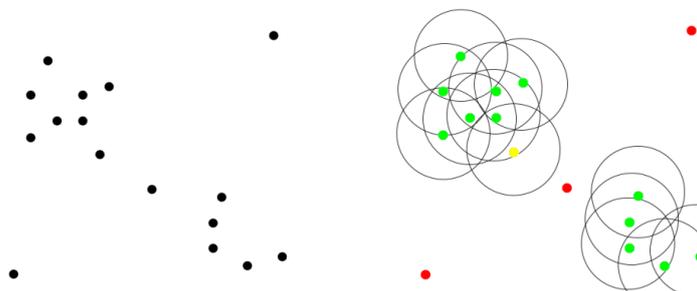


Рис. 4. Визуализация работы алгоритма кластеризации DBSCAN

Точки, не принадлежащие ни одному кластеру после работы алгоритма (помеченные особым образом) удаляются из списка, что при составлении эталонного описания сопровождаемого объекта позволяет существенно сократить количество обрабатываемых точек впоследствии.

Взятое эталонное описание сопровождаемого объекта берётся на сопровождение, по результатам которого эталонное описание обновляется. Сопровождение осуществляется с применением комбинации из трёх алгоритмов:

1. Brute Force Matching – сопоставление ключевых точек объекта и наблюдаемой сцены.
2. Lucas-Kanade – вычисление оптического потока для точек сопровождаемого объекта.
3. DBSCAN – кластеризация результатов голосования за центр сопровождаемого объекта точек, прослеживаемых методами 1 и 2.

Также применяется некоторая дополнительная обработка результатов данных алгоритмов.

Brute Force Matcher. Brute Force Matcher [9] (BFM) является популярным способом сопоставления ключевых точек между собой. Алгоритм путем простого перебора всех точек находит наиболее похожий дескриптор. Такой подход никак не учитывает положение ключевой точки на сцене, поэтому довольно часто дает ложные совпадения. Предлагается несколько модификаций данного алгоритма:

- ◆ Введение штрафной функции. Чем дальше находится точка от ожидаемых координат, тем сильнее штраф на ее меру схожести.
- ◆ Голосование за центр объекта. Все сопоставленные точки, принадлежащие объекту, должны проголосовать за центр объекта (относительная дистанция до центра объекта хранится в описании сопровождаемой ключевой точки). Используя алгоритм DBSCAN, требуется отсеять некорректные голоса.

Обе модификации в ходе тестирования показали высокую степень корректного сопоставления точек объекта и наблюдаемой сцены, однако второй подход показал себя более удачным при сопровождении объектов, движущихся с непостоянной скоростью.

Lucas-Kanade. Алгоритм Lucas-Kanade (LK) - широко распространённый алгоритм, позволяющий вычислить оптический поток [10]. Оптический поток – определение вектора перемещения указанной области изображения относительно её предыдущего положения, представляющее собой сдвиг каждой точки между двумя изображениями. Метод основан на предположении, что в локальной окрестности каждого пикселя значение оптического потока одинаково или изменяется мало, таким образом можно записать основное уравнение (1) оптического потока для всех пикселей окрестности и решить полученную систему (2) уравнений методом наименьших квадратов.

$$M\vec{u} = \vec{b} \quad (1)$$

или

$$\begin{pmatrix} I_x(x_1, y_1) & I_y(x_1, y_1) \\ * & * \\ * & * \\ * & * \\ I_x(x_n, y_n) & I_y(x_n, y_n) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -I_t(x_1, y_1) \\ * \\ * \\ * \\ -I_t(x_1, y_1) \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Сопровождение ключевых точек объекта методами Brute Force Matcher и Lucas-Kanade на данном кадре осуществляется независимо друг от друга, после результаты работы алгоритмов объединяются с применением процедуры голосования за центр цели. Из двух результатов выбирается наиболее точный результат, если дистанция между голосами $d \leq D_n$, в противном случае предпочтение отдаётся BFM.

Объединение результатов работы (процедура Consensus) разнородных алгоритмов, позволяет воспользоваться их преимуществами (высокая точность сопровождения LK на малых временных отрезках) и нивелировать их недостатки («уплывание» точек, сопровождаемых LK, корректируется BFM). Благодаря комбинации трех подходов во время сопровождения имеется возможность отсекаать точки, не принадлежащие объекту.

Мера схожести. Получив новые координаты ключевых точек сопровождаемого объекта, необходимо оценить корректность полученного результата и оценить общую степень уверенности системы в том, что объект удалось сопроводить. Предлагается вычислять меру уверенности (Confidence), показывающую на сколько удачно удалось сопроводить объект. Предложенная мера состоит из 6 параметров и соответствующей весовой функции:

1. Средняя схожесть сопоставленных точек (при сравнении дескрипторов в BFM).
2. Количество успешно сопровождаемых точек (по отношению к общему количеству сопровождаемых точек).
3. Оценка меры сходства инвариантных *Hu* моментов вычисляемых на наборе успешно сопоставленных ключевых точек (по сравнению с предыдущим значением).
4. Вероятность того, что точки принадлежат сопровождаемому объекту, полученная от Байесовского классификатора (обучаемого в процессе сопровождения по бинарным дескрипторам ключевых точек).
5. Схожесть площади выпуклого многоугольника, описывающего успешно сопровождаемые точки.
6. Схожесть периметра выпуклого многоугольника, описывающего успешно сопровождаемые точки.

Оцениваемые меры взвешиваются весовой функцией и суммируются, в сумме данные параметры должны составлять единицу для полного совпадения. Некоторые из оцениваемых параметров (*Hu* моменты, геометрические соотношения прямоугольников) являются менее точными при малых размерах сопровождаемого объекта и становятся значительно точнее при увеличении его размеров.

Применение весовой функции позволяет динамически изменять вклад оцениваемых параметров в определение меры сходства, что позволяет отдавать больший вклад нужным параметрам при изменении размеров объекта и в целом повышает устойчивость получаемой оценки меры схожести.

Ну моменты. Инвариантные моменты представляют собой комбинации нормализованных пространственных моментов с порядком до третьего включительно. Они остаются неизменными при перемещении, повороте и масштабировании изображения. В общем случае момент изображения вычисляется как:

$$m_{pq} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x^p y^q f(x, y) dx dy ,$$

где $p, q = 0, 1, 2, 3 \dots n$; $f(x, y)$ – функция яркости; x, y – координаты.

Алгоритм Naive Bayes Classifier. Наивный байесовский классификатор [11] – вероятностный классификатор, использующий в своей основе теорему Байеса со строгими (наивными) предположениями о независимости. Классическая область применения данного алгоритма – фильтрация писем от спама.

Основными причинами выбора данного классификатора является малое количество данных необходимых для обучения, оценки параметров, классификации и возможность обучаться во время сопровождения объекта.

В основе классификатора лежит теорема Байеса:

$$P(c|d) = \frac{P(d|c)P(c)}{P(d)},$$

где, $P(c|d)$ – вероятность, что d принадлежит классу c , $P(d|c)$ – вероятность встретить d среди всей выборки класса c , $P(c)$ – безусловная вероятность встретить класс c в общей выборке, $P(d)$ – безусловная вероятность d в общей выборке. При классификации основная задача – это определить наиболее вероятный класс объекта (в случае сопровождения – объект/не объект). Байесовский классификатор использует оценку апостериорного максимума для определения наиболее вероятного класса. Опуская вывод итоговой формулы, получаем:

$$c = \operatorname{argmax} c \in C \left[\log \log \frac{D_c}{D} + \sum_{i=1}^n \frac{W_{ic}}{|V| + \sum_{i' \in V} W_{i'c}} \right], \quad (3)$$

где, D_c – количество объектов, принадлежащих классу c , а D – общее количество объектов в обучающей выборке, W_{ic} – количество сколько раз i -ый признак встречается в классе c , V – список всех уникальных объектов.

В простейшем случае выбирается тот класс, который получил наибольшую оценку. Применяя представленный подход к классификации, во время сопровождения будут распознаваться два класса: объект и не объект. Под не объектом будем понимать все сторонние структуры вне прямоугольника, описывающего сопровождаемый объект. Используя формулу (3), появляется возможность на следующем поступившем кадре предположить, какой объект какого класса алгоритм пытается сопроводить.

Алгоритм Convex hull. Выпуклой оболочкой (Convex hull) называют наименьшее выпуклое множество, содержащее множество X . Данный алгоритм позволяет более корректно оценивать геометрические изменения объекта, чем простой описывающий прямоугольник, который часто используется в алгоритмах сопровождения.

Алгоритм состоит из следующих шагов:

1. Определяется точка p_0 множества с самой маленькой y -координатой (если таких несколько – выбирается самая правая из них), добавляется в оболочку.
2. Все оставшиеся точки сортируются по значению полярного угла относительно p_0 .
3. Самая первая из отсортированных точек p_1 добавляется в оболочку.

4. Анализируется следующая по счету точка t . Пока t и две последних точки в текущей оболочке p_i и p_{i-1} образуют неправый поворот точка p_i удаляется из оболочки.

5. Точка t добавляется в оболочку.

6. Пункты 4-5 выполняются до тех пор, пока не закончатся точки.

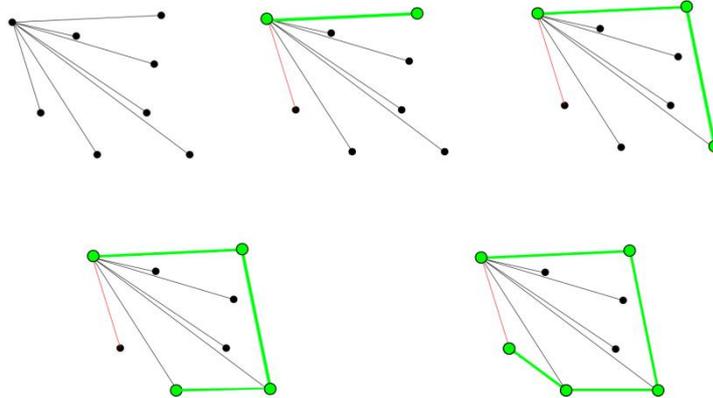


Рис. 5. Пример построения выпуклой оболочки вокруг набора точек

На рис. 5 представлен пример построения выпуклой оболочки вокруг набора точек. Для полученного таким образом многоугольника можно рассчитать его площадь и периметр, что дает большую точность чем обычный описывающий прямоугольник. Вычисленные значения можно использовать при определении меры уверенности алгоритма.

Оценка корректности сопоставления. Оценка корректности сопоставления точек одна из важных частей разработанного многоагентного алгоритма. От ее правильности зависят дальнейшие этапы работы алгоритма. Рассчитанная ранее мера уверенности является достаточно точной мерой оценки, но поскольку она рассчитывается на основе сопоставленных точек она может давать некорректные результаты. По этой причине стоит ввести несколько дополнительных условий по которым будет выноситься решение об успешности сопровождения. К таким условиям относятся:

- ◆ Количество сопоставленных точек.
- ◆ Соотношение сопровождаемых точек к сопоставленным.
- ◆ Разница между предыдущей мерой уверенности и текущей.

Принимая во внимание представленные условия, но в большей степени опираясь на меру схожести, можно корректно оценить правильность сопровождения.

Обновление модели сопровождаемого объекта. В процессе обновления модели сопровождаемого объекта у точек, которые удалось сопроводить, обновляются координаты, дескрипторы и параметры движения. Точки, которые не удалось сопроводить перемещаются на новые координаты на среднее смещение объекта (если подобные точки не обновлялись достаточно давно, они удаляются из стека точек). Обновляются также ну моменты набора ключевых точек объекта, классификатору подаются новые данные для обучения.

Также, поскольку наблюдаемый объект со временем видоизменяется, необходима процедура не только обновления текущих точек объекта, но и добавления новых точек со сцены.

Поиск и добавление кандидатов. Данная процедура пытается добавить к сопровождаемому набору точек объекта точки со сцены. На первом этапе требуется найти возможные точки кандидаты для сопровождаемого объекта. В описываемом прямоугольнике сопровождаемого объекта, увеличенного на 10 % от наименьшей стороны, запоминаются точки сцены, не относящиеся к сопровождаемому стеку.

Сохраненные точки спустя определенный отрезок времени сопоставляются с обновленной сценой. Корректно сопоставленные точки добавляются в кандидаты на добавление (в набор точек объекта) и отслеживаются параллельно с сопровождаемым объектом. Сопровождение кандидатов происходит по той же логике, как и сопровождение объекта.

Процедура добавления ключевых точек из кандидатов различна для объектов разного размера. Для больших объектов производится кластеризация точек объекта совместно с точками кандидатами. Из кластера, где соотношение точек кандидатов к точкам объекта является наибольшим, добавляются точки кандидаты, которые сопровождалась дольше чем другие, в стек сопровождаемого объекта. Для малых объектов добавление происходит путем нахождения той части объекта, где множество сопровождаемых точек объекта наиболее разрежено. Таким образом, точки сцены, движущиеся вместе с объектом, могут быть добавлены к сопровождаемому объекту, при условии, что сопровождаемых точек в наборе становится недостаточно, а их текстурные характеристики удовлетворяют критериям классификации Bayes Classifier.

Добавление нового эталона. Использование набора (стека) эталонных описаний объекта позволяет при потере объекта производить его переобнаружение, используя уже описанные выше алгоритмы и меры оценки. Если мера схожести между последним эталоном и текущим состоянием объекта достаточно высока (но при этом в достаточной мере изменился периметр или площадь), имеет смысл добавить данный сопровождаемый объект как новый эталон. Максимальное количество эталонов в стеке ограничивается в соответствии с доступной производительностью применяемой вычислительной системы.

Потеря объекта. Стоит отметить, что при потере объекта трудно спрогнозировать ожидаемое положение объекта. Поэтому с каждым кадром, на котором не удалось найти объект, требуется постепенно увеличивать зону поиска. В ходе разработки алгоритма было принято решение не превышать зону поиска объекта более чем на 80 % от площади кадра, для экономии вычислительных ресурсов.

В данной процедуре с каждой новой итерацией поиска перебирается накопленный список эталонов, которые удалось добавить в стек в ходе работы алгоритма сопровождения, и эталоны по очереди сопоставляются с наблюдаемой сценой до достижения наилучшего соответствия, оцениваемого по мере уверенности, описанной выше. Поиск объекта будет прекращен по истечении N секунд или после корректного повторного обнаружения (с достаточно высокой мерой сходства).

При корректном обнаружении для сопоставленных точек строится описывающий многоугольник, на основании которого со сцены берутся все ключевые точки, которыми заново инициализируется вновь обнаруженный сопровождаемый объект.

На рис. 6 представлены примеры работы разработанного алгоритма сопровождения (красные точки – точки сопровождаемого объекта, жёлтые – точки-кандидаты, голубые – описывающий многоугольник).

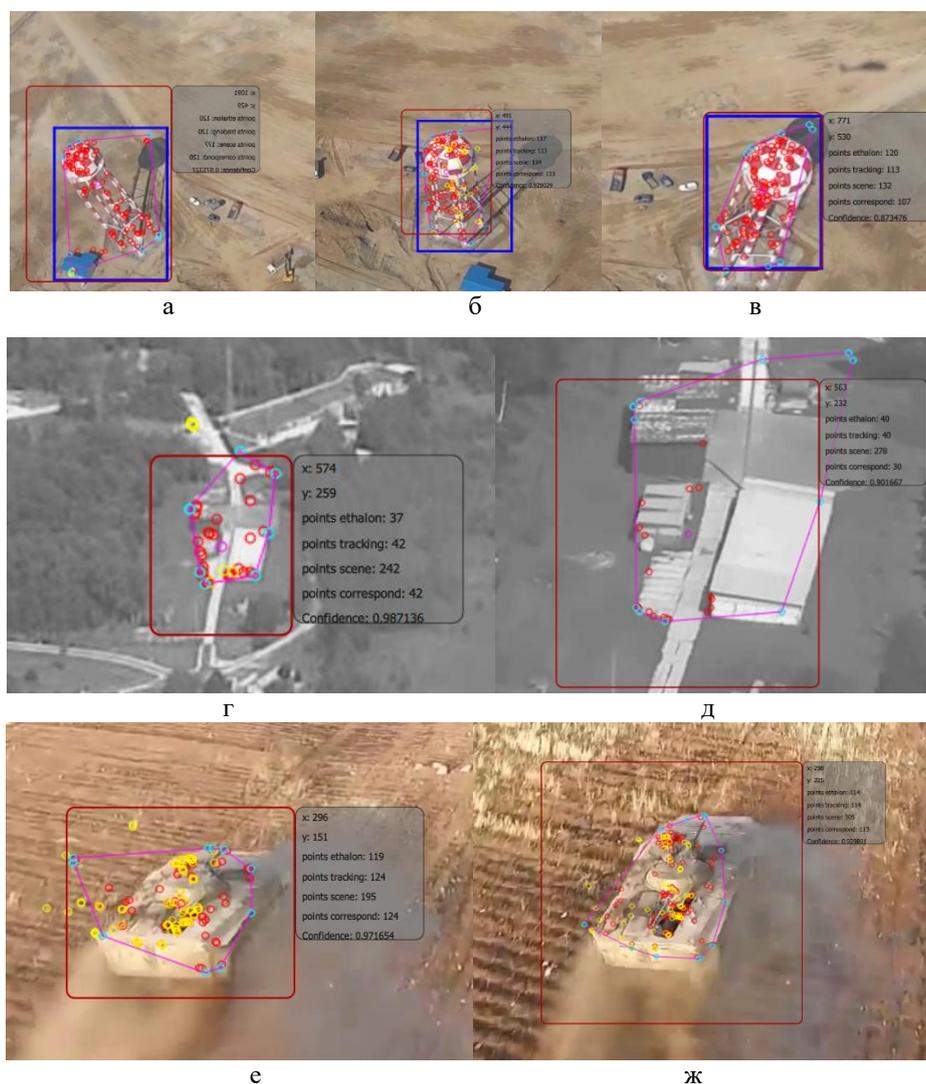


Рис. 6. Пример работы разработанного алгоритма автоматического сопровождения. Слева направо: а–в – этапы сопровождения объекта типа «Вышка»; г, д – этапы сопровождения группы объектов типа «Здание»; е, ж – этапы сопровождения объекта типа «БМП»

Заключение. Резюмируя изложенное, можно сказать, что разработанный многоагентный алгоритм позволяет выполнять высокоскоростную обработку изображений в реальном масштабе времени, что дает возможность использовать данный алгоритм, например, в составе специального программного обеспечения оптико-электронных систем беспилотных и пилотируемых летательных аппаратов.

Использование предложенного многоагентного алгоритма показало высокие результаты в сравнении конкурирующими подходами и с классическими алгоритмами на основе сравнения по шаблону для средне и крупноразмерных объектов.

На следующем этапе развития алгоритма планируется разработать и внедрить алгоритмы с применением KD-деревьев для хранения и сопоставления ключевых точек, что позволит в значительной степени увеличить скорость работы алгоритма. Также

перспективным является улучшение в части применения классификаторов другого типа. Наиболее перспективным направлением видится использование «Мешка слов» (Bag-of-Words) и вычисления гистограммы ориентированных градиентов (Histogram of oriented Gradients).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Zdenek Kalal, Krystian Mikolajczyk, and Jiri Matas.* Tracking-Learning-Detection // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. – January 2010. – Vol. 6, No. 1.
2. *Georg Nebehay, Roman Pflugfelder.* Consensus-based Matching and Tracking of Keypoints for Object Tracking. Safety and Security Department. AIT Austrian Institute of Technology, Austria, 2014.
3. *Sam Hare, Amir Saffari, Philip H.S. Torr.* Struck: Structured Output Tracking with Kernels. Oxford Brookes University. Oxford, UK 2Sony Computer Entertainment Europe, London, UK. 2014.
4. *Бондаренко В.А., Каплинский Г.Э., Павлова В.А., Туников В.А.* Метод поиска и сопоставления ключевых особенностей изображений для распознавания образов и сопровождения объектов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 1 (213). – С. 281-293.
5. *Rodehorst V., Koschan A.* Comparison and evaluation of feature point detectors // Proceedings of 5th International Symposium Turkish-German Joint Geodetic Days, 2006.
6. *Tuytelaars T., Mikolajczyk K.* Local Invariant Feature Detectors – Survey // Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision. – 2008. – No. 3(3). – P. 177-280.
7. *Ethan Rublee, Vincent Rabaud, Kurt Konolige, Gary Bradski.* ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF. Willow Garage, Menlo Park, California. 2011.
8. *Erich Schubert, Jörg Sander, Martin Ester, Hans Peter Kriegel, Xiaowei Xu.* DBSCAN Revisited, Revisited: Why and How You Should (Still) Use DBSCAN // ACM Trans. Database Syst. – 2017.
9. *Amila Jakubovic, Jasmin Velagic.* Image Feature Matching and Object Detection using Brute-Force Matchers. – Faculty of Electrical Engineering/University of Sarajevo Sarajevo, Bosnia and Herzegovina. 2018.
10. *Lucas B.D. and Kanade T.* An iterative image registration technique with an application to stereo vision // International Joint Conference on Artificial Intelligence. – 1981. – P. 674-679.
11. *Eibe Frank, Remco R. Bouckaert.* Naive Bayes for Text Classification with Unbalanced Classes. Computer Science Department, University of Waikato, New Zealand, Xtal Mountain Information Technology, Auckland, New Zealand. 2006.
12. *Lowe D.G.* Object recognition from local scale-invariant features // Proceedings of the International Conference on Computer Vision. – 1999. – No. 2. – P. 1150-1157.
13. *Sung-Joo Y., Kim T.* Development of Stereo Visual Odometry Based on Photogrammetric Feature Optimization // Remote Sensing. – 2019. – No. 11.
14. *Horn B.K.P. and Schunck B.G.* Determining optical flow // Artificial intelligence. – 1981. – Vol. 17, No. 1-3. – P. 185-203.
15. *Shi J. and Tomasi C.* Good features to track // Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 1994.
16. *Leutenegger S., Chli M., and Siegwart R.Y.* BRISK: Binary robust invariant scalable keypoints // In ICCV. – 2011.
17. *Shahed Nejhum S.M., Ho J., and Yang M.-H.* Visual tracking with histograms and articulating blocks // In CVPR. – 2008.
18. *Zhang L. and van der Maaten L.* Structure preserving object tracking // In CVPR. – 2013.
19. *Martin Ester, Hans-Peter Kriegel, Jiirg Sander, Xiaowei Xu.* A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise. Institute for Computer Science, University of Munich Oettingenstr. 67, D-80538 Miinchen, Germany, 1996.
20. *Taheri S., Mammadov M.* Learning the naive Bayes classifier with optimization models. Centre for Informatics and Applied Optimization School of Science, Information Technology and Engineering, University of Ballarat, Victoria 3353, Australia. 2.
21. *Andrew Moores.* Efficient memory-based learning for robot control. 15 JJ Thomson Avenue Cambridge CB3 0FD United Kingdom. 1990.

REFERENCES

1. Zdenek Kalal, Krystian Mikolajczyk, and Jiri Matas. Tracking-Learning-Detection, *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, January 2010, Vol. 6, No. 1.
2. Georg Nebel, Roman Pflugfelder. Consensus-based Matching and Tracking of Keypoints for Object Tracking. Safety and Security Department. AIT Austrian Institute of Technology, Austria, 2014.
3. Sam Hare, Amir Saffari, Philip H.S. Torr. Struck: Structured Output Tracking with Kernels. Oxford Brookes University. Oxford, UK 2Sony Computer Entertainment Europe, London, UK. 2014.
4. Bondarenko V.A., Kaplinskiy G.E., Pavlova V.A., Tupikov V.A. Metod poiska i sopostavleniya klyuchevykh osobennostey izobrazheniy dlya raspoznavaniya obrazov i soprovozhdeniya ob"ektov [Method for searching and matching key features of images for image recognition and object tracking], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 1 (213), pp. 281-293.
5. Rodehorst V., Koschan A. Comparison and evaluation of feature point detectors, *Proceedings of 5th International Symposium Turkish-German Joint Geodetic Days, 2006*.
6. Tuytelaars T., Mikolajczyk K. Local Invariant Feature Detectors – Survey, *Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision*, 2008, No. 3 (3), pp. 177-280.
7. Ethan Rublee, Vincent Rabaud, Kurt Konolige, Gary Bradski. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF. Willow Garage, Menlo Park, California. 2011.
8. Erich Schubert, Jörg Sander, Martin Ester, Hans Peter Kriegel, Xiaowei Xu. DBSCAN Revisited, Revisited: Why and How You Should (Still) Use DBSCAN, *ACM Trans. Database Syst.*, 2017.
9. Amila Jakubovic, Jasmin Velagic. Image Feature Matching and Object Detection using Brute-Force Matchers. Faculty of Electrical Engineering/University of Sarajevo Sarajevo, Bosnia and Herzegovina. 2018.
10. Lucas B.D. and Kanade T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision, *International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 1981, pp. 674-679.
11. Eibe Frank, Remco R. Bouckaert. Naive Bayes for Text Classification with Unbalanced Classes. Computer Science Department, University of Waikato, New Zealand, Xtal Mountain Information Technology, Auckland, New Zealand. 2006.
12. Lowe D.G. Object recognition from local scale-invariant features, *Proceedings of the International Conference on Computer Vision*, 1999, No. 2, pp. 1150-1157.
13. Sung-Joo Y., Kim T. Development of Stereo Visual Odometry Based on Photogrammetric Feature Optimization, *Remote Sensing*, 2019, No. 11.
14. Horn B.K.P. and Schunck B.G. Determining optical flow, *Artificial intelligence*, 1981, Vol. 17, No. 1-3, pp. 185-203.
15. Shi J. and Tomasi C. Good features to track, *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1994.
16. Leutenegger S., Chli M., and Siegwart R.Y. BRISK: Binary robust invariant scalable keypoints, *In ICCV*, 2011.
17. Shahed Nejhum S.M., Ho J., and Yang M.-H. Visual tracking with histograms and articulating blocks, *In CVPR*, 2008.
18. Zhang L. and van der Maaten L. Structure preserving object tracking, *In CVPR*, 2013.
19. Martin Ester, Hans-Peter Kriegel, Jiirg Sander, Xiaowei Xu. A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise. Institute for Computer Science, University of Munich Oettingenstr. 67, D-80538 München, Germany, 1996.
20. Taheri S., Mammadov M. Learning the naive Bayes classifier with optimization models. Centre for Informatics and Applied Optimization School of Science, Information Technology and Engineering, University of Ballarat, Victoria 3353, Australia. 2.
21. Andrew Moores. Efficient memory-based learning for robot control. 15 JJ Thomson Avenue Cambridge CB3 0FD United Kingdom. 1990.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. С.Н. Крюков.

Тупиков Владимир Алексеевич – АО «Научно-производственное предприятие «Авиационная и морская электроника»; e-mail: tupikov@nppame.ru; 198097, г. Санкт-Петербург, ул. Маршала Говорова, 29, лит. «О», а/я 51; тел.: 88123274667; д.т.н.; профессор, зам. ген. директора; директор научно-производственного комплекса робототехнических систем специального назначения (НПК РТС СН).

Павлова Валерия Анатольевна – e-mail: pavlova@nppame.ru; к.т.н.; зам. директора НПК РТС СН по НИОКР.

Бондаренко Владимир Александрович – e-mail: bondarenko@nppame.ru; начальник центра средств интеллектуальной обработки изображений.

Лизин Алексей Игоревич – e-mail: lizin_a@nppame.ru, научный сотрудник.

Ельцова Дарья Константиновна – e-mail: eltsova@nppame.ru; научный сотрудник.

Созинова Мария Владимировна – e-mail: sozinova@nppame.ru; начальник отдела перспективных методов обработки изображений.

Tupikov Vladimir Alekseevich – SPE "Research and Production Enterprise "Air and Marine Electronics"; e-mail: tupikov@nppame.ru; 198097, Saint Petersburg, street Marshal Govorov, 29, lit. "O", P.O.B 51; phone: 88123274667; dr. of eng. sc.; professor; Deputy Director General; Director of Research and production complex of special purpose robotic systems.

Pavlova Valeria Anatolyevna – e-mail: pavlova@nppame.ru; cand. of eng. sc.; Deputy Director of research at Research and production complex of special purpose robotic systems.

Bondarenko Vladimir Alexandrovich – e-mail: bondarenko@nppame.ru; chief of intellectual image processing center.

Lizin Aleksey Lizin – e-mail: lizin_a@nppame.ru; researcher.

Eltsova Darya Konstantinovna – e-mail: eltsova@nppame.ru; researcher.

Sozinova Maria Vladimirovna – e-mail: sozinova@nppame.ru; chief of the department of Advanced Image Processing Techniques.

Раздел V. Техническое зрение

УДК 004.932.72

DOI 10.18522/2311-3103-2020-1-233-245

А.Е. Щелкунов, В.В. Ковалев, К.И. Морев, И.В. Сидько

МЕТРИКИ ОЦЕНКИ АЛГОРИТМОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ

Работа посвящена обзору существующих метрик для оценки качества выполнения задачи сопровождения объектов на видео различными алгоритмами. При оценке алгоритмов сопровождения для последующего их сравнения недостаточно использовать одну метрику, а следует оценивать алгоритмы по набору различных независимых оценок. С этой целью было проведено исследование существующих метрик оценки алгоритмов, результаты которого приведены в статье. В обзоре участвует множество различных подходов к оценке алгоритмов. Например, подходы основанные на оценке определения центра объекта сопровождения, которые являются одними из первых и популярных до сих пор метрик оценки алгоритмов сопровождения. К основным недостаткам таких подходов можно отнести сложность определения истинного центра объекта, а также интерпретация оценок при различных размерах объекта. Для устранения этих недостатков в статье вводится новая метрика: несмещенная (окошная) ошибка определения центра объекта, которая учитывает постоянную составляющую ошибки определения центра. К другим подходам можно отнести метрики, основанные на анализе коэффициента Жаккара. Так же в статье рассмотрены подходы, основанные на анализе сбоев сопровождения, в которых учитывается длина сопровождения и интенсивность отказов. Предложен новый метод оценки алгоритмов при потере визуального контакта с сопровождаемым объектом, учитывающий количество кадров в которых был потерян визуальный контакт с объектом. В ходе исследования были рассмотрены подходы оценки алгоритмов одновременного сопровождения нескольких объектов. Были предложены интегральные метрики, задача которых получение комплексной оценки алгоритма сопровождения. Для формирования комплексной оценки желательно использование различных некоррелированных метрик. Комплексные оценки предоставляют возможность сравнивать алгоритмы между собой. В качестве комплексной оценки в статье предлагается использование метрики, объединяющей точность и устойчивость алгоритма. Как правило, в качестве метрики точности используется коэффициент Жаккара, однако для задач где точность сопровождения центра объекта является основополагающей, авторами предлагается использовать в качестве метрики точности несмещенную ошибку определения центра.

Трекинг; сопровождение объектов; метрики оценки алгоритмов сопровождения.

A.E. Shchelkunov, V.V. Kovalev, K.I. Morev, I.V. Sidko

THE METRICS FOR TRACKING ALGORITHMS EVALUATION

The work is devoted to a review of existing metrics for assessing the quality of the task of tracking objects on video with various algorithms. When evaluating tracking algorithms for their subsequent comparison, it is not enough to use one metric, and algorithms should be evaluated using a set of different independent estimates. To this end, a study was conducted of existing metrics for evaluating algorithms, the results of which are given in the article. The review involves many different approaches to evaluating algorithms. For example, approaches based on the assessment of the definition of the center of the tracking object, which are one of the first and still popular metrics for evaluating tracking algorithms. The main disadvantages of such approaches include the difficulty of determining the true center of the object, as well as the interpretation of estimates for various sizes of the object. To eliminate these shortcomings, a

new metric is introduced in the article: an unbiased (window) error in determining the center of an object, which takes into account the constant component of the error in determining the center. Other approaches include metrics based on the analysis of the intersection over union. Also, the article considers approaches based on the analysis of tracking failures, which take into account the tracking length and failure rate. A new method is proposed for evaluating algorithms in case of loss of visual contact with an tracking object, taking into account the number of frames in which visual contact with the object was lost. During the study, approaches to evaluating algorithms for simultaneous tracking of several objects were considered. Integral metrics were proposed whose task is to obtain a comprehensive assessment of the tracking algorithm. For the formation of a comprehensive assessment, it is desirable to use various uncorrelated metrics. Complex estimates provide the ability to compare algorithms with each other. As a comprehensive assessment, the article proposes the use of a metric combining the accuracy and robustness of the algorithm. As a rule, the intersection over union is used as the accuracy metric, however, for problems where the accuracy of tracking the center of the object is fundamental, the authors propose using an unbiased error in determining the center as the accuracy metric.

Tracking; object tracking; metrics for evaluating tracking algorithms.

Введение. Современные темпы развития компьютерного зрения, как области научного знания, а также рост научного сообщества предоставляют исследователям возможность быстро создавать новые подходы и алгоритмы на основе хорошо себя показавших прежних, совмещая их с новыми и прогрессивными. Однако, для целенаправленного движения к повышению качества работы современных алгоритмов трекинга объектов в видеопоследовательности необходимо выработать надежный инструментарий для оценки различных алгоритмов, их сравнения и выбора наилучших по определенным критериям.

Анализ ошибки определения центра объекта. Первыми будут рассмотрены оценки, основанные на ошибке определения центра объекта сопровождения, или на разнице между координатами центра объекта предсказанными алгоритмом и истинными.

В общем случае состояние объекта описывается уравнением:

$$A = \{(R_t, x_t)\}_{t=1}^N, \quad (1)$$

где $x_t \in R$ – центр объекта в момент времени t , R_t – область (регион) объекта в момент времени t , $\{ \}_{t=1}^N$ – последовательность (массив) значений во времени от $t = 1$ до N , N – длина последовательности. R_t как правило, описывается обрамляющим прямоугольником, но может быть использована более сложная форма для повышения точности.

Центр объекта следует определять отдельно от центра области интереса, так как центр области не всегда соответствует центру объекта (рис. 1).



Рис. 1. Пример объекта

Ошибка определения центра объекта – одна из самых старых метрик для оценки алгоритмов сопровождения. Данная оценка до сих пор имеет широкую популярность. Ошибка рассчитывается на основе предсказанных координат центра объекта алгоритмом сопровождения и истинных (размеченных) координат центра объекта по формуле, указанной ниже:

$$\Delta(L^G, L^T) = \{\delta_t\}_{t=1}^N, \quad (2)$$

где L^G – положение объекта (размеченное положение), L^T предсказанное положение объекта алгоритмом сопровождения, δ_t – расстояние между центрами объекта предсказанным алгоритмом сопровождения и истинным в момент времени t , N – длина последовательности. Значение δ_t определяется по формуле

$$\delta_t = \|x_t^G - x_t^T\|, \quad (3)$$

где x_t^G – истинные координаты центра объекта в момент времени t , x_t^T – предсказанные координаты центра объекта алгоритмом сопровождения в момент времени t , $\|\cdot\|$ – норма.

Популярность метрик на основе анализа центра объекта обусловлена простотой разметки: необходимо разметить только одну точку на каждом кадре. Результаты оценки алгоритма представляют на графиках как на рисунке 2 или рассчитывают по следующим формулам, как среднюю и среднестатистическую ошибку определений координат центра соответственно

$$\Delta\mu(L^G, L^T) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \delta_t, \quad (4)$$

$$RMSE(L^G, L^T) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \|x_t^G - x_t^T\|^2}. \quad (5)$$

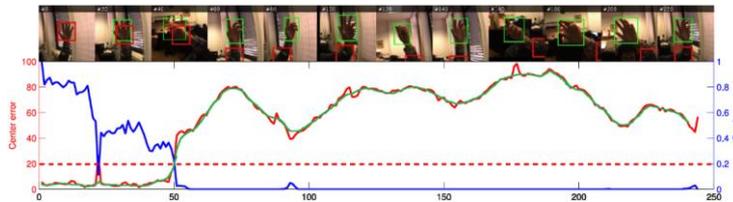


Рис. 2. Ошибка определения центра объекта и площадь перекрытия в зависимости от номера кадра

К недостаткам описанного выше подхода следует отнести чувствительность к необъективной разметке (некорректной работе оператора при разметке видеопоследовательности) и отсутствие учета размеров объекта [1]. Так для объекта, размер которого 100 пикселей ошибка определения координат центра объекта в 5 пикселей является не большой, в то время как для объекта размером 10 пикселей такая ошибка является существенной. В некоторых случаях, на практике сложно определить положение центра объекта. На рис. 1 представлен пример, где затруднительно определить координаты центра объекта.

Для исправления этих недостатков вводится нормализованная ошибка определения центра объекта по отношению к размеру объекта, рассчитываемая по формуле

$$\hat{\Delta}(\Lambda^G, \Lambda^T) = \{\hat{\delta}_t\}_{t=1}^N, \quad (6)$$

где $\hat{\delta}_t$ – нормализованная ошибка определения центра объекта в момент времени t и рассчитывается по формуле, представленной ниже:

$$\hat{\delta}_t = \left\| \frac{x_t^G - x_t^T}{\sqrt{S(R_t^G)}} \right\|, \quad (7)$$

где $S(R_t^G)$ – площадь объекта в момент времени t .

Однако, даже после проведения нормализации, оценка может дать вводящий в заблуждение результат. Так как ошибка уменьшается пропорционально размеру цели, и для больших объектов, в случае срыва сопровождения, ошибка изменится не существенно.

Существует проблема интерпретации измерений, в которых определение центра объекта сопровождения происходит с некоторым постоянным смещением. Несмотря на то, что объективно алгоритм успешно при этом выполняет задачу слежения за объектом. Для ее решения предлагается перейти к несмещенным (оконным) оценкам ошибки. С учетом гипотезы, о нормальном законе распределения ошибки определения центра, локальная среднестатистическая ошибка определения центра объекта описывается как:

$$\Delta\mu_i(\Lambda^G, \Lambda^T) = \frac{1}{M} \sum_{t=i}^{i+M} \delta_t, \quad (8)$$

где i – номер окна анализа, M – ширина окна анализа, δ_t – ошибка определения центра в момент времени t . Пример рассчитанной по формуле (8) локальной ошибки определения центра показан на рисунке 2 зеленым цветом. Ширина окна анализа равна 5 кадрам.

Пользуясь формулой (8) можно рассчитать среднеквадратическую несмещенную ошибку определения центра

$$RMSE_{-i}(\Lambda^G, \Lambda^T) = \sqrt{\frac{1}{N-M} \sum_{t=1}^{N-M} (\delta_t - \Delta\mu_t)^2}, \quad (9)$$

где i – номер окна, M – ширина окна анализа, δ_t – ошибка определения центра в кадре номер t , $\Delta\mu_i$ – локальное МО ошибки определения центра в окне t , рассчитанная по формуле (8), N – длина видеопоследовательности.

Оконный подсчет ошибок может быть полезен, так как в ходе сопровождения объекта интереса его центр может меняться из-за поворотов и изменения дальности до объекта.

Заменив в формулах (8), (9) ошибку определения центра δ_t , на нормализованную ошибку определения центра $\hat{\delta}_t$, рассчитанную по формуле (7), получим локальную нормализованную среднестатистическую ошибку определения центра

$$\hat{\Delta}\mu_i(\Lambda^G, \Lambda^T) = \frac{1}{M} \sum_{t=i}^{i+M} \hat{\delta}_t, \quad (10)$$

и среднеквадратическую нормализованную ошибку определения центра, рассчитанную по локальному МО

$$\Delta RMSE_{-i}(\Lambda^G, \Lambda^T) = \sqrt{\frac{1}{N-M} \sum_{i=1}^{N-M} (\delta_i^{\wedge} - \Delta \mu_i^{\wedge})^2}, \quad (11)$$

Анализ области перекрытия. Проблемы нормализации оценки точности алгоритма могут быть решены при помощи метрик, основанных на анализе области перекрытия. Для реализации данных метрик необходимо иметь информацию об области (регионе), в котором находится объект и предсказанной алгоритмом сопровождения области объекта в кадре. На основе этих данных по формуле, представленной ниже, можно рассчитать оценку области перекрытия

$$\Phi(\Lambda^G, \Lambda^T) = \{\varphi_t\}_t = 1^N, \quad (12)$$

где φ_t – регион перекрытия (Intersection Over Union или коэффициент Жаккара) в момент времени t , рассчитанный как

$$\varphi_t = \frac{R_t^G \wedge R_t^T}{R_t^G \vee R_t^T}. \quad (13)$$

В выражении (13) делимое – площадь области пересечения региона, предсказанного алгоритмом сопровождения и регионом объекта, делитель – площадь области объединения регионов. Суть выражения (13) показана на рис. 3



Рис. 3. Формула расчета региона перекрытия (IoU)

Отличительным свойством метрик на основе анализа площади перекрытия является то, что они учитывают, как положение объекта, так и его размер и не дают таких больших ошибок при срыве сопровождения, как при использовании средней и среднестатистической ошибки определений координат центра. Как только алгоритм начинает терять объект и плавно переходит на фон, значение оценки приближается к 0 и становится равным нулю при полном переходе алгоритма на фон, вне зависимости от того, насколько далеко от объекта ушли предсказания алгоритма сопровождения.

Если рассмотреть оценку алгоритма с точки зрения пиксельной классификации то выражение (13) можно записать в виде

$$\frac{R_t^G \wedge R_t^T}{R_t^G \vee R_t^T} = \frac{TP}{TP+FP+FN}, \quad (14)$$

где TP – количество правильно классифицированных пикселей, FP – количество ложно-положительных пикселей, FN – количество ложноотрицательных пикселей. Подобная формулировка похожа на F-меру, которую можно записать в следующем виде

$$F = \frac{2TP}{2TP+FN+FP}. \quad (15)$$

Precision – еще одна метрика, используемая в оценки алгоритмов сопровождения [2], описывается уравнением

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP}. \quad (16)$$

Для анализа всей последовательности кадров используют метрику среднего перекрытия [3,4]

$$\bar{\varphi} = \sum_{t=1}^N \frac{\varphi_t}{N}, \quad (17)$$

где φ_t – коэффициент перекрытия в момент времени t , N – длина последовательности. Или метрику длины правильно сопровождаемых кадров, описываемую уравнением

$$N_\tau = \|\{t \mid \varphi_t > \tau\}_{t=1}^N\|, \quad (18)$$

где τ – порог перекрытия [5].

Для сравнения оценок работы алгоритмов сопровождения на последовательностях разной длины, количество правильно сопровождаемых кадров делиться на общую длину последовательности в соответствии с формулой

$$P_\tau(\Lambda^G, \Lambda^T) = \frac{\|\{t \mid \varphi_t > \tau\}_{t=1}^N\|}{N}, \quad (19)$$

для случая покadroвого определения P_τ – процент правильно сопровождаемых кадров (true positive score). Такая интерпретация стала популярна для оценки алгоритмов сопровождения с появлением новой концепции и использовании алгоритмов сопровождения, основанных на обнаружении (детектировании) объекта в каждом кадре видеопоследовательности.

F-мера – еще одна метрика, которая может быть использована в данном контексте, однако стоит отметить, что метрики, оценивающие качество детекторов, игнорируют последовательный характер проблем сопровождения. Как показано на рис. 4, эти метрики не учитывают всей траектории (не анализируют траекторию). В то время как, траекторный анализ является важным аспектом в алгоритмах сопровождения.

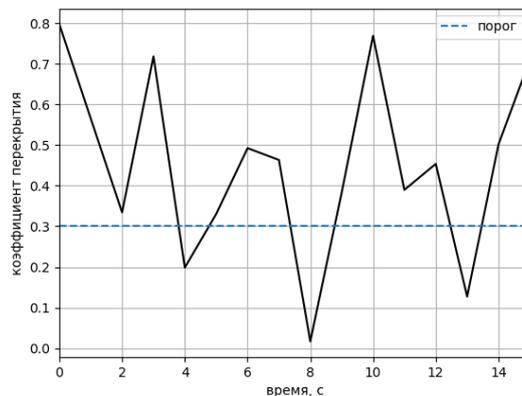


Рис 4. Зависимость перекрытия от времени

Анализ сбоев сопровождения. Длина сопровождения – количество верно сопровождаемых кадров с момента инициализации алгоритма сопровождения и до первого срыва сопровождения. В качестве критериев срыва сопровождения может выступать большое количество событий, например, оценка наблюдателя [6]. Однако при этом полученные оценки смещены и не могут быть надежно повторены даже одним и тем же наблюдателем. Лучшим подходом является замена наблюдателя автоматическим детектором срыва сопровождения. Например, путем установки порога оценки ошибки определения координат объекта или значения перекрытия. Выбор критерия может повлиять на результаты сравнения. Так, критерий оценки перекрытия дает более устойчивый результат, чем оценка ошибки определения центра объекта, при изменении размеров объекта.

Однако, замена оператора автоматом приводит к недостатку: если последовательность имеет плохо различимый или плохо видимый объект в ее начале, то это может привести к плохой инициализации алгоритма сопровождения, что повышает вероятность срыва. Из этого следует, что требуется большое количество последовательностей, демонстрирующих различные начальные состояния.

Следующая метрика в значительной степени решает проблему оценки длины сопровождения за счет оператора человека, который реинициализирует алгоритм сопровождения после срыва [6, 7]. Здесь человек–оператор может быть заменен алгоритмом автообнаружения и распознавания. Для формализации метрики вводятся величины:

$$F_{\tau} = |\Phi_{\tau}|, \Phi_{\tau} = \{f_i\}, \quad (20)$$

где Φ_{τ} – массив, содержащий номера кадров в которых наблюдался срыв сопровождения, F_{τ} – длина массива Φ_{τ} или количество срывов сопровождения алгоритмом, τ – порог срыва сопровождения.

Пользуясь (20), определим интенсивность отказов

$$F_l = \frac{F_{\tau}}{N}, \quad (21)$$

где N – общее количество кадров в видеопоследовательности.

В отличие от метрики длины правильно сопровождаемых кадров (18), следующая оценка уменьшает влияние начальной части последовательности. Недостатком ее является то, что в оценке не отражается распределение отказов внутри последовательности. Так алгоритмы могут срывать равномерно через определенные промежутки, или могут срывать чаще на определенных участках. Чтобы учесть и минимизировать этот недостаток, следует провести анализ фрагментов траектории объекта между срывами сопровождения. На основе этого вводится понятие коэффициента распределения срывов сопровождения

$$F_r = \frac{1}{\log F_{\tau}} \sum_{f_i \in \Phi_{\tau}} \left(\frac{-\Delta f_i}{N} \log \frac{\Delta f_i}{N} \right), \quad (22)$$

где, f_i – позиция i -го сбоя в массиве Φ_{τ} , Δf_i – определяется выражением

$$\Delta f_i = \begin{cases} f_{i+1} - f_i, & f_i < \max(\Phi_{\tau}) \\ f_1 + N - f_i, & f_i = \max(\Phi_{\tau}) \end{cases} \quad (23)$$

Особый случай для последней ошибки гарантирует, что полученное значение не искажается началом и концом последовательности. Расчет значения коэффициента F_r имеет смысл только когда есть интервалы между отказами ($F_{\tau} > 1$). Максимальное значение $F_r = 1$ достигается если срывы сопровождения распределены по равномерному закону распределения.

Данный критерий нельзя использовать как самостоятельную оценку алгоритмов сопровождения, однако его можно использовать как дополнительный критерий устойчивости алгоритмов сопровождения.

Метрики оценки алгоритмов сопровождения нескольких объектов. Основными метриками для оценки алгоритмов сопровождения нескольких объектов являются Multiple object detection precision (МОТР) и Multiple object detection accuracy (МОТА) [8] описываемые уравнениями ниже, соответственно

$$МОТР = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{t=1}^N (\varphi_{i,t})}{\sum_{t=1}^N (M_t)}, \quad (24)$$

где M – количество объектов, M_t – количество объектов в момент времени t . В случае сопровождения одного объекта $M = M_t$.

$$МОТА = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (c_m MI_t + c_f FP_t + c_s SW_t)}{\sum_{t=1}^N (N_t^G)}, \quad (25)$$

где MI_t – количество пропусков, FP_t – количество неправильных обнаружений, SW_t – количество срывов захватов на другой, ложный объект, c_m, c_f, c_s – весовые коэффициенты, N_t^G – количество объектов в момент времени t .

Метрики оценки алгоритмов сопровождения при потере визуального контакта с объектом. В случае кратковременной потери визуального контакта с объектом интереса (скрытие объекта за препятствиями), алгоритмы автоматического сопровождения оцениваются вероятностью срыва сопровождения, оценка вероятности рассчитывается по формуле

$$P^* = \frac{n}{N}, \quad (26)$$

где n – количество случаев срывов сопровождения, N – общее количество выхода объекта из-за препятствия. В зависимости от числа кадров, в которых объект находится за препятствием, оценка вероятности срыва сопровождения изменяет свое значение. Для анализа алгоритма и визуализации оценки, предпочтительно строить график зависимости оценки вероятности срыва сопровождения от количества кадров, в которых объект находится за препятствием (рис. 5).

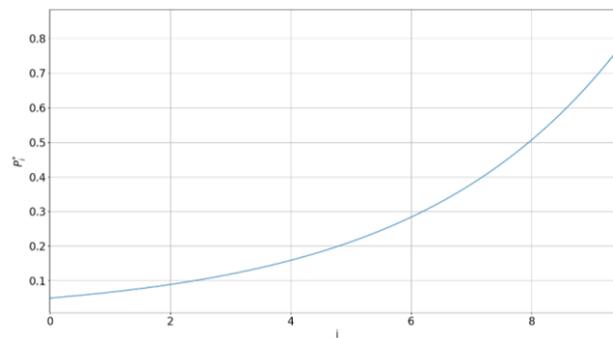


Рис. 5. Зависимость оценки вероятности срыва сопровождения от количества кадров в которых объект находился за препятствием

Так же можно оценивать вероятность для всех, имеющихся в наборе данных, ситуаций скрытия объекта сопровождения за препятствиями, рассчитанную по формуле ниже

$$P_m^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i^*, \quad (27)$$

где N – максимальное количество кадров в которых объект находится за препятствием, i – количество кадров в которых объект находится за препятствием, P_i^* – оценка вероятности срыва сопровождения в случае перекрытия объекта на i кадров. Выражение (31) можно описать как нормализованную площадь под графиком, представленном на рисунке 6. Для анализа точности и надежности оценки вероятности может быть использована формула, описывающая зависимость доверительного интервала и доверительной вероятности от количества экспериментов n , при условии большого значения n [9]:

$$\beta = P\{|p^* - p| < \varepsilon\} = 2\Phi\left(\frac{2\sqrt{n}}{\sqrt{p^*q^*}}\right), \quad (28)$$

где p^* – оценка вероятности, p – оцениваемая вероятность, ε – доверительный интервал, n – количество экспериментов, $q^* = 1 - p^*$, Φ – функция Лапласа, β – доверительная вероятность (вероятность того, что доверительный интервал $(p^* - \varepsilon, p^* + \varepsilon)$ покрывает оцениваемую вероятность p).

Пользуясь графиком из рисунка 6, можно грубо оценить максимальное количество кадров, в которых объект находится за препятствием, и при котором с заданной вероятностью произойдет срыв сопровождения. Для случая, когда i равно 0 (объект не перекрывается), значение оценки P_0^* рассчитывается по формуле (26).

Выше дан обзор метрик, используемых для оценки и сравнения алгоритмов сопровождения объектов на видеопоследовательности. Каждая из метрик отражает определенный критерий алгоритма и может быть использована как сама по себе, так и в составе с другими метриками, дополняющими друг друга.

Комбинированные метрики для оценки алгоритмов сопровождения. Комбинированная метрика (CoPTS – combined tracking performance score) комбинирует информацию о точности сопровождения и количестве сбоев в одной оценке и описывается выражением, представленным ниже:

$$CoTPS = \beta\Omega + (1 - \beta)\lambda_0, \quad (29)$$

где λ_0 – коэффициент не сопровождаемых кадров, β – коэффициент сопровождаемых кадров, Ω – коэффициент качества сопровождения, λ_0, β, Ω определяются выражениями, соответственно

$$\lambda_0 = \frac{N_0}{N}, \quad (30)$$

$$\beta = \frac{\hat{N}}{N}, \quad (31)$$

$$\Omega = \sum_{\tau \in (0,1]} \left(\frac{\hat{N}(\tau)}{N}\right), \quad (32)$$

где N_0 – количество кадров где IOU = 0, \hat{N} – количество кадров где IOU больше 0, $\hat{N}(\tau)$ – количество кадров, на который перекрытие больше 0, но меньше порога τ . $\hat{N}(\tau)$ определяется выражением

$$N(\tau) = |\{j: \varphi_j \geq 0 \wedge \varphi_j \leq \tau\}|. \quad (33)$$

Выражение (23) на самом деле является аппроксимацией интеграла по порогу и может быть переопределено как

$$\Omega = \int_0^1 \left(\frac{\hat{N}_\tau}{N}\right) d\tau = 1 - \int_0^1 \frac{P_\tau}{N} d\tau, \quad (34)$$

где $P(\tau) = |\{j: \varphi_j \geq \tau\}|$ количество кадров с перекрытием больше порога.

Также для сравнения алгоритмов сопровождения может использоваться оценка точности (насколько верно алгоритм определяет координаты и область объекта) и устойчивости (сколько раз алгоритм терял объект сопровождения). Далее оценка, основанная на паре точности и устойчивости, называется А–R (Accuracy – Robustness) пара.

Стоит отметить, что есть сходство между метриками CoTPS [1] и А–R. В обеих метриках учитывается два одинаковых аспекта сопровождения. Несмотря на это сходство, А–R пара лучше подходит для сравнения алгоритмов сопровождения по некоторым причинам:

- ◆ Выбранные меры не коррелированы.
- ◆ Протокол контролируемой оценки эффективнее использует последовательность кадров за счет повторного запуска алгоритма сопровождения в случае сбоя.
- ◆ Использование двух значений оценки для описания алгоритма дает больше возможностей для сравнения алгоритмов, за счет увеличения комбинаций результатов.

Согласно данным из [11], для А–R пары в качестве меры точности следует использовать математическое ожидание коэффициента Жаккара, но для алгоритмов основной задачей которых является точное сопровождение центра объекта, желательно использовать нормализованную среднеквадратическую ошибку определения центра, рассчитанную по локальному МО (11), т.к. в [11] указано, что класс оценок, основанных на ошибке определения центра объекта слабо коррелирует с интенсивностью отказов. Очевидно, что для А–R пары следует использовать пары метрик, характеризующихся слабой корреляцией.

В случае использования в качестве меры точности математического ожидания коэффициента Жаккара, А–R пара имеет вид:

$$A - R(L^G, L^T) = (\bar{\Phi}(L^G, L^T), F_0(L^G, L^T)), \quad (33)$$

где $\bar{\Phi}$ – среднее значение перекрытия F_0 – интенсивность отказов при пороге $\tau = 0$. Значение порога τ влияет на конечный результат. Если порог установить близким к 1, то алгоритм будет часто реинициализирован из-за возникновения даже слабых отклонений и итоговый результат будет слабо информативен. В формуле (33) используется минимальный порог $\tau = 0$, для того, чтобы, повторно запускать алгоритм сопровождения в случае полного несоответствия предсказанного региона с регионом объекта. Теоретически, алгоритм сопровождения может определять большую область вокруг объекта и, тем самым, избегать сбоев сопровождения, но тогда снизится точность определения области объекта. Данный случай является примером того как две оценки дополняют друг друга.

Оценки, полученные метрикой А–R, наиболее наглядно показывают различия между алгоритмами, если их отобразить на графике, как показано на рис. 6.

На рис. 6 каждый из сравниваемых алгоритмов имеет свои координаты в зависимости от значений оценки точности и устойчивости, рассчитанных по формуле (33). Алгоритмы, обладающие большей точностью, находятся выше на графике, а алгоритмы, обладающие большей устойчивостью правее.

Так как количество сбоев алгоритма сопровождения не имеет предела, то для визуализации оценки устойчивости алгоритма используется оценка, рассчитанная по формуле, приведенной ниже

$$R_s = e^{-SM}, \quad (34)$$

где S – количество кадров после последнего срыва, M – среднее время между сбоями сопровождения определяется как

$$M = \frac{F_0}{N}, \quad (35)$$

где F_0 – количество сбоев сопровождения, N – длина последовательности.

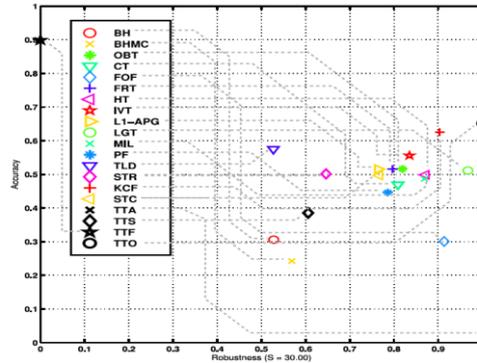


Рис. 6. Оценка точности и устойчивости алгоритмов

Выражение (35) может быть интерпретировано как вероятность того, что алгоритм сопровождения успешно сопроводит объект на протяжении S кадров с момента последнего срыва сопровождения.

Выводы. В связи с тем, что алгоритм автоматического сопровождения должен решать задачу в сложных условиях (смена ракурса объекта интереса, заезд за препятствия, изменения яркости и контрастности объекта интереса и фона), для оценки алгоритма требуется проводить большое количество экспериментов с учетом влияния внешних факторов на алгоритм сопровождения, как по отдельности, так и в совокупности друг с другом. Для оценки степени влияния вышеупомянутых факторов на алгоритм сопровождения рекомендуется пользоваться метриками оценки, описанными выше.

Из обзора следует выделить что, для оценки точности и устойчивости алгоритма, большей описательной способностью обладает метрика пары точности и устойчивости $A-R$, где точность, в зависимости от подхода, может оцениваться через метрики, основанные на пересечении областей объекта истинной и предсказанной, так и основанные на ошибке определения центра объекта. Для анализа сбоев сопровождения следует использовать метрику частоты отказов, так как она приближена к использованию алгоритма сопровождения в реальных условиях и позволяет получать оценки на всей длине последовательности кадров. Для анализа алгоритма сопровождения при потере визуального контакта с объектом интереса необходимо использовать оценку вероятности восстановления процесса сопровождения после выхода объекта из-за препятствия или оценку вероятности срыва сопровождения при заходе объекта за препятствие. Стоит отметить что в зависимости от количества кадров в которых объект не виден, меняется оценка вероятностей. Для более детальной оценки алгоритмов сопровождения рекомендуется строить график зависимости оценки вероятности срыва от количества кадров, как на рис. 5 и рассчитывать среднюю оценку вероятностей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Nawaz T., Cavallaro A. A protocol for evaluating video trackers under real-world conditions // Image Processing IEEE. – 2013. – Vol. 22, No. 4. – P. 1354-1361.
2. Godec M., Roth P., Bischof H. Hough-based tracking of nonrigid objects // ICCV. – Barcelona: IEEE, 2011. – P. 81-88.

3. Wang D., Lu H., Yang M. Online object tracking with sparse prototypes // IEEE Image Processing Conference. – 2013. – Vol. 22, No. 1. – P. 314-325.
4. Wu Y., Lim J., Yang M.-h. Online Object Tracking: A Benchmark // CVPR. – 2013.
5. Everingham M., Gool L., Williams I., Winn J., Zisserman A. The Pascal Visual Object Classes (VOC) Challenge // IJCV. – 2009. – Vol. 88, No. 2. – P. 303-338.
6. Kristan M., Kovačič S., Leonardis A., Pers J. A two-stage dynamic model for visual tracking // Transactions Systems Man Cybernet Part B. – 2010. – Vol. 40, No. 6. – P. 1505-1520.
7. Khan Z., Balch T., Dellaert F. MCMC-based particle filtering for tracking a variable number of interacting targets // IEEE Transactions Pattern Analysis. – 2005. – Vol. 27. – P. 1805-1819.
8. Kasturi R., Goldgof D., Soundararajan P., Manohar V., Garofolo J., Bowers R., Boonstra M., Korzhova V., Zhang J. Framework for performance evaluation of face, text, and vehicle detection and tracking in video: data, metrics, and protocol // TPAMI. – 2009. – Vol. 31, No. 2. – P. 319-326.
9. Венцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятности и ее инженерные приложения: учеб. пособие для вузов. – 2-е изд. – М.: Высш. шк., 2000. – 480 с.
10. Yang M., Wu Y., Hua G. Context-aware visual tracking // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 2006. – No. 31. – P. 1195-1209.
11. Stauffer C., Grimson W. Learning patterns of activity using real-time tracking // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2000. – P. 747-757.
12. Sundaresan A., Chellappa R. Multi-camera tracking of articulated human motion using shape and motion cues // IEEE Transactions on Image Processing. – 2009. – P. 2114-2126.
13. Smeulders A.M., Chu D., Cucchiara, S. Calderara, A., Shah M. Visual Tracking: an Experimental Survey // TPAMI. – 2013. – Vol. 21, No. 3. – P. 152-168.
14. Henriques F., Caseiro R., Martins P., Batista J. High-Speed Tracking with Kernelized Correlation Filters // TPAMI. – 2014. – Vol. 42, No. 5. – P. 345-362.
15. Frey J. Dueck D. Clustering by Passing Messages Between Data Points // Science Today. – 2007. – Vol. 315. – P. 972-976.
16. Smith K., Gatica-Perez D., Odohez J. Evaluating Multi-Object Tracking // CVPR Work. – 2005. – Vol. 3, IEEE. – P. 32-36.
17. Black J., Ellis T., Rosin P. A novel method for video tracking performance evaluation // VSPETS. – 2003. – C. 125-132.
18. Kao E., Daggett M., Hurley M. An information theoretic approach for tracker performance evaluation // CVPR. – 2009. – P. 1523-1529.
19. Bashir F. Porikli F. Performance Evaluation of Object Detection and Tracking Systems // PETS. – 2006. – P. 190-203.
20. Checka N., Wilson K., Rangarajan V., Darrell T. A probabilistic framework for multi-modal multi-person tracking // Proceedings of the IEEE Workshop on Multi-Object Tracking (WOMOT '03). – 2003. – P. 203-212.

REFERENCES

1. Nawaz T., Cavallaro A. A protocol for evaluating video trackers under real-world conditions, *Image Processing IEEE*, 2013, Vol. 22, No. 4, pp. 1354-1361.
2. Godec M., Roth P., Bischof H. Hough-based tracking of nonrigid objects, *ICCV*. Barcelona: IEEE, 2011, pp. 81-88.
3. Wang D., Lu H., Yang M. Online object tracking with sparse prototypes, *IEEE Image Processing Conference*, 2013, Vol. 22, No. 1, pp. 314-325.
4. Wu Y., Lim J., Yang M.-h. Online Object Tracking: A Benchmark, *CVPR*, 2013.
5. Everingham M., Gool L., Williams I., Winn J., Zisserman A. The Pascal Visual Object Classes (VOC) Challenge, *IJCV*, 2009, Vol. 88, No. 2, pp. 303-338.
6. Kristan M., Kovačič S., Leonardis A., Pers J. A two-stage dynamic model for visual tracking, *Transactions Systems Man Cybernet Part B*, 2010, Vol. 40, No. 6, pp. 1505-1520.
7. Khan Z., Balch T., Dellaert F. MCMC-based particle filtering for tracking a variable number of interacting targets, *IEEE Transactions Pattern Analysis*, 2005, Vol. 27, pp. 1805-1819.
8. Kasturi R., Goldgof D., Soundararajan P., Manohar V., Garofolo J., Bowers R., Boonstra M., Korzhova V., Zhang J. Framework for performance evaluation of face, text, and vehicle detection and tracking in video: data, metrics, and protocol, *TPAMI*, 2009, Vol. 31, No. 2, pp. 319-326.

9. *Ventsel' E.S., Ovcharov L.A.* Teoriya veroyatnosti i ee inzhenernye prilozheniya: ucheb. posobie dlya vuzov [Probability theory and its engineering applications: a textbook for universities]. 2nd ed. Moscow: Vyssh. shk., 2000, 480 p.
10. *Yang M., Wu Y., Hua G.* Context-aware visual tracking, *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2006, No. 31, pp. 1195-1209.
11. *Stauffer C., Grimson W.* Learning patterns of activity using real-time tracking // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. – 2000. – P. 747-757.
12. *Sundaresan A., Chellappa R.* Multi-camera tracking of articulated human motion using shape and motion cues, *IEEE Transactions on Image Processing*, 2009, pp. 2114-2126.
13. *Smeulders A. M., Chu D., Cucchiara, S. Calderara, A., Shah M.* Visual Tracking: an Experimental Survey, *TPAMI*, 2013, Vol. 21, No. 3, pp. 152-168.
14. *Henriques F., Caseiro R., Martins P., Batista J.* High-Speed Tracking with Kernelized Correlation Filters, *TPAMI*, 2014, Vol. 42, No. 5, pp. 345-362.
15. *Frey J. Dueck D.* Clustering by Passing Messages Between Data Points, *Science Today*, 2007, Vol. 315, pp. 972-976.
16. *Smith K., Gatica-Perez D., Odobez J.* Evaluating Multi-Object Tracking, *CVPR Work*, 2005, Vol. 3, IEEE, pp. 32-36.
17. *Black J., Ellis T., Rosin P.* A novel method for video tracking performance evaluation, *VS-PETS*, 2003, pp. 125-132.
18. *Kao E., Daggett M., Hurley M.* An information theoretic approach for tracker performance evaluation, *CVPR*, 2009, pp. 1523-1529.
19. *Bashir F. Porikli F.* Performance Evaluation of Object Detection and Tracking Systems, *PETS*, 2006, pp. 190-203.
20. *Checka N., Wilson K., Rangarajan V., Darrell T.* A probabilistic framework for multi-modal multi-person tracking, *Proceedings of the IEEE Workshop on Multi-Object Tracking (WOMOT '03)*, 2003, pp. 203-212.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Н.Е. Сергеев.

Щелкунов Александр Евгеньевич – АО «Научно–конструкторское бюро вычислительных систем» (АО НКБ ВС); e-mail: alexandrshchelkunov@mail.ru; г. Таганрог, ул. 1-я Линия; программист.

Ковалев Владислав Владимирович – e-mail: vlad.kovalev94@mail.ru; инженер-исследователь.

Морев Кирилл Иванович – e-mail: morev-ki@ya.ru; программист.

Сидько Иван Владимирович – e-mail: ivan.brokenroll@gmail.com; заведующий отдела; к.т.н.

Shchelkunov Alexander Evgen'evich – Joint Stock Company "Scientific Design Bureau of Computing Systems" (JSC SDB CS); e-mail: alexandrshchelkunov@mail.ru; 1st Liniya street, Taganrog, Russia; programmer.

Kovalev Vladislav Vladimirovich – e-mail: vlad.kovalev94@mail.ru; research-engineer.

Morev Kirill Ivanovich – e-mail: morev-ki@ya.ru; programmer.

Sidko Ivan Vladimirovich – e-mail: ivan.brokenroll@gmail.com; department head; cand. of eng. sc.

С.М. Соколов, А.А. Богуславский, С.А. Романенко

**ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ БОРТОВЫХ СИСТЕМ
ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОДВИЖНЫХ СРЕДСТВ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТЗ***

Целью исследования является повышение эффективности информационного обеспечения автономных подвижных средств с использованием зрительных данных и технологий его разработки за счёт рационального использования нетрадиционных вычислителей и специальной подготовки алгоритмического обеспечения. Использование нетрадиционных, гетерогенных вычислительных средств позволяет существенно расширить круг задач обработки зрительных данных в масштабе реального времени и, тем самым, увеличить ситуационную осведомлённость автономных РТК и оперативность её получения. Рациональное использование нетрадиционных вычислителей требует существенной переработки алгоритмического обеспечения. Большинство алгоритмов применяемых при обработке изображений, были разработаны в расчёте на реализацию на традиционных, фон-Неймановских архитектурах вычислителей и требуют существенных усилий для реализации на параллельных структурах и разработки специальных инструментальных средств программирования. В работе сделан акцент на исследования в области использования ПЛИС и рассмотрен ряд подходов в специальной подготовке необходимого алгоритмического обеспечения. В качестве модельных, демонстрационных примеров использования нетрадиционных вычислителей рассмотрена реализация таких алгоритмов обработки зрительных данных, которые активно используются в широком круге задач информационного обеспечения целенаправленных перемещений мобильных РТК. Описана подготовка и реализация на ПЛИС таких алгоритмов, как построение гистограмм, вычисление оптического потока, сегментация изображений. Приведены результаты экспериментов на действующих макетах бортовых вычислителей. В качестве исходных данных использованы зрительные данные, собранные при движении мобильных средств в условиях естественной среды. Всё используемое программное обеспечение выполнено на основе унифицированного каркаса программного обеспечения систем технического зрения реального времени отечественной разработки. В заключении обсуждаются дальнейшие шаги в указанном направлении, с учётом стремления к использованию отечественных программно-аппаратных средств.

Мобильные РТК; бортовые вычислители; реальное время; алгоритмическое обеспечение; система технического зрения.

S.M. Sokolov, A.A. Boguslavsky, S.A. Romanenko

**SOFTWARE AND HARDWARE FOR MOBILE MEANS INFORMATION
SUPPORT ONBOARD SYSTEMS WITH USE OF VISION SYSTEM**

Research objective is increase of autonomous mobile means information support efficiency with use of visual data and technologies of its development due to rational use of nonconventional calculators and special preparation of algorithmic providing. Use of nonconventional, heterogeneous computing means allows to expand significantly a circle of visual data processing problems on the real time scale and, thereby, to increase situational awareness of autonomous robots and efficiency of its receiving. Rational use of nonconventional calculators demands essential alteration of algorithmic providing. The majority of visual data algorithms were developed counting on realization on traditional, von Neumann architecture of calculators and demand essential efforts for realization on parallel structures and developments of special programming tools. In work the emphasis on researches in the area use FPGA is placed and a number of approaches in special preparation of necessary algorithmic is considered. As model, demonstration examples of use of nonconventional calculators realization of such algorithms of visual data processing which are

* Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 19-07-00113.

actively used in a wide range of information support problems of purposeful movements of mobile robot is considered. Preparation and realization on FPGA of such algorithms as creation of histograms, an optical flow calculation, segmentation of images is described. Results of experiments are given in the operating models of airborne computers. As basic data the visual data collected at the movement of mobile means in the conditions of habitat are used. All used software is executed on the basis of the unified software framework of the real time vision systems of domestic development. In the conclusion further steps in the specified direction, taking into account aspiration to use of domestic software and hardware are discussed.

Situational awareness; vision system; mobile robot; nonconventional calculators; algorithmic providing; airborne computers; real time.

Введение. Тенденции мобильной робототехники говорят о всё возрастающей роли ситуационной осведомлённости и оперативности принятия решений в информационно-управляющих системах современных и перспективных робототехнических комплексов (РТК). Информационное обеспечение подвижных средств, особенно системы технического зрения (СТЗ) в его составе, требует всё возрастающих вычислительных ресурсов и интеллектуальных технологий в алгоритмическом обеспечении. Нарастание мощности отдельных процессоров практически исчерпано (плотность ядер внутри одной микросхемы достигло физических пределов). Увеличение производительности возможно в направлении архитектурных решений, реконфигурируемых высокопроизводительных гетерогенных ресурсов, оптимизации коммуникационных взаимодействий и эффективной работе с памятью.

Активно ведутся работы по созданию различных специализированных процессоров [1–3]. Мировой опыт и опыт наших исследований говорят об эффективности сочетаний последовательной и параллельной обработки данных – организации гетерогенных/интеллектуальных вычислительных ресурсов [4–6]. Следует указать, что те же тенденции развития робототехники говорят о том, что для успешного внедрения в практику, необходимо обеспечить технологичность предлагаемых решений и их экономическую целесообразность. С учётом всё возрастающей доли программного обеспечения в стоимости РТК вопросы эффективности и технологичности изготовления алгоритмического обеспечения таких комплексов приобретают большое значение.

В работе рассматривается общая схема использования нетрадиционных вычислителей в процессе сбора и обработки зрительных данных, описывается опыт реализации алгоритмического обеспечения СТЗ с использованием отдельных элементов гетерогенных средств, обсуждаются перспективы развития этого направления. В качестве алгоритмов, исследуемых на первом этапе выбраны алгоритмы, которые по опыту предыдущих исследований актуальны для задач информационного обеспечения целенаправленных перемещений, навигационных задач.

Схема использования вычислительных ресурсов при сборе и обработке зрительных данных. Повышение степени автономности и полная автономность подвижных робототехнических комплексов, действующих в неподготовленных условиях, не возможны без использования систем технического зрения и эффективной реализации интеллектуального алгоритмического обеспечения [7–10]. Одними из ключевых требований, предъявляемых к алгоритмическому обеспечению (АО) подвижных средств является работа в масштабе реального времени, определяемым скоростями перемещений, и использование ограниченных бортовых вычислительных ресурсов. Эффективное/рациональное распределение работ по специализированным вычислителям – сложная задача, требующая разнообразных исследований, в частности, ответа на вопрос: какой исполнитель эффективнее решает какой тип задач. Если для таких традиционных навигационных средств, как БИНС, ГНСС, одометрия, взаимодействие с удалённым оператором, не требуется

специальных усилий в обеспечении работы в масштабе реального времени на базе традиционных вычислителей, то для сбора и обработки зрительных данных в масштабе реального времени такие усилия необходимы.

Практически с первых исследований систем компьютерного видения были выделены такие этапы в сборе и анализе зрительных данных, как предобработка, выделение первичных признаков объектов на изображениях и формирование/использование моделей объектов для распознавания объектов и сцен. В зависимости от этапа требуется обработка различного количества зрительных данных и, главное, различных операций над этими данными.

Первый этап – сбор и предобработка зрительных данных. При первоначальном включении системы, при смене условий наблюдения, потере объекта интереса в процессе прослеживания или необходимости смены/изменения приоритетов в анализе наблюдаемой сцены, требуется анализ качества вводимых данных и, при необходимости их корректировка для дальнейшей обработки. Алгоритмы соответствующих операций применительно к используемым сенсорам (построение и анализ, эквализация гистограмм, изменение контраста и яркости и т.п.) хорошо известны, но должны быть применены к большим массивам данных, собираемых со всего поля зрения. Здесь требуется аппаратное ускорение соответствующих процедур. Кроме того, должен быть обеспечен доступ к исходному изображению, в том случае если потребуется другой вид обработки.

На втором этапе – выделение первичных признаков объектов на изображениях. В зависимости от предыстории обработки (объекты интереса в сцене уже были выделены и осуществляется их прослеживание или осуществляется первоначальный поиск или поиск после потери объекта в текущем поле зрения) может потребоваться обработка больших массивов данных, вплоть до обработки полного кадра. Сами алгоритмы выделения тех или иных признаков объектов (сегментация, выделение полей характеристик, нахождение краёв, описание формы областей и т.п.) заранее известны. На этом этапе также требуется аппаратное ускорение соответствующих процедур.

Третий этап – формирование/использование моделей для распознавания объектов и сцен. На этом этапе количество входных данных не так велико, а большее значение приобретает анализ различных комбинаций имеющихся признаков и их допустимых сочетаний в соответствии с известными моделями. В алгоритмическом обеспечении применяется много эвристических алгоритмов, а в последние годы используются нейросетевые модели.

В реализации описанной последовательности этапов (схемы) следует учитывать то, что из-за неверно выбранной стратегии/гипотезы распознавания или изменения условий наблюдения или самой сцены может потребоваться выбор/формирование другой гипотезы и, как следствие, получение других признаков на тех же исходных данных. Это обстоятельство обеспечивается возможностью «отката» к исходным данным на любом этапе обработки – хранению и обеспечению доступа к текущему кадру (кадрам, если речь идёт об обработке зрительных данных с нескольких полей зрения) до принятия решения об окончании обработки.

Компоновка макета интеллектуальной вычислительной среды. В настоящее время известно много попыток использования группировок GPU для обработки зрительных данных нейроподобными алгоритмами при решении задач классификации [16]. Более продвинутыми разработками считаются так называемые тензорные процессоры – TPU. Первые данные об использовании подобных процессоров стали известны от фирмы Google. Архитектура и особенности Google TPU хранились в строжайшем секрете, но теперь стала доступна некоторая информация [4–6]. В описываемых исследованиях мы реализовывали компоновку

отдельных элементов вычислительной среды из доступных элементов. В качестве прототипа бортовой аппаратной платформы для реализации предложенной схемы рассматриваем гетерогенный вычислитель "грифон" [11, 12]. Здесь в качестве системной магистрали также используется шина PCI Express. На первом этапе исследований мы использовали шину GigEthernet, но всё программное обеспечение комплекса допускает переход на целевую шину PCI Express (рис. 1).

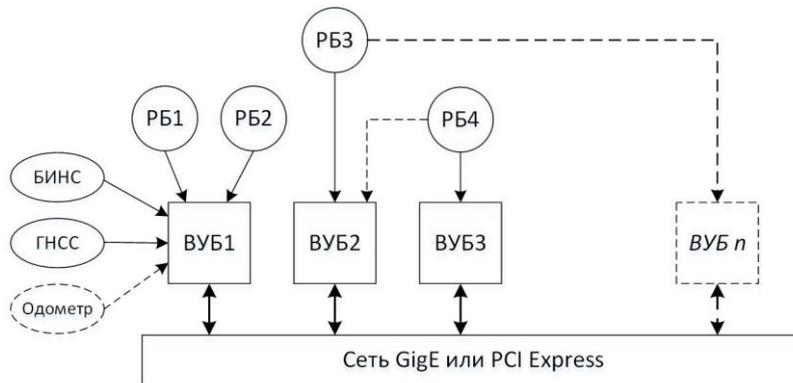


Рис. 1. Общая схема компоновки аппаратных средств СТЗ и традиционных информационных систем для информационного обеспечения мобильных РТК.
 РБ – регистрирующий блок (видеокамера) с определённым полем зрения;
 ВУБ – вычислительно-управляющий блок. ГНСС – глобальная навигационная спутниковая система

Для создания прикладного ПО мы разработали и используем каркас ПО СТЗ реального времени [14, 15]. Этот крупномасштабный программный шаблон (Application Framework), определяет структуру и основные возможности конкретного приложения. Его назначение:

- ◆ повышение степени повторного использования ПО
- ◆ использование типовых решений для сокращения временных затрат на разработку ПО
- ◆ упрощение реализации ПО СТЗ для похожих прикладных задач

На рис. 2 представлена общая структурная схема этого каркаса. На рис. 3 – структура ядра каркаса ПО СТЗ РВ.

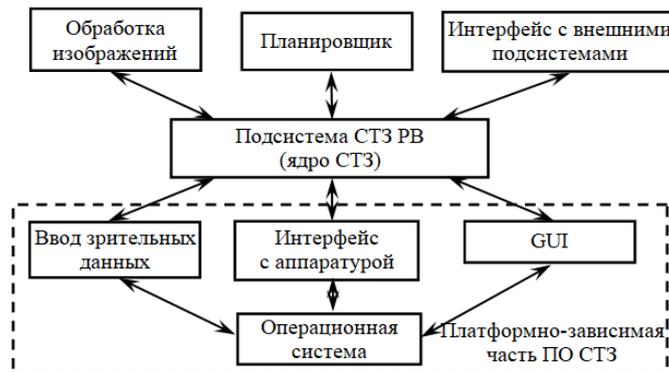


Рис. 2. Схема общей структуры каркаса ПО СТЗ РВ

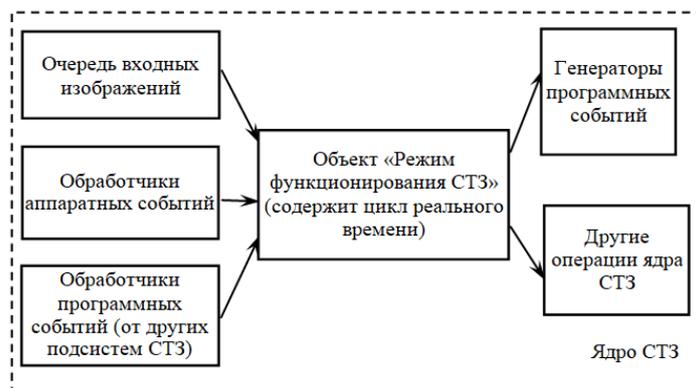


Рис. 3. Структура ядра каркаса ПО СТЗ РВ

Результаты первых экспериментов. Автономной подвижной платформы, способной перемещаться по разнообразной местности и имеющей хорошо описанный интерфейс авторам не было доступно, поэтому эксперименты с прототипом бортовой системы информационного обеспечения предлагаемой архитектуры проводились на различных не автономных транспортных средствах. Алгоритмы для детального исследования и сравнительного анализа способов реализации на нетрадиционных вычислителях отбирались из числа хорошо зарекомендовавших себя алгоритмов в традиционной фон Неймановской реализации при решении типовых задач информационного обеспечения целенаправленных перемещений РТК. На описываемом этапе исследований в перечень алгоритмов мы включили алгоритмы: построения гистограммы заданного фрагмента или всего поля зрения; вычисления плотного и разреженного оптического потока; сегментации.

Данные собранные в реальных условиях полигона служили исходным материалом для сравнительного анализа и отладки технологии реализации алгоритмического обеспечения с использованием нетрадиционных вычислительных ресурсов. На рис. 4 представлен общий вид одного из транспортных средств с установленными модулями СТЗ. На рис. 5 – примеры полей зрения.



Рис. 2. Регистрирующие блоки модулей СТЗ, установленные на крыше автомобиля «НИВА»

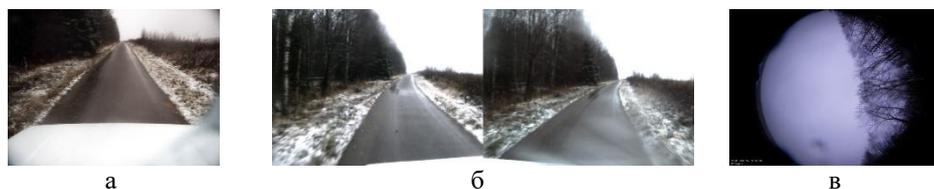


Рис. 3. Примеры полей зрения модулей СТЗ, установленных на автомобиле «Нива»: а – вперёд смотрящего модуля с моно камерой; б – вперёд смотрящего стерео модуля; в – панорамного модуля типа «рыбий глаз»

Работа с FPGA-модулем для вычисления гистограммы. Аппаратная часть этого элемента вычислительно-управляющего блока с нетрадиционным вычислителем включает в себя следующие компоненты:

- ◆ Плата с установленной FPGA Altera (на базе чипа Altera Cyclone V SE (5CSEMA4U23C6N), на которой реализованы операции приема изображений от IP-камеры и вычисление гистограммы.
- ◆ Камера высокого разрешения «Контур HD» производства ИПЗ с поддержкой передачи изображений по протоколу IP в сети Gigabit Ethernet.
- ◆ Компьютер общего назначения под управлением ОС Windows, в среде которой запущено приложение СТЗ для отображения входных изображений и результатов их обработки

Поскольку данный чип основан на технологии System-on-a-chip (SoC), программное обеспечение было разделено на три подсистемы.

Первая подсистема реализована на стороне FPGA, она включает в себя обработку управляющих команд, взаимодействие с микросхемами ЦАП/АЦП, а также сами алгоритмы приема, передачи, и навигации.

Вторая подсистема исполняется на стороне так называемой Hard Processor System (HPS), эта система фактически является драйвером операционной системы Linux и является прослойкой между пользовательским интерфейсом и FPGA.

Третья подсистема реализует непосредственно интерфейс управления устройством, выполнена она в виде веб-интерфейса и включает себя front-end и back-end.

Для взаимодействия между системами была разработана система команд, определяющих режим работы устройства, а также такие внутренние параметры как частота излучения, величины защитных интервалов, минимальный размер пакета передаваемых данных и т.п. Взаимодействие между подсистемами осуществляется через прерывания, POSIX сигналы и HPS-to-FPGA интерфейса.

В разработке использовались языки программирования C, C++, Verilog, Javascript. В процессе работы были оттестированы алгоритмы работы устройства как в режиме передачи информации, так и в навигационном режиме, для чего было произведено модульное тестирование с использованием модулей-заглушек, а также системное тестирование в лабораторных и натуральных экспериментах. Для снижения энергопотребления были использованы оптимизации кода на стороне FPGA, поскольку только в этой подсистеме существует возможность значительно повлиять на величину энергопотребления.

Особенностью данной модельной гетерогенной вычислительной системы является использование камеры «Контур-HD» с поддержкой одного физического подключения GigE и двух логических каналов, по которым осуществляется передача изображений различного разрешения. Для вычисления гистограммы на вход FPGA-вычислителя поступают изображения разрешением 640x480 пикселей (с кадровой частотой 25 Гц), а на головной компьютер СТЗ – изображения высоко-

го разрешения 2592x1944 (с кадровой частотой 12 Гц). В результате между FPGA-вычислителем и компьютером СТЗ отсутствует обмен данными изображений и производится только передача результатов обработки (расчет гистограммных признаков).

Работа с FPGA-модулем для вычисления оптического потока. Модуль для вычисления оптического потока реализован в виде платы с 8-ю вычислительными блоками FPGA Xilinx. Доступ к этому модулю со стороны компьютера СТЗ осуществляется с использованием промежуточного хост-компьютера под управлением ОС Unix. В качестве интерфейса для обмена данными используется интерфейс сокетов в сети с протоколами TCP/IP. Входные изображения поступают в приложение СТЗ, работающее под управлением ОС Windows. По протоколу TCP/IP через выделенный порт эти изображения через хост-компьютер передаются на вход FPGA-вычислителя. Результатами обработки являются значения компонент векторов оптического потока, которые вычисляются для каждой пары последовательных изображений. Результаты в виде массива двухбайтных целых чисел также передаются посредством сокетов на компьютер с приложением СТЗ.

В данной конфигурации камера не подключена непосредственно к FPGA-вычислителю, что приводит к необходимости дополнительного трафика в используемой сети. В результате при применении метода вычисления оптического потока Лукаса-Кэнада обеспечивается частота обработки 10 Гц при размере входных изображений 1600x1200 пикселей.

Также были проведены эксперименты по вычислению плотного оптического потока методом Фарнбека. Достигнута производительность порядка 10 Гц при размере входных изображений 320x240 пикселей.

Анализ и подготовка алгоритма для сегментации изображений. Для исследования способов ускорения этого активно используемого алгоритма был выбран алгоритм сегментации изображений Фельценсвальба (и Хуттенлохера) [17]. Имеются весьма успешные реализации этого алгоритма для CPU (последовательно работающего процессора с памятью произвольного доступа) [18, 19].

Этот алгоритм, в свою очередь использует алгоритм Крускала, который строит остовный лес минимальной стоимости для неориентированного взвешенного графа. Алгоритм Крускала, виртуозно использует все возможности и особенности классического CPU. Именно из-за этого он плохо переносится на вычислительные устройства других типов (вроде GPU или схем, реализуемый в FPGA). Известен алгоритм Борувки, который является более “параллельным”, хотя был опубликован в 1926 году, когда о вычислительной технике речи ещё не шло и никак не учитывались свойства CPU (= фон-неймановской машины). В результате, у Борувки получился алгоритм, в котором гораздо больше “естественного” параллелизма, чем в алгоритме Крускала [20]. Позднее этот алгоритм переоткрывался (и публиковался) несколько раз. Сейчас существуют “параллельные” реализации алгоритма Борувки. Мы тщательно изучили вариант реализации алгоритма Борувки предложенный Васконселос (с соавторами) [21].

В отличие от других вариантов, для алгоритма Васконселос имеются исходные тексты, из которых можно узнать некоторые тонкости и детали реализации, которые не очевидны из текста статьи. Доступны два варианта реализации: для CPU и для GPU. Можно эти два варианта сравнивать.

Вариант для GPU реализован на основе платформы CUDA, которая даёт возможность реализовывать параллельные вычисления для GPU фирмы NVidia.

Отсюда возникла идея модифицировать алгоритм Фельценсвальба, вырезав из него алгоритм Крускала и заменив его на алгоритм Борувки в варианте Васконселос.

При этом выяснилось, что вариант Васконселос невозможно просто взять – и чисто механически вставить в алгоритм Фельценсвальба. Причины этого – следующие.

Результат работы алгоритма Васконселос – дерево минимальной стоимости (для связного графа). А результат сегментации изображения – это несколько сегментов. Поэтому, алгоритм анализа графа должен выдавать не дерево, а лес (каждое дерево в котором соответствует некоторому сегменту изображения).

У Васконселос работа алгоритма заканчивается в тот момент, когда все компоненты склеиваются в одну компоненту. Но если результат работы – несколько компонент (лес, а не одно дерево), то критерий завершения работы должен быть другой. Результатом работы алгоритма Васконселоса является список рёбер составляющих остовное дерево минимальной стоимости. Но, в случае сегментации изображений, эта информация – бесполезна! А вместо этого требуется получить отображение вершин исходного графа (соответствующих пикселям изображения) на номера сегментов.

У Фельценсвальба исходный граф является связным, но результат сегментации графа – несколько компонент графа (соответствующих сегментам изображения). Это достигается за счёт того, что связный граф превращается в несвязный путём удаления из графа некоторых “тяжёлых” рёбер. Для этого в алгоритм Крускала сделана вставка, которая удаляет рёбра, так сказать, “на лету”, прямо в процессе работы алгоритма Крускала. Логически проще было бы удалить “тяжёлые” рёбра заранее, до запуска алгоритма Крускала. Но это сделать нельзя, поскольку требуется учитывать не только вес самого ребра, но ещё и размеры компонент, соединяемых этим ребром. Чем больше компонента – тем менее “охотно” она склеивается с другими компонентами. Но в алгоритме Васконселос удаление “тяжёлых” рёбер не предусмотрено. Поэтому, необходим метод удаления “тяжёлых” рёбер, совместимый с алгоритмом Васконселос (и поддающийся распараллеливанию). В алгоритме Фельценсвальба, помимо удаления “тяжёлых” рёбер реализовано и противоположное действие – принудительное склеивание маленьких компонент друг с другом, а так же – принудительное приклеивание маленьких компонент к большим. Поэтому, необходимы соответствующие дополнения к алгоритму Васконселос (поддающиеся распараллеливанию).

В настоящий момент, вышеупомянутые переделки алгоритма Васконселос разработаны и реализованы [22]. Собственно говоря, основным “результатом” является не реализация как таковая, а то, что показана реализуемость вышеупомянутых доработок. И что, в результате соединения алгоритма Фельценсвальба и доработанного алгоритма Васконселос получается алгоритм сегментации, который работоспособен и производит результаты похожие на результаты исходного алгоритма Фельценсвальба. Возникает естественный вопрос «Почему не удастся добиться полной тождественности результатов исходного и переработанного алгоритма Фельценсвальба»? Основная проблема состоит в том, что полной тождественности результатов (при разном способе вычисления) можно добиться только в том случае, если желаемый результат имеет однозначное математическое определение.

Например, если веса всех рёбер в ориентированном взвешенном графе различны – то существует только один остовный лес минимальной стоимости. Поэтому, если есть два алгоритма нахождения этого леса, и эти алгоритмы корректны, то они выдадут один и тот же результат, даже если вычисляют его абсолютно разным способом. Если же веса разных рёбер могут совпадать, то всё равно можно добиться единственности результата с помощью искусственного приёма. А именно – пронумеровав рёбра. И в случаях, когда два ребра имеют одинаковый вес, будем считать более “лёгким” то ребро, номер у которого меньше.

Но в случае сегментации изображений нет критерия, который однозначно бы определял, что следует считать “правильным” результатом сегментации. Неформально задача ставится так, что результат сегментации должен “выглядеть разумно” с точки зрения человека. Т.е., этот результат должен соответствовать психологии человеческого восприятия. А восприятие у разных людей – разное. Поэтому, Фельценсвальб взял за основу алгоритм Крускала (результат работы которого определён однозначно и математически) и приделал к этому алгоритму некоторые “эвристические” добавки. Эти добавки не имеют строгого обоснования, и их оправданием является исключительно то, что они – “работают”, т.е. приводят к результатам сегментации, которые выглядят “разумно” с человеческой точки зрения. При этом, результат работы алгоритма Фельценсвальба не определён однозначно! У алгоритма есть несколько параметров, “подкручивая” которые можно влиять на результаты сегментации. Параметры – такие.

float sigma.

Стандартное отклонение по Гауссу. Влияет на степень размытия изображения при предварительной обработке.

float scale.

“Ширина поля зрения”. Увеличение этого параметра приводит к увеличению размеров сегментов.

int min_size.

Минимальный размер сегмента. Сегменты, размер которых меньше, чем min_size, принудительно склеиваются друг с другом или приклеиваются к сегментам, размер которых – больше, чем min_size. Таким образом, уменьшая scale, мы можем волонтаристски сдерживать рост размеров сегментов, а увеличивая min_size - подавлять маленькие сегменты.

Понятно, что при таких условиях можно не соблюдать строгую эквивалентность между исходным алгоритмом и его “распараллеленной” версией. Оправданием разумности такого нарушения эквивалентности должна служить “разумность” получаемых результатов. Например, в исходном алгоритме Фельценсвальба, каждая вершина приписана к компоненте, размер которой известен. А при склеивании компонент учитывается размер компонент. И при этом мгновенно вычисляется размер компоненты, которая получилась в результате склеивания двух компонент. Но в случае алгоритма Васконселос было бы проблематично реализовать мгновенный пересчёт размеров компонент, поскольку в каждый момент времени рассматривается много рёбер и может попарно объединяться много компонент. И это делается с помощью нескольких итераций. После каждой итерации, список компонент перестраивается. При этом, размеры компонент перевычисляются между итерациями, но не в процессе каждой итерации. Это является некоторой аппроксимацией к тому, что делается в исходном алгоритме Васконселос. Поэтому, полного совпадения результатов не получается. Но результаты сегментации получаются похожими. Таким образом, реализован работоспособный “гибрид” алгоритма Фельценсвальба и алгоритма Васконселос (для CPU). Он конструировался с расчётом на последующее распараллеливание на GPU. Вариант для GPU на платформе CU Vasconcellos DA был проверен. Следующим шагом предполагается переделка его на платформу OpenCL для реализации на FPGA. Каковы отличия CUDA и OpenCL?

CUDA – это “фирменная” платформа. И она позволяет распараллеливать алгоритмы только для GPU фирмы NVidia.

OpenCL – это открытый стандарт, который позволяет распараллеливать алгоритмы для GPU нескольких фирм (в частности – фирм NVidia и Intel).

Кроме того, OpenCL позволяет распараллеливать алгоритмы для изделий от фирмы Xilinx.

Заключение. В работе описан первый этап исследований в компоновке и программно-алгоритмическом обеспечении перспективных бортовых гетерогенных вычислительных средств мобильных робототехнических комплексов, оснащённых системами технического зрения. К настоящему моменту промакетированы отдельные элементы предлагаемой программно-аппаратной архитектуры и осуществлены эксперименты по реализации алгоритмического обеспечения. Предложено объединяющее ПО, но использованы разнотипные аппаратные реализации. Получены первые обнадеживающие результаты. С поддержкой заинтересованных организаций, предоставивших аппаратную базу, в ближайшей перспективе будет осуществлён перенос макетных решений на единую платформу ГРИФОН. Будет продолжена работа по автоматизации диспетчерских функций при распределении задач обработки между специализированными вычислителями. Естественно, большое поле приложения сил открывается в продолжение оптимизации и настройки алгоритмов обработки зрительных данных под нетрадиционного исполнителя, разработке методики и инструментальных средств создания информационных систем для конкретного типа мобильных РТК.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Марьясин А.В., Маниленко И.Н., Михайлов М.А., Перов И.А., Самарин О.Ф., Савостьянов В.Ю., Ильин Е.М.* Цифровая вычислительная машина для современных малогабаритных бортовых радиолокационных станций // Вестник СибГУТИ. – 2016. – № 3. – С. 15-31.
2. *Дашевский В.П., Бизин М.М.* Обзор возможностей бортовых вычислителей // Доклады ТУСУРа. – Сентябрь 2015. – № 3 (37). – С. 924-929.
3. *Лукин Н.А.* Бортовые функционально-ориентированные процессоры на основе однородных вычислительных сред для мобильных систем реального времени // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 12.
4. Чип Google Tensor Processor упростит процесс машинного обучения и вернёт силу закону Мура. 3DNews. – URL: <https://3dnews.ru/933239>.
5. Блок Google TPU второго поколения в задачах машинного обучения демонстрирует производительность выше, чем у GPU Nvidia GV100. iXBT.com. – URL: <https://www.ixbt.com/news/2017/05/19/google-tpu-gpu-nvidia-gv100.html>.
6. Подробности о тензорном сопроцессоре Google TPU. Servernews. – URL: <https://servernews.ru/957543>.
7. *Molaletsa Namoshe, Oduetse Matsebe and Nkgatho Tlale.* Sensor Fusion and Its Applications // Feature extraction: techniques for landmark based navigation system. – P. 347-374.
8. *Nützi G. et al.* Fusion of IMU and Vision for Absolute Scale Estimation in Monocular SLAM // Journal of Intelligent & Robotic System. – 2011. – Vol. 61. – P. 287-299.
9. *Engel J., Schöps T., Cremers D.* LSD-SLAM: Large-Scale Direct Monocular SLAM // Proc. of the ECCV 2014. – 2014. – P. 834-849.
10. *Labbé M., Michaud F.* RTAB-Map as an open-source lidar and visual simultaneous localization and mapping library // Journal of Field Robotics. – 2018. – P. 1-31.
11. *Gomez-Ojeda R. et al.* PL-SLAM: A Stereo SLAM System Through the Combination of Points and Line Segments // IEEE Transactions on Robotics. – 2019. – Vol. 35, No. 3. – P. 734-746.
12. *Галаган П., Кузьминский Л., Сорокин А.* Решение задач машинного зрения на базе гетерогенной платформы ГРИФОН // Control Engineering Россия. – 2018. – № 1 (73). – С. 38-43.
13. *Галаган П.* Платформа ГРИФОН для решения задач встраиваемых систем специального назначения // Современные технологии автоматизации. – 2015. – № 4.
14. *Boguslavsky A.A., Sokolov S.M.* Component Approach to the Applied Visual System Software Development // 7th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics (SCI 2003), July 27-30, Orlando, Florida, USA, 2003.
15. *Sokolov S.M., Boguslavsky A.A.* Intellectual Images Processing for a Realtime Recognition Problem // Proc. The 2nd Intern. Multi-Conf. on Complexity, Informatics and Cybernetics (IMCIC2011), Orlando, Florida, USA, March 27th-30th, 2011, Orlando, Florida, USA. – Vol. II. – P. 406-411.

16. *Barlas G.* Multicore and GPU Programming: An Integrated Approach. – Morgan Kaufmann, 2014. – 698 p.
17. *Vasconcellos J.F. de A., Cáceres E.N., Mongelli H. and Song S.W.* A Parallel Algorithm for Minimum Spanning Tree on GPU // 2017 International Symposium on Computer Architecture and High Performance Computing Workshops (SBAC-PADW), Campinas, 2017. – P. 67-72.
18. *Vasconcellos J.F. de A., Cáceres E.N., Mongelli H., Song S.W., Dehne F., & Szwarcfiter J.L.* New BSP/CGM algorithms for spanning trees // The International Journal of High Performance Computing Applications. – 2019. – Vol. 33 (3). – P. 444-461.
19. *Pedro F. Felzenszwalb and Daniel P. Huttenlocher.* Efficient Graph-Based Image Segmentation // Int. J. Comput. Vision 59, 2 (September 2004). – P. 167-181.
20. Реализация алгоритма Коускена. – URL: <http://cs.brown.edu/people/pfelzens/segment/>.
21. *Borůvka Otakar.* O jistém problému minimálním [About a certain minimal problem]. Práce Moravské přírodovědecké společnosti. V Brně III (in Czech and German). – 1926. – No. 3. – P. 37-58.
22. Проекты Gitlab: Реализация алгоритма Vasconcellos – URL: https://gitlab.com/sergei-romanenko/vasconcellos-new-mst/-/tree/master/img_seg_seq.

REFERENCES

1. *Mar'yasin A.V., Manilenko I.N., Mikhaylov M.A., Perov I.A., Samarin O.F., Savost'yanov V.Yu., Il'in E.M.* Tsifrovaya vychislitel'naya mashina dlya sovremennykh malogabaritnykh bortovykh radiolokatsionnykh stantsiy [Digital computer for modern small-size onboard radar stations], *Vestnik SibGUTI* [Vestnik SibGUTI], 2016, № 3, pp. 15-31.
2. *Dashevskiy V.P., Bizin M.M.* Obzor vozmozhnostey bortovykh vychisliteley [An overview of the capabilities of onboard computers], *Doklady TUSURa* [Proceedings of TUSUR], Sentyabr' 2015, No. 3 (37), pp. 924-929.
3. *Lukin N.A.* Bortovye funktsional'no-orientirovannye protsessory na osnove odnorodnykh vychislitel'nykh sred dlya mobil'nykh sistem real'nogo vremeni [Onboard functional-oriented processors based on homogeneous computing environments for mobile real-time systems], *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental study], 2015, No. 12.
4. Chip Google Tensor Processor uprostit protsess mashinnogo obucheniya i vernet silu zakonu Mura. 3DNews [The Google Tensor Processor chip will simplify the machine learning process and restore the power of Moore's law. 3DNews]. Available at: <https://3dnews.ru/933239>.
5. Blok Google TPU vtorogo pokoleniya v zadachakh mashinnogo obucheniya demonstriruet proizvoditel'nost' vyshe, chem u GPU Nvidia GV100. iXBT.com [The second-generation Google TPU block in machine learning tasks demonstrates higher performance than the Nvidia GV100 GPU. iXBT.com]. Available at: <https://www.ixbt.com/news/2017/05/19/google-tpu-gpu-nvidia-gv100.html>.
6. Podrobnosti o tenzornom soprotessore Google TPU. Servernews [Details about the Google TPU tensor coprocessor. Servernews]. Available at: <https://servernews.ru/957543>.
7. Molaletsa Namoshe, Oduetse Matsebe and Nkgatho Tlale. Sensor Fusion and Its Applications, *Feature extraction: techniques for landmark based navigation system*, pp. 347-374.
8. *Nützi G. et al.* Fusion of IMU and Vision for Absolute Scale Estimation in Monocular SLAM, *Journal of Intelligent & Robotic System*. 2011. Vol. 61. pp. 287-299.
9. *Engel J., Schöps T., Cremers D.* LSD-SLAM: Large-Scale Direct Monocular SLAM, *Proc. of the ECCV 2014*, 2014, pp. 834-849.
10. *Labbé M., Michaud F.* RTAB-Map as an open-source lidar and visual simultaneous localization and mapping library, *Journal of Field Robotics*, 2018, pp. 1-31.
11. *Gomez-Ojeda R. et al.* PL-SLAM: A Stereo SLAM System Through the Combination of Points and Line Segments, *IEEE Transactions on Robotics*, 2019, Vol. 35, No. 3, pp. 734-746.
12. *Galagan P., Kuz'minskiy L., Sorokin A.* Reshenie zadach mashinnogo zreniya na baze geterogennoy platformy GRIFON [Solving machine vision problems based on the heterogeneous GRYPHON platform], *Control Engineering Rossiya* [Control Engineering Russia], 2018, No. 1 (73), pp. 38-43.
13. *Galagan P.* Platforma GRIFON dlya resheniya zadach vstraivaemykh sistem spetsial'nogo naznacheniya [Gryphon platform for solving problems of embedded special purpose systems], *Sovremennyye tekhnologii avtomatizatsii* [Modern automation technologies], 2015, No. 4.

14. Boguslavsky A.A., Sokolov S.M. Component Approach to the Applied Visual System Software Development, *7th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics (SCI 2003)*, July 27-30, Orlando, Florida, USA, 2003.
15. Sokolov S.M., Boguslavsky A.A. Intellectual Images Processing for a Realtime Recognition Problem, *Proc. The 2nd Intern. Multi-Conf. on Complexity, Informatics and Cybernetics (IMCIC2011)*, Orlando, Florida, USA, March 27th-30th, 2011, Orlando, Florida, USA, Vol. II, pp. 406-411.
16. Barlas G. *Multicore and GPU Programming: An Integrated Approach*. Morgan Kaufmann, 2014, 698 p.
17. Vasconcellos J.F. de A., Cáceres E.N., Mongelli H. and Song S.W. A Parallel Algorithm for Minimum Spanning Tree on GPU, *2017 International Symposium on Computer Architecture and High Performance Computing Workshops (SBAC-PADW)*, Campinas, 2017, pp. 67-72.
18. Vasconcellos J.F. de A., Cáceres E.N., Mongelli H., Song S.W., Dehne F., & Szwarcfiter J.L. New BSP/CGM algorithms for spanning trees, *The International Journal of High Performance Computing Applications*, 2019, Vol. 33 (3), pp. 444-461.
19. Pedro F. Felzenszwalb and Daniel P. Huttenlocher. Efficient Graph-Based Image Segmentation, *Int. J. Comput. Vision* 59, 2 (September 2004), pp. 167-181.
20. Realizatsiya algoritma Kouskena [The implementation of the algorithm Koscina]. Available at: <http://cs.brown.edu/people/pfelzens/segment/>.
21. Borivka Otakar. O jistém problému minimálním [About a certain minimal problem]. *Práce Moravské přírodovědecké společnosti. V Brně III* (in Czech and German), 1926, No. 3, pp. 37-58.
22. Proekty Gitlab: Realizatsiya algoritma Vasconcellos [GitLab projects: implementation of the Vasconcellos algorithm.]. Available at: https://gitlab.com/sergei-romanenko/vasconcellos-new-mst/-/tree/master/img_seg_seq.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. М.Ю. Медведев.

Соколов Сергей Михайлович – Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН); e-mail: sokolism@keldysh.ru 125047, г. Москва, Миусская пл., 4; тел.: 89161220113; д.ф.-м.н.; профессор; г.н.с.

Богуславский Андрей Александрович – e-mail: anbg74@mail.ru; тел.: 89167379448; д.ф.-м.н.; в.н.с.

Романенко Сергей Анатольевич – e-mail: romansa@keldysh.ru; тел.: 84992507873; к.ф.-м.н.; в.н.с.

Sokolov Sergey Mikhailovich – Keldysh Institute of Applied Mathematics Russian Academy of Sciences; e-mail: sokolism@keldysh.ru; 4, Miusskaya sq., Moscow, 125047, Russia; phone: +74992207994; dr. of math. and physics. sc.; professor; principal researcher.

Boguslavsky Andrey Alexandrovich – e-mail: anbg74@mail.ru; phone: +79167379448; dr. of math. and physics. sc.; leading researcher.

Romanenko Sergei Anatolyevich – e-mail: romansa@keldysh.ru; phone: +74992507873; cand. of math. and physics. sc.; leading researcher.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ

1. Объем статьи должен быть не менее 12 и не более 18 страниц. Формат (А 4). Редактор **Word 7 for Windows**, шрифт Times New Roman, размер 14, интервал 1,5. Авторы представляют в редакцию 1 экз. статьи и идентичный электронный вариант.

2. Названию статьи предшествует индекс УДК, соответствующий заявленной теме.

3. Текст статьи начинается с названия статьи (на русском и английском языках), фамилии, имени и отчества автора (полностью) и снабжается аннотацией на русском и английском языках объемом **не менее 250-300 слов**. В тексте аннотации указывается цель, задачи исследования и краткие выводы. В аннотации **не следует** давать ссылку на номер публикации в списке литературы к статье. После аннотаций приводятся ключевые слова (словосочетания), несущие в тексте основную смысловую нагрузку (на русском и английском языках).

4. В тексте статьи следует использовать минимальное количество таблиц и иллюстраций. Рисунок должен иметь объяснения значений всех компонентов, порядковый номер, название, расположенное под рисунком. В тексте на рисунок дается ссылка. Таблица должна иметь порядковый номер, заголовок, расположенный над ней. Данные таблиц и рисунков не должны дублировать текст. Формулы должны быть набраны **в редакторе формул Word 7 for Windows**.

5. Цитаты тщательно сверяются с первоисточником и визируются автором на обратной стороне последней страницы: "Цитаты и фактический материал сверены". Подпись, дата.

6. Наличие пристатейного библиографического списка на русском и английском языках обязательно. **Ссылок должно быть не менее 20-ти**, из них на зарубежные источники – не менее 35 %. В тексте ссылки должны быть в квадратных скобках.

Примеры оформления литературы: а) для книг: фамилия, инициалы автора(ов), полное название книги, место, год издания, страницы; б) для статей: фамилия и инициалы автора(ов), полное название сборника, книги, газеты, журнала, где опубликована статья, место и год издания (сборника, книги), номер (для журнала), год и дата (для газеты), выпуск, часть (для сборника), страницы, на которых опубликована статья. Иностранная литература оформляется по тем же правилам.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

7. Рукопись должна быть тщательно вычитана. Редакционная коллегия оставляет за собой право при необходимости сокращать статьи, редактировать и отсылать авторам на доработку.

8. Статьи сопровождаются сведениями об авторе(ах) (фамилия, имя, отчество, ученое звание, должность, место работы, адрес, электронный адрес и номер телефона) на русском и английском языках.

9. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

Адрес журнала в Интернете: <http://izv-tn.tti.sfedu.ru/>.