



№1-2023

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

Федеральная служба по надзору в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций

Научно-технический и прикладной журнал

Издается с 1995 года, до середины 2007 года под названием «Известия ТРТУ»

Подписной индекс 41970

№ 1 (231). 2023 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

Курейчик В.В. (гл. редактор); Кравченко Ю.А. (зам. гл. редактора); Курейчик В.М. (зам. гл. редактора); Бородинский И.М. (ученый секретарь); Абрамов С.М.; Агеев О.А.; Бабенко Л.К.; Боженюк А.В.; Веселов Г.Е.; Гайдук А.Р.; Горбанёва О.И.; Каляев И.А.; Коноплев Б.Г.; Касьянов А.О.; Левин И.И.; Куповых Г.В.; Лысенко И.Е.; Малюков С.П.; Медведев М.Ю.; Мельник Э.В.; Никитов С.А.; Обуховец В.А.; Панич А.Е.; Петров В.В.; Пшихопов В.Х.; Редько В.Г.; Румянцев К.Е.; Семенихина Д.В.; Сергеев Н.Е.; Стемпковский А.Л.; Сухинов А.И.; Тополов В.Ю.; Турулин И.И.; Угольницкий Г.А.; Усов А.Б.; Федосов В.П.; Целых А.Н.; Юханов Ю.В.

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.

Дата выхода в свет 31.03. 2023 г. Формат 70×108 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная.

Офсетная печать. Усл. печ. л. – 26,2. Уч.-изд. л. – 20,9.

Заказ № . Тираж 250 экз.

Адрес издателя: 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, тел. 8(863)243-41-66.

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. 8(863)243-41-66.

Адрес редакции: 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, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ I. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

В.К. Абросимов, А.Н. Седов ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЫПОЛНЕНИЯ КОЛЛЕКТИВНОЙ МИССИИ МНОГОАГЕНТНОЙ ГЕТЕРОГЕННОЙ ГРУППОЙ	6
П.П. Чернусь, П.П. Чернусь, А.А. Яковлев, Р.В. Сахабудинов, А.С. Голосий СИНТЕЗ ЦИФРОВОГО РЕГУЛЯТОРА ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ПОДВОДНОГО ОБЪЕКТА	19
И.А. Шипов, Е.В. Ветошкин ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПЛЕКСИРОВАННОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НАЗЕМНОГО ОБЪЕКТА	31
В.В. Ланцов, К.В. Ланцов, А.В. Корякин, Л.А. Мартынова МЕТОД И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА ОТ МАЛОРАЗМЕРНОГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА	41
Г.П. Виноградов ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НА ОСНОВЕ ЗНАНИЙ В СОЕДИНЕНИЯХ ВООРУЖЕННЫХ СИЛ	53
С.М. Соколов СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТЕПЕНИ АВТОНОМНОСТИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ	65
А.Ю. Баранник, Е.В. Павлов, А.В. Лагутина, В.И. Ершов ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ К РОБОТОТЕХНИЧЕСКОМУ КОМПЛЕКСУ МНОГОРЕЖИМНОГО ПОЖАРОТУШЕНИЯ	77
Е.Ю. Пушкарева, И.В. Пискулин МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ РТК ВН В РЕЖИМЕ АВТОНОМНОГО НАВЕДЕНИЯ	88
К.Ч. Бжихатлов, И.А. Пшенокова, А.У. Заммиев, Л.Б. Кокова АВТОНОМНЫЙ РОБОТ ДЛЯ МОНИТОРИНГА НАЗЕМНЫХ АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ РАСКОПОК	100

РАЗДЕЛ II. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.Р. Гайдук, В.Х. Пшихопов, М.Ю. Медведев, В.Г. Гисцов, А.Э.А. Кабала СИНТЕЗ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НЕАФФИННЫМИ ОБЪЕКТАМИ	110
А.А. Зеленский КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ КОНКУРЕНТОСПОСОБНЫХ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СТАНКОВ И ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ В УСЛОВИЯХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ РОССИИ	123
Л.А. Рыбак, А.А. Волошкин, К.В. Чуев, Д.И. Малышев, В.М. Скитова МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТРЕНАЖЕРНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ ВОДИТЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ И СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕХНИКИ С ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМОЙ ВИРТУАЛЬНЫХ 3D МОДЕЛЕЙ РЕАЛЬНОЙ МЕСТНОСТИ	134

С.Ю. Курочкин, А.А. Тачков, Е.И. Борисенков ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОВЫМ ДВИЖЕНИЕМ РОБОТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАТИСТИЧЕСКОГО ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	146
С.А. Дубовик, А.А. Кабанов АСИМПТОТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЗАДАЧАХ СУПЕРВИЗОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫХ ПОДВОДНЫХ РОБОТОВ.....	155
И.В. Бычков, А.В. Давыдов, М.Ю. Кензин, Н.В. Нагул, А.А. Толстихин ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ СТРАТЕГИЙ И УПРАВЛЕНИЕ ГРУППОЙ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ В УСЛОВИЯХ НЕПОЛНОТЫ ИНФОРМАЦИИ	170
И.В. Образцов, В.П. Шкодырев ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖИВУЧЕСТИ (ОБЗОР)	184

РАЗДЕЛ III. СИСТЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ, ПРИВОДНАЯ И ДАТЧИКОВАЯ АППАРАТУРА

А.В. Васильев, И.В. Шардыко, В.М. Копылов МОДУЛЬНЫЙ ШАРНИР С ПЕРЕМЕННОЙ ЖЕСТКОСТЬЮ ДЛЯ МАНИПУЛЯТОРОВ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ	198
Р.А. Жигалов, С.А. Матюнин, А.А. Иголкин БЕСКОНТАКТНЫЙ ФЕРРОЗОНДОВЫЙ ДАТЧИК ПОЛОЖЕНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ КЛАПАНА	215

РАЗДЕЛ IV. СВЯЗЬ, НАВИГАЦИЯ И НАВЕДЕНИЕ

Д.А. Юхимец, А.С. Губанков НАВИГАЦИОННАЯ СИСТЕМА АВТОНОМНОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ, ПЕРЕДАВАЕМЫХ ПО АКУСТИЧЕСКОМУ КАНАЛУ ОТ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ.....	227
В.А. Головской ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПОДСИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ КОГНИТИВНОЙ РАДИОСИСТЕМЫ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА	241
П.А. Шаповалов, Ю.В. Михайлов, А.В. Фролов, Д.О. Савватеев МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ НЕСУЩИХ СИСТЕМ БЕСПЛАТФОРМЕННЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ	252
А.М. Грузликов, В.Г. Караулов, Д.А. Мухин, Н.А. Шалаев РЕЗУЛЬТАТЫ АПРОБАЦИИ АЛГОРИТМА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИИ ПОДВОДНОГО АППАРАТА ПО ДАННЫМ ОТ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ МАЯКОВ	265

РАЗДЕЛ V. ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗРЕНИЕ

Н.А. Бочаров ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДХОДОВ К УНИФИКАЦИИ БОРТОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ	275
Н.В. Колесов, Е.В. Лукоянов, В.С. Тюльников, Р.Л. Крючков МАСШТАБИРУЕМАЯ ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ В БОРТОВОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ АНПА	288

CONTENT

SECTION I. PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF ROBOTIC COMPLEXES

V.K. Abrosimov, A.N. Sedov EFFICIENCY OF THE COLLECTIVE MISSION BY A MULTIGENT HETEROGENEOUS GROUP	6
P.P. Chernus, P.P. Chernus, A.A. Yakovlev, R.V. Sakhabudinov, A.S. Golosiy SYNTHESIS OF A DIGITAL REGULATOR OF A HYDRAULIC SYSTEM FOR STABILIZING AN UNDERWATER OBJECT	20
I.A. Shipov, E.V. Vetoshkin HARDWARE-IN-THE-LOOP SIMULATION OF AN INTERCONNECTED INERTIAL NAVIGATION SYSTEM OF A GROUND OBJECT	32
V.V. Lantsov, K.V. Lantsov, A.V. Koryakin, L.A. Martynova THE METHOD AND MATHEMATICAL MODEL FOR EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF THE SYSTEM FOR PROTECTING A MOVING OBJECT FROM A SMALL-SIZED ROBOTIC COMPLEX.....	41
G.P. Vinogradov KNOWLEDGE-BASED INFORMATION TECHNOLOGIES IN THE ARMED FORCES	54
S.M. Sokolov COMPARATIVE ANALYSIS OF THE DEGREE OF ROBOTICS COMPLEX AUTONOMY	66
A.Yu. Barannik, E.V. Pavlov, A.V. Lagutina, V.I. Ershov SUBSTANTIATION OF TECHNICAL REQUIREMENTS FOR ROBOTIC COMPLEX OF MULTI-MODE FIRE EXTINGUISHING.....	77
E.Y. Pushkareva, I.V. Piskulin METHODOLOGY FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF THE TRACKING SYSTEM OF THE RTK VN MOTION CONTROL IN THE AUTONOMOUS GUIDANCE MODE	89
K.Ch. Bzhikhatlov, I.A. Pshenokova, A.U. Zammoev AUTONOMOUS ROBOT FOR MONITORING GROUND ARCHAEOLOGICAL SITES.....	100

SECTION II. CONTROL AND SIMULATION SYSTEMS

A.R. Gaiduk, V.Kh. Pshikhopov, M.Yu. Medvedev, V.G. Gistsov, A.E.A. Kalaban DESIGN OF HYBRID CONTROL SYSTEM FOR NONAFFINE OBJECTS.....	111
A.A. Zelensky THE CONCEPT OF BUILDING COMPETITIVE HIGH-SPEED CONTROL SYSTEMS FOR MACHINE TOOLS AND INDUSTRIAL ROBOTS UNDER THE TECHNOLOGICAL LIMITATIONS OF THE RUSSIA ELECTRONIC COMPONENT BASE	124
L.A. Rybak, A.A. Voloshkin, K.V. Chuev, D.I. Malyshev, V.M. Skitova METHODOLOGICAL FOUNDATIONS OF DESIGNING A SIMULATOR COMPLEX FOR TRAINING DRIVERS OF VEHICLES AND SPECIAL EQUIPMENT WITH AN INTEGRATED SYSTEM OF VIRTUAL 3D MODELS OF REAL TERRAIN	135
S.Yu. Kurochkin, A.A. Tachkov, E.I. Borisenkov PARAMETRIC SYNTHESIS OF A MULTI-ROBOT FORMATION CONTROLLER USING THE STATISTICAL SIMULATION MODELLING	147

S.A. Dubovik, A.A. Kabanov ASYMPTOTIC METHODS IN PROBLEMS OF SUPERVISORY CONTROL OF AUTONOMOUS UNDERWATER ROBOTS	155
I.V. Bychkov, A.V. Davydov, M.Yu. Kenzin, N.V. Nagul, A.A. Tolstikhin INTELLIGENT STRATEGY PLANNING AND CONTROL OF A GROUP OF MOBILE ROBOTS UNDER CONDITIONS OF INCOMPLETE INFORMATION.....	171
I.V. Obraztsov, V.P. Shkodyrev PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF AN INTELLIGENT SURVIVABILITY SYSTEM (REVIEW).....	185
SECTION III. ENERGY SYSTEMS, DRIVE AND SENSOR EQUIPMENT	
A.V. Vasiliev, I.V. Shardyko, V.M. Kopylov VARIABLE RIGIDITY MODULAR JOINT FOR MANIPULATORS OF ROBOTIC SYSTEM.....	199
R.A. Zhigalov, S.A. Matyunin, A.A. Igolkin NON-CONTACT FLUXGATE POSITION SENSOR FOR MONITORING THE STATE OF THE VALVE	215
SECTION IV. COMMUNICATION, NAVIGATION AND GUIDANCE	
D.A. Yukhimets, A.S. Gubankov NAVIGATION SYSTEM OF AN AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE BASED ON DATA TRANSMITTED VIA AN ACOUSTIC CHANNEL FROM A HYDROACOUSTIC STATION.....	227
V.A. Golovskoy THE FUNCTIONAL MODEL OF THE RESOURCE MANAGEMENT SUBSYSTEM OF THE COGNITIVE RADIO SYSTEM OF THE ROBOTIC COMPLEX	241
P.A. Shapovalov, Yu.V. Mikhaylov, A.V. Frolov, D.O. Savvateev METHODOLOGICAL BASES AND PRACTICAL ASPECTS OF OPTIMIZATION TASKS OF THE BEARING STRUCTURES OF THE STRAPDOWN INERTIAL NAVIGATION SYSTEMS.....	252
A.M. Gruzlikov, V.G. Karaulov, D.A. Mukhin, N.A. Shalaev RESULTS OF TESTING THE POSITIONING ALGORITHM AND DETERMINING THE ORIENTATION OF THE UNDERWATER VEHICLE BASED ON DATA FROM HYDRO-ACOUSTIC BEACONS.....	266
SECTION V. TECHNICAL VISION	
N.A. Bocharov STUDY OF APPROACHES TO THE UNIFICATION OF ON-BOARD COMPUTERS.....	275
N.V. Kolesov, E.V. Lukoyanov, V.S. Tyulnikov, R.L. Kryuchkov SCALABLE DATA PROCESSING IN AUV ONBOARD DISTRIBUTED COMPUTING SYSTEM	288

Раздел I. Перспективы применения робототехнических комплексов

УДК 005.216: 621.86

DOI 10.18522/2311-3103-2023-1-6-19

В.К. Абросимов, А.Н. Седов

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЫПОЛНЕНИЯ КОЛЛЕКТИВНОЙ МИССИИ МНОГОАГЕНТНОЙ ГЕТЕРОГЕННОЙ ГРУППОЙ

Целью исследования является определение критериев, параметров и показателей эффективности выполнения коллективных миссий группами, включающими в свой состав объекты управления разной функциональности и целевой нагрузки. В качестве примера миссии рассматривается самая актуальная военно-техническая задача последнего времени – мониторинга протяженных пространств. Особенностью постановки задачи является предположение о наличии опасных зон в области мониторинга. Любое противодействие потенциально критичных объектов, способное существенно ограничить возможности и даже лишить работоспособности средства мониторинга, оказывает влияние на постановку и выполнение группой миссии и неизбежно приводит к пересмотру как коллективных стратегий управления группой, так и индивидуальных стратегий средств мониторинга, маршрутов их движения, алгоритмов принятия решений и др. Средства мониторинга моделируются как интеллектуальные агенты, обученные в парадигме «коллективизма». Указанное обеспечивает общий ресурс ситуационной осведомленности группы, организацию переговоров агентов и взаимопомощи друг другу при возникновении проблемных ситуаций. Разработан общий подход к оценке эффективности решения коллективных задач гетерогенной группой разнотипных и разнородных агентов с учетом целевой функции, ресурсоемкости всей миссии организацией активного взаимодействия агентов между собой. Характеристику эффективности миссии предложено формировать как взвешенную сумму нормированных показателей параметров функций агентов с весами "значимость функции для миссии" и "ценность объекта" для группировки. Показано, что потеря эффективности выполнения коллективной миссии при возникновении проблемных ситуаций с агентом (активное воздействие противника, поломка, отсутствие необходимого функционала, ресурсов и др.) может быть возмещена требуемым функционалом других агентов группы с соответствующей реконфигурацией задач.

Агент; группа; объект управления; критерий; эффективность; коллективизм.

V.K. Abrosimov, A.N. Sedov

EFFICIENCY OF THE COLLECTIVE MISSION BY A MULTITENT HETEROGENEOUS GROUP

The article deals with study of the criteria, parameters and performance indicators for the implementation of the collective mission of extended space monitoring by a group that includes control objects with different functionality. The most urgent military-technical task of recent times – monitoring of extended spaces- is considered as an example of a mission. A feature of the article is the assumption about of hazardous zones in the monitoring area. Any counteraction from potentially critical objects may significantly limit the capabilities and even disable the monitoring tools. This proviso affects for implementation of the mission by the group and leads to a revision of the group collective strategies and individual strategies for monitoring tools, their movement routes, and decision-making algorithms and etc. Monitoring tools are modeled as intelligent agents trained by the "collectivism" paradigm. It provides a common resource of situational awareness of the group, the organization of

negotiations between agents and mutual assistance to each other in the event of problem situations. A general approach has been developed to evaluate the effectiveness of solving collective problems by a heterogeneous group of agents, taking into account the objective function, resource intensity of the entire mission and organizing active interaction between agents. It is proposed that the mission efficiency characteristic expressed as a weighted sum of the normalized indicators of the parameters of the agents' functions with the weights "significance of the function for the mission" and "value of the object". It is shown that the loss of efficiency in the performance of a collective mission in the event of problematic situations with an agent (active enemy action, breakdown, lack of the necessary functionality, resources, etc.) can be compensated by the required functionality of other agents of the group with the appropriate reconfiguration of tasks.

Agent; group; control object; criterion; efficiency; collectivism.

Введение. К числу важных военно-технических задач относятся задачи мониторинга протяженных пространств. В процессе мониторинга исследуется текущая ситуация в выделенной зоне ответственности, могут обнаруживаться искомые объекты, распознаваться и идентифицироваться критические события, фиксироваться нежелательные явления и др. Возникающие в процессе мониторинга ситуации часто требуют использования нескольких объектов управления с разной степенью функциональности, перераспределения задач в формате on-line, обмена информацией и командами управления. Поэтому все большее внимание уделяется групповому управлению. Ключевую роль при этом играет интеллектуализация объектов управления, способность обучаться, функционировать в заранее неопределенных условиях, зачастую при объективно пассивном или целенаправленно активном противодействии внешней среды.

Научно-технические задачи последнего времени выдвигают на основные роли в группах интеллектуальные объекты управления с различным функционалом. Указанное связано с тем, что целеполагание в сложной недоопределенной среде может быть задано только в общем виде. Это обуславливает требования многофункциональности и адаптивности (неясно, какие проблемы могут возникнуть при выполнении миссии, какие факторы будут воздействовать и др.). В этих миссиях задачи возлагаются на многофункциональные группы, состоящие из разнотипных, часто разнородных объектов управления с различным функционалом. Управление в группах таких объектов является в настоящий момент важнейшей задачей, направленной на преодоление технологических барьеров в сфере искусственного интеллекта и роботизации. Любое действие, противодействие, иное событие здесь будет влиять на постановку и собственно выполнение группой миссии и может приводить к пересмотру и перестроению как коллективных стратегий управления группой, так и индивидуальных стратегий отдельных объектов, маршрутов их движения, алгоритмов принятия решений и др.

В практическом плане наиболее интересно исследование процессов группового управления в группах наземных робототехнических средств, беспилотных летательных аппаратов, автономных необитаемых надводно-подводных аппаратов, которые могут действовать совместно в процессе выполнения задач с пилотируемой техникой различных типов базирования-воздушным, наземным, морским, подводным. Такие группы называют гетерогенными, в отличие от гомогенных групп, в состав которых входят объекты управления из одного множества. Управление в гетерогенных группах предлагается называть коллективным, что отличает его от группового управления в гомогенных группах [1, 2].

В работе [2] объекты управления предложено рассматривать как интеллектуальных агентов. Действительно, обученные определенным парадигмам поведения в сложных противодействующих средах системы управления объектов могут описывать возможности агентов, а необходимые ресурсы для их функционирования можно представлять как их потребности. Указанное позволяет рассматривать:

а) гетерогенную группу как многоагентную систему;

- б) алгоритмы системы управления объектом – как обучение агентов соответствующему поведению;
- в) взаимодействие в такой группе как взаимодействие в многоагентной системе;
- г) обмен информацией и принятие решений объектами управления – как проведение переговоров агентов с выработкой решающих правил.

Ниже предлагается именно такой подход.

К числу основных задач в группах относятся задачи обмена информацией между членами группы и выработки так называемого коллективного поведения. Как следствие, формируется определенная иерархичность группы. В рамках различных допустимых иерархий агенты либо выделяют Лидера, который управляет группой и определяет соответствующие приоритеты, либо проводят так называемые «переговоры» по распределению задач и преодолению возникающих проблемных ситуаций [3].

Среда функционирования гетерогенных групп редко является нейтральной; существуют объективные возмущающие природные, а чаще целенаправленно противодействующие факторы, существенно ограничивающие возможности агентов по реализации миссии. Для выработки групповых стратегий управления в работе [2] предложена специальная парадигма «коллективизма». В ее основу закладывается принцип «сотрудничества» агентов друг с другом, по которому при необходимости и возникновении заранее определенных условий объекты оказывают друг другу помощь своим функционалом и ресурсами, порой даже пренебрегая решением собственных задач. В рамках парадигмы «коллективизма» обучаются агенты трех видов: «альтруисты», всегда готовые оказать помощь другим членам группы как функционалом, так и ресурсами, «прагматики», оказывающие помощь при наступлении определенных условий и «эгоисты», имеющие высокий статус и не предназначенные для оказания помощи.

К числу практически важных проблемных вопросов исследования коллективного поведения в гетерогенных группах относятся вопросы оценки их эффективности. Эффективность отдельного агента обычно оценивают таким критерием, как «удовлетворенность агента» [4]. Как правило, показатели удовлетворенности связываются с так называемыми «поощрениями» за качественно выполненную работу, статус в группе и др. Вопросы же эффективности выполнения всей миссии до настоящего времени, как представляется, слабо исследованы. Отдельные результаты, см, например [5–7], описывающие методики количественной оценки миссии организации, методы повышения эффективности групповой деятельности команд и др., во-первых, описывают другие объекты исследования, а во-вторых – неприменимы вследствие принципиальной разницы решаемых задач. Действительно, сравнение эффективности двух групп агентов управления на основе «лепестковых» диаграмм или диаграмм типа «несимметричная звезда» возможно и правильно для человеческих коллективов, но позволяет работать только на шкалах порядка и не решает задач количественных оценок эффективности.

1. Краткий обзор литературы. Несмотря на активное использование в литературе по групповому управлению термина «эффективность», чаще всего оно употребляется без четких математических обоснований. Так в работе [1] подчеркивается необходимость руководствоваться критерием эффективности и указывается, что в групповой робототехнике существует два вида критериев эффективности: первого рода – степень достижения цели и второго рода – оценка эффективности в некотором заданном пути достижения цели. Но это никак не приближает к оценке реальной эффективности, особенно применительно к группам.

Достаточно стандартным подходом является выбор в качестве критерия эффективности времени решения задачи группой [8], суммарной длины траектории, необходимой для перемещения всех объектов (роботов) группы из начального по-

ложения в целевое [9] и др. При этом предполагается, что эффективность может быть повышена за счет рационального планирования и распределения заданий в группе роботов, повышения автономности и адаптивности управления на уровне отдельных агентов, адекватным прогнозом внешней ситуации и учетом ее объективной неопределенности, перераспределением нагрузки между роботами [10]. На повышение эффективности решения коллективных задач группами роботов различных типов указывают авторы работы [11], выдвигая в качестве критериев также оперативность решения соответствующих задач.

Интересный парадокс зафиксирован в работе [12]. Авторы в качестве критерия эффективности традиционно выбирают время решения задачи группой. Но подчеркивается, что в многообъектных системах возможен различный характер поведения этого критерия эффективности в зависимости от числа элементов: в общем случае время выполнения задачи небольшим количеством элементов группы сокращается с ростом их числа; далее, оно слабо колеблется у некоторой постоянной величины, а затем роботы начинают «мешать друг другу» и время решения задач увеличивается, а эффективность убывает.

В работе [13] эффективность применительно к промышленным роботам связывается с их производительностью, что очевидно. Но группы роботов, исследуемые в настоящей работе, имеют совершенно иной характер и задачи, чем группы промышленных роботов. Авторы работы [14] полагают, что эффективность напрямую связана с оптимизацией, в свою очередь зависящую от знания окружающей среды. Оценка функциональных характеристик роботов осуществляется на основе нечеткой модели, состоящей из отдельных нечетких классификаторов; каждый из них позволяет получить количественную оценку одного из параметров. В статье [15] опровергается распространенное мнение о том, что добавляя отдельные ресурсы к слабым в функциональном отношении роботам, в конечном итоге можно достичь заданной и высокой общей производительности системы. В результате в группу включаются более дорогие объекты управления, суммарная эффективность которых становится ниже.

Наиболее близко к рассматриваемой тематике относятся идеи авторов работ [16] и [17]. В статье [16] правильно связываются вопросы снижения эффективности решения групповых задач с возможным отказом отдельных роботов в условиях отсутствия централизованной системы принятия решений и возможности обмена информацией на уровне роя малых объектов. А автор работы [17] не только связывает эффективность решения групповых задач с количеством агентов, но также и выделяет показатель производительности, учитывающий все затраты, связанные с задачей. Выводятся аналитические выражения, которые можно использовать для прогнозирования оптимальных границ производительности системы с учетом конкретного описания задачи для различных стратегий поиска решения. Важно, выигрыш в производительности зависит от относительных значений различных составляющих стоимости.

В практическом плане указанный класс задач достаточно сильно коррелирует с задачами контроля состояния сельскохозяйственных полей [18]. Однако в таких задачах приоритет отдается исследованию эффективности самих аппаратов [19], а методы оценивания эффективности – с удовлетворенностью агентов, которые представляют беспилотные летательные аппараты. Эффективность же миссии напрямую связывается с уровнем специального вегетационного индекса, который слишком отдаленно связан с возможностями средств мониторинга.

Постановка задачи. Вопрос оценки эффективности коллективной миссии рассмотрим на примере мониторинга протяженного пространства, в котором находится активные средства противодействия противника, группой разнотипных объектов управления (наземные средства и беспилотники двух видов).

Дано:

1. Протяженное пространство площадью S .
 2. На пространстве S возможно нахождение двух типов объектов- не критичных A и критичных B , способных оказывать на средства мониторинга негативное воздействие и с вероятностью P_B снижать их работоспособность.

3. Для реализации миссии выделяются следующие средства мониторинга:

а) наземное средство (НС), способное передвигаться с низкой скоростью, обнаруживать, но не распознавать и идентифицировать объекты, и имеющее низкие возможности по нейтрализации объектов класса B ($P_{НС} \ll P_B^*$).

б) воздушное средство (ВС), обученное в парадигме "альтруист", способное передвигаться с ограниченной скоростью, обнаруживать, распознавать и идентифицировать объекты, и имеющее значительные возможности по нейтрализации объектов класса B ($P_{ВС} \gg P_B^*$).

в) воздушное средство (ВС-А), обученное в парадигме "прагматик", способное передвигаться с высокой скоростью, обнаруживать, распознавать и идентифицировать объекты, но имеющее ограниченные возможности по нейтрализации объектов класса B ($P_{ВСА} < P_B^*$).

г) функция эффективности выполнения миссии формируется как обследованная площадь S за заданное время T с обнаружением и идентификацией всех объектов и, при необходимости, воздействием на все критические объекты класса B .

Требуется.

1. Разработать подход к определению эффективности мониторинга протяженного пространства гетерогенной группой средств мониторинга.

2. Осуществить мониторинг пространства площадью S .

3. Обнаруженные объекты распознать и идентифицировать.

4. Если объект относится к классу A , о его статусе и расположении необходимо сообщить лицу принимающему решение.

5. Если объект относится к классу B , на него необходимо оказать воздействие с вероятностью снижения опасности P_B^* .

6. Оценить характер поведения функции эффективности выполнения миссии.

2. Системный аспект эффективности выполнения миссии. Выполнение миссии M группой агентов можно считать эффективным с интегральным критерием $\mathcal{E}_M$, если в процессе ее выполнения а) обеспечено высокое качество решения распределенных среди агентов задач I_M^Σ с максимальным использованием функционала агентов; б) затрачен минимум ресурсов R_M^Σ всех задействованных в миссии агентов и в) проявлена высокая степень коллективизма агентов в группе (C_M^Σ). Условно можно записать простой кортеж условий:

$$\mathcal{E}_M \Leftrightarrow \{I_M^\Sigma, R_M^\Sigma, C_M^\Sigma\}. \quad (1)$$

Здесь и далее логический символ-мнемоник $\Leftrightarrow$ означает "то же, что и.."

Миссия, как правило, включает в себя решение нескольких $i \in I$ задач (рис. 1). Указанные задачи решаются $k \in K$ объектами, включаемыми в гетерогенную группу. Так, стандартная миссия мониторинга протяженных пространств объектами управления декомпозируется на задачи перемещения в пространстве, наблюдения, обнаружения, распознавания, идентификации агентов, событий, ситуаций, информирования путем передачи информации лицам, принимающим решения, возврата на базу и др.

Каждый k -ый агент обладает определенным функционалом F , включающим J функций

$$F_k \Leftrightarrow \{f_{1k}, f_{2k}, \dots, f_{jk}, \dots, f_{Jk}\}, \quad (2)$$

где f_{jk} – j -ая функция k -го объекта. Так, в задачах мониторинга протяженных пространств выделяется следующая функциональность:

♦ наземный робот-перемещается, наблюдает, обнаруживает, при наличии на борту специальных программ и средств обработки информации распознает, идентифицирует, классифицирует, при необходимости оказывает воздействие на среду (робот с манипулятором – осуществляет действия);

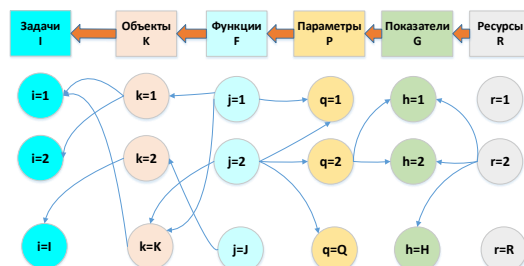


Рис. 1. К взаимосвязи агентов, решающих задачи миссии $\mathcal{M}$

♦ воздушный беспилотник- перемещается в воздушном пространстве, наблюдает, обнаруживает, при наличии на борту специального ПО и средств обработки распознает, идентифицирует классифицирует, при необходимости оказывает воздействие на среду (боевой беспилотник- атакует);

♦ морской надводный беспилотный аппарат- перемещается по воде, наблюдает, обнаруживает, при наличии на борту специальных программ и средств обработки распознает, идентифицирует классифицирует, при необходимости оказывает воздействие на среду (боевой комплекс – стреляет);

♦ подводный необитаемый аппарат-погружается, перемещается под водой, наблюдает, обнаруживает, запоминает информацию, всплывает, передает информацию.

Каждая j -ая функция может быть описана совокупностью соответствующих измеряемых параметров P :

$$P \Leftrightarrow \{p_{1jk}, p_{2jk}, \dots, p_{qjk}, \dots, p_{Qjk}\}, \quad (3)$$

где p_{qjk} – q -ый параметр j -ой функции k -го объекта.

Так, к параметрам функции «мониторинг» можно отнести площадь/объем пространства мониторинга и оперативность обследования заданной площади территории. Основным параметром функции «обнаружение агентов интереса» является вероятность обнаружения агентов. В функциях распознавания (идентификации) как параметр выступает качество правильного распознавания (идентификации), то есть вероятность ошибок первого и второго рода (принять при в процессе распознавания и идентификации правильный объект за неправильный и неправильный за правильный). Можно привести и другие примеры.

Каждый параметр из P может быть описан совокупностью показателей, которые выражаются в виде числовых или лингвистических оценок:

$$G \Leftrightarrow \{g_{1qjk}, g_{2qjk}, \dots, g_{hqjk}, \dots, g_{Hqjk}\}, \quad (4)$$

где g_{hqjk} – h -ая оценка g -го показателя q -го параметра j -ой функции k -го объекта. Так, показателем параметра «площадь территории» является числовая величина площади (пример: кв. км). Показателем параметра «вероятность обнаружения агентов» является лингвистическое выражение «очень высокая» либо соответствующая цифра и др. Достижение заданных значений показателей g_{hqjk}^* при решении i -той задачи миссии должно быть обеспечено определенными ресурсами $r_{ik} \in R_k^\Sigma$. Естественно, что суммарные ресурсы каждого k -го агента по решению всех задач, возлагаемых на него, также ограничены $R_k^\Sigma \leq R_k^{\Sigma*}$.

Практика показывает, что множество функций F , параметров функций P и показателей H параметров G для каждого k -того агента конечно.

3. Функциональность миссии. В процессе выполнения назначенной i -ой задачи агент $k \in K$ вносит в эффективность соответствующий вклад $\Delta\mathcal{E}_{ik}$, затрачивая ресурс r_{ik} . Поэтому текущая функция $\mathcal{E}_{\mathcal{M}}$ эффективности выполнения миссии $\mathcal{M}$ в части решения всех задач $I_{\mathcal{M}}^{\Sigma}$ может формироваться как суммарное приращение эффективности, обеспечиваемое вкладом всех K агентов в решение всех поставленных им задач. В работе [2] обосновывается, что не все задачи для выполнения миссии могут быть равнозначными. Кроме того, и ценность агентов может быть различной и связываться с их стоимостью, наличием установленной аппаратуры, парадигмой обученности и др. Введем весовой коэффициент $\varphi_{i\mathcal{M}}$ значимости i -той задачи для выполнения миссии $\mathcal{M}$ и коэффициент β_k для обозначения ценности k -того агента для группировки. Тогда

$$\mathcal{E}_{\mathcal{M}}(t) = \sum_I \varphi_{i\mathcal{M}} * \sum_K \{\beta_k * \Delta\mathcal{E}_{ik}(t)\}, \quad (5)$$

где $\Delta\mathcal{E}_{ik}(t)$ – текущее приращение эффективности миссии при решении i -ой задачи k -ым агентом.

На рис. 1 условно показана взаимосвязь ресурсов R , обеспечивающих получение $h \in H$ показателей G , описывающих $q \in Q$ параметров P , характеризующих $j \in J$ функций F , присущих агентам из множества K . С учетом того, что критериями эффективности по сути являются параметры функций агентов, процесс выполнения миссии сводится к получению заданных значений показателей параметров g_{hjqk}^* при решении всех $i \in I$ задач всеми $k \in K$ объектами с использованием F_k функций.

Перечисленные выше функции агентов существенно различаются как по смыслу (движение, распознавание, воздействие на среду и др.), так и по размерности показателей (скорость движения, оперативность выполнения задачи, вероятность распознавания, надежность успешного воздействия на среду и др.). Для объединения разнотипных сущностей в когнитивном моделировании и теории принятия решений существует единственный методический прием – взвешенная сумма нормированных величин. Для этого приведем к нормальному виду на интервале $[0,1]$ текущие значения $g_{hjqk}(t)$ показателей G параметров Q функций F , осуществив следующее преобразование нормирования

$$g_{hjqk}^n(t) = g_{hjqk}(t) / g_{hjqk}^{max}. \quad (6)$$

Приращения эффективности $\Delta\mathcal{E}_{ik}(t)$ обеспечиваются за счет приращения значений показателей $g_{hjqk}(t)$. Поэтому

$$\Delta\mathcal{E}_{ik}(t) = \sum_J \sum_Q \sum_H \{\Delta g_{hjqk}^n(t)\}. \quad (7)$$

В начальный момент времени эффективность выполнения миссии $\mathcal{E}_{\mathcal{M}}(t_0) = 0$. Далее, по мере выполнения миссии, функция эффективности увеличивается, стремясь к заданной, которую можно выразить таким образом:

$$\mathcal{E}_{\mathcal{M}}^* = \sum_I \varphi_{i\mathcal{M}} * \sum_K \{\beta_k * \sum_J \sum_Q \sum_H g_{hjqk}^{n*}(t)\}. \quad (8)$$

4. Ресурсоемкость миссии. Введем понятие «ресурсоемкости» миссии, под которой будем понимать общую сумму всех ресурсов, затраченных на выполнение задач всеми объектами, участвующими в выполнении задач миссии.

$$R_{\mathcal{M}} = \sum_I \varphi_{i\mathcal{M}} * \sum_K \{\beta_k * R_{ik}^{\Sigma}\} \rightarrow \min. \quad (9)$$

В начале миссии ресурсы k -ного агента могут быть использованы а) для обеспечения приращений показателей $\Delta g_{hjqk}^n(t)$ и б) для помощи другим объектам. В любом случае суммарные ресурсы каждого агента ограничены определен-

ным минимумом $R_k^{\min}$, определяемого пределом выживаемости объекта. Так, применительно к БПЛА фактор выживания заключает в наличии «неприкосновенного запаса» ресурса $R_{\text{БПЛА}}^{\min}$, необходимого для решения задачи самостоятельного возвращения в исходную точку начала маршрута.

Примеры:

а) возникновение тумана снижает возможности функции распознавания агентов оптической системой технического зрения и оба параметра эффективности этой функции а) дальность потенциального распознавания б) вероятность распознавания;

б) ночные условия выполнения задач приводит к преждевременному расходу ресурса агента (например, топлива) и невыполнению агентом задачи.

в) повреждение боевого агента системой противодействия противника приводит к потере возможности его влияния (воздействия) на противника.

г) если поставленные задачи для БПЛА требуют значительных ресурсов, то при условии $r_{ik}(t) < R_k^{\min}$, выполнение задач прекращается и БПЛА возвращается на базу.

Естественно, нужно стремиться к минимизации общих затрачиваемых ресурсов $R_M \rightarrow \min$.

5. Коллективизм миссии. Рассмотрим сначала человеческий коллектив. Коллективы не формируются спонтанно, они образуются в процессе выполнения общих миссий. Характеристики коллективов обычно выражаются лингвистическими переменными: сплоченный, работоспособный, разносторонний, дружеский и др. Коллективы выполняют различные миссии, но в рамках одной предметной области. Лидер в коллективе появляется постепенно и его возникновение, как показывают результаты гуманитарных и социологических исследований, часто бывает неожиданным; далеко не все участники коллективов обладают лидерскими задатками.

Целесообразно провести некоторые аналогии для технических задач.

Принципиально потеря эффективности выполнения всей миссии $\Delta \bar{\mathcal{M}}$ складывается из потерь эффективности $\Delta \bar{\mathcal{M}}_{iz}$, которые возникают за счет невыполнения i -тых задач отдельными $z \in Z \subset K$ -тыми объектами

$$\Delta \bar{\mathcal{M}} = \sum_I \varphi_{iM} * \sum_Z \{\beta_z * \Delta \bar{\mathcal{M}}_{iz}(t)\}, \quad (10)$$

В свою очередь потеря эффективности при выполнении i -ой задачи конкретным z -ым агентом складывается из нескольких составляющих:

- ♦ возможной потери работоспособности за счет поломки или активного влияния внешней среды;
- ♦ сохранения функциональности, но изменения значений параметров функций в негативном для эффективности миссии направлении;
- ♦ сокращения ресурсов для решения собственных задач за счет предоставления их другим агентам.

Тогда, с учетом (8)

$$\sum_Z \beta_z * \Delta \bar{\mathcal{M}}_{iz}(t) = \sum_Z \{\beta_z * \sum_J \sum_Q \sum_H \{\Delta g_{hjqz}^{n-}(t)\}\}. \quad (11)$$

Здесь $\Delta \bar{\mathcal{M}}_{iz}(t)$ потеря эффективности выполнения миссии за счет z -го агента при решении i -ой задачи, а Δg_{hjqz}^{n-} — степень снижения эффективности миссии на величину h -того показателя q -того параметра j -ой функции z -го агента при выполнении i -ой задачи миссии.

В соответствии с парадигмой коллективизма [2] при формировании гетерогенной группы в нее включаются разнотипные и разнородные объекты, объединенные по информации и управлению с возможностью функциональной взаимопомощи друг другу. Такие решения способны компенсировать потерю $\Delta \bar{\mathcal{M}}$ эффективности выполнения миссии.

С учетом включения в группу агентов $ka \in K$, обученных в парадигме коллективизма со статусом альтруистов «А» с оказанием помощи в размере $\Delta g_{hqjza}^{n+}(t)$, и $ku \in K$ с статусом прагматиков «У» с оказанием помощи в размере $\Delta g_{hqjzu}^{n+}(t)$ можно записать выражение, обеспечивающее приращение эффективности от альтруистов и прагматиков:

$$\Delta \mathcal{E}_M^+ = \sum_{KA} [\beta_{ka} * \sum_J \sum_Q \sum_H \{\Delta g_{hqjka}^{n+}(t)\}] + \sum_{KU} [\beta_{ku} * \sum_J \sum_Q \sum_H \{\Delta g_{hqjku}^{n+}(t)\}]. \quad (12)$$

Выполнение условия

$$\Delta \mathcal{E}_M^+ \geq \Delta \mathcal{E}_M^- \quad (13)$$

означает, что положительное приращение эффективности миссии превышает отрицательные потери. Поскольку положительный эффект должен достигаться путем использования ресурсов других агентов, то выражение (13) можно рассматривать как подтверждение преимуществ использования парадигмы коллективизма. При этом степень коллективизма C_M^Σ данной гетерогенной группы при выполнении миссии $\mathcal{M}$ целесообразно оценивать величиной отношения

$$C_M^\Sigma = \Delta \mathcal{E}_M^+ / \mathcal{E}_M^*, \quad (14)$$

т.е. долей эффективности оказанных сервисов помощи по отношению к заданному значению эффективности всей миссии.

Очевидно, что вся миссия будет считаться эффективной, если одновременно выполняются три условия:

$$\{\mathcal{E}_M(t) \geq \mathcal{E}_M^*\} \wedge \{R_M \rightarrow \min\} \wedge \{C_M^\Sigma \rightarrow \max\}. \quad (15)$$

6. Удовлетворенность агентов. Суммарная степень коллективизма группы складывается не из индивидуальных оценок удовлетворенности входящих в нее агентов, а из совокупности сервисов, оказанных агентами друг другу. Здесь также могут использоваться критерии, связанные, прежде всего, с уровнем взаимопомощи; они могут формулироваться в терминах показателей параметров агента, затраченных на помощь другим объектам. В теории многоагентных систем активно используется понятие «удовлетворенности» объекта. Каждый агент имеет получает набор атрибутов, которые описываются показателями. В зависимости от значения показателя в данной ситуации агент может быть либо удовлетворен, либо неудовлетворен. Функции удовлетворенности задаются в кусочно-линейном виде и хранятся в онтологии [4]. Однако вопрос удовлетворенности агентов, функционирующих в составе гетерогенной группы, тем более в парадигме коллективизма, пока не исследован. Как представляется, понятие удовлетворенности агента для этих условий также может применяться. Но если для практически апробированных многоагентных систем решается, как правило, задача, когда агенты соревнуются за выполнение задач, имея соответствующие ресурсы [1, 4, 18 и др.], то для гетерогенных систем, реализующих принципы коллективизма, ситуация принципиально иная.

Удовлетворенность объекта-альтруиста ka складывается из двух составляющих – объема вклада в общую целевую функцию $\Delta \mathcal{E}_{ika}$ при решении i -ой задачи и объема услуг, оказанных $x \in X$ другим объектам $\Delta \mathcal{E}_{ika \rightarrow x}$. Согласно парадигме «коллективизма» в самом начале выполнения миссии объект-альтруист полностью неудовлетворен [2]. Его удовлетворенность ступенчато возрастает в функции объема предоставленных другим агентам сервисов. Если к агенту-альтруисту никто не обращается за ресурсом, то его удовлетворенность не меняется, оставаясь на уровне, достигнутом к моменту оказания последней услуги. Но ресурсы не бесконечны и они требуются также и самому агенту-альтруисту для собственного «выживания» (см. п. 3). Если в момент исчерпания части своего ресурса, потенциально возможного для помощи другим агентам, к агенту-альтруисту поступает запрос на его ресурсе, а он его выполнить не может, то его удовлетворенность падает, в зависимости от числа обращений и объема оказываемых услуг.

Как следует из изложенного, объект-альтруист будет стремиться к максимизации следующей функции удовлетворенности

$$W_{KA} = \max [\sum_I \varphi_{iM} * \sum_{KA} \{\beta_{ka} * \sum_X \sum_J \sum_Q \sum_H \{g_{hjqka \rightarrow x}^n(t)\}\}]. \quad (16)$$

Здесь X -количество агентов группы, которым оказано содействие. Выражение (16) справедливо и для агентов-прагматиков за тем исключением, что по мере выполнения i -ой задачи миссии удовлетворенность каждого ku -го объекта-прагматика понижается на величину оказанных сервисов. Поэтому прагматик будет стремиться к минимизации оказанных сервисов

$$W_{KA} = \min [\sum_I \varphi_{iM} * \{\beta_k * \sum_{KA} \sum_X \sum_J \sum_Q \sum_H \{g_{hjqku \rightarrow x}^n(t)\}\}], \quad (17)$$

Агент-эгоист полностью удовлетворен тогда, когда к нему нет обращений за помощью [2]. В соответствии с концепцией коллективизма, он никому не оказывает услуг и его удовлетворенность со временем не меняется. По сути он исключается из процессов анализа удовлетворенности, и, следовательно эффективности. Он призван обеспечивать ее и только этим влиять на ее изменение. При этом такие объекты не участвуют в оценке общей степени коллективизма группы.

В описание объекта управления как интеллектуального агента предлагается включать параметры, отражающие опыт и квалификацию агента [2]. Опыт агента может быть учтен посредством числа миссий, к выполнению которых он привлекался. Квалификация агента может быть ассоциирована с стандартным критерием много-агентных систем – степенью его удовлетворенности, суммируемой по числу миссий.

6. Результаты эксперимента. Для оценки эффективности решения групповых задач с использованием библиотеки Matlab была разработана специальная модель реализации миссий M мониторинга протяженных пространств группами наземных и летательных аппаратов. Планирование миссии осуществлялось из условия выделения в зоне мониторинга площадей, соответствующих скоростным и интеллектуальным (обнаружения, распознавание и идентификация) возможностям аппаратов. При наличии предварительной информации о расположении на местности критичных объектов класса В эти районы считались приоритетными посредством задания коэффициентов φ_{iM} значимости задач для выполнения миссии. Заданием коэффициента β_k ценности k -го агента для группировки регулировалось распределение задач для более ценных (по стоимости и интеллектуальным возможностям) наземных и летательных аппаратов. Воздушные средства мониторинга обучались в парадигме «коллективизма». В процессе моделирования по мере выполнения задач и соответствующих вкладов средств мониторинга изменялась функция эффективности выполнения миссии за счет вкладов, а средствам мониторинга назначались условные «награды» за оказание соответствующей помощи другим средствам, отказа от собственных задач и решения невыполненных задач за других объектов. Для обеспечения адекватности модели вводились также и «штрафы» за нерешенные задачи (необнаружение критичного объекта класса "В", неправильная идентификация объектов и др.), а также за превышение общего времени мониторинга заданных значений.

В процессе экспериментов рассматривались различные сценарии, в том числе обучение средств мониторинга в различных парадигмах «коллективизма», варьирование скоростью движения как наземных, так и воздушных средств, различные «поощрения» и «наказания» агентов, высокая и низкая активность критичных объектов, а также их количество в зоне мониторинга. В результате установлено, что функция эффективности $\mathcal{E}_m(t)$ миссии мониторинга протяженных пространств имеет кусочно-непрерывный (при дискретных значениях времени) и, как правило, возрастающий характер (рис. 1). Она формируется за счет изменяющихся вкладов агентов $\Delta \mathcal{E}_k^T$ (обследованная площадь территории, обнаруженные и идентифицированные

объекты классов А и В, нейтрализованные объекты класса В). Резкие скачкообразные положительные изменения функции связаны с событиями, описываемые фактами (обнаружен объект, распознан объект, проведено действие по нейтрализации критичного объекта. Резкие отрицательные изменения значений функции эффективности связаны с форс-мажорными обстоятельствами вследствие пассивного или активного воздействия со стороны критичных объектов и, как следствие, снижением возможности выполнения задач средств мониторинга вплоть до потери работоспособности (пример: состояние НС в момент 5+ на рис. 1). В условиях неопределенности наличия в зоне мониторинга не критичных и критичных объектов время мониторинга, как правило, превышало изначально заданное значение и затрачивалось, главным образом, на смену маршрутов движения для нейтрализации критичных объектов теми средствами, которые имели соответствующие возможности; при этом их невыполненные задачи пришлось возлагать на другие средства мониторинга.

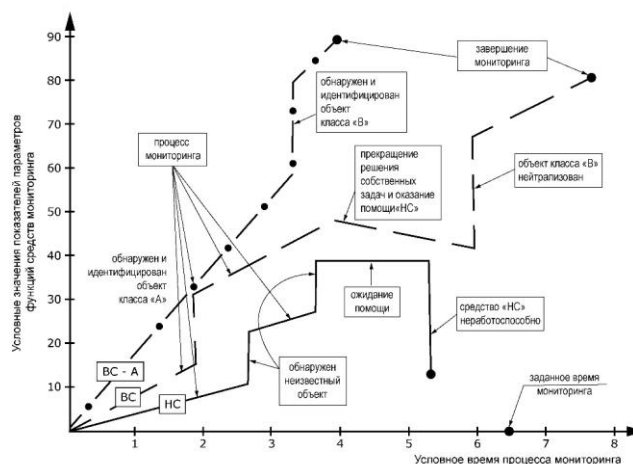


Рис. 1. Иллюстрация вкладов отдельных средств мониторинга в общую функцию эффективности выполнения коллективной миссии

Заключение. Анализ отечественной и зарубежной литературы показал, что вопросы оценки эффективности функционирования групп при выполнении ими коллективных миссий, тем более в условиях противодействующей среды, исследованы недостаточно. В настоящей работе рассмотрены вопросы формирования критериев, параметров и показателей эффективности выполнения коллективной миссии мониторинга протяженных пространств группой, включающей в свой состав объекты управления разной функциональности и целевой нагрузки.

Объекты управления удобно представлять как интеллектуальных агентов, гетерогенную группу как многоагентную систему, алгоритмы системы управления объектом-как обучение агентов соответствующему поведению, взаимодействие в группе как взаимодействие в многоагентной системе, обмен информацией и принятие решений объектами управления – как проведение переговоров агентов с выработкой решающих правил. Разработан общий подход к оценке эффективности решения коллективных задач группой разнотипных и разнородных агентов с учетом целевой функции, ресурсоемкости всей миссии и использования парадигмы коллективизма с активным взаимодействием агентов между собой.

Целевая функция миссии формируется по результатам решения совокупности задач, составляющих миссию, с использованием функционала всех задействованных в миссии агентов. Характеристику ее эффективности предложено форми-

ровать как взвешенную сумму нормированных показателей параметров функций агентов, где веса могут характеризовать значимость функции и ценность агентов для выполнения поставленных перед миссией задач.

Удовлетворенность агентов-альтруистов определяется объемом помощи, возрастает с оказанием числа фактов помощи и снижается при невозможности помощи. Удовлетворенность агентов-прагматиков также связана с условием предоставления услуг; но при этом функция удовлетворенности обратна принятой у агентов-альтруистов – уменьшается с увеличением объема и количества предоставляемых сервисов.

Показано, что потеря эффективности выполнения коллективной миссии при возникновении проблемных ситуаций с объектами (активное воздействие противника, поломка, отсутствие необходимого функционала, ресурсов и др.) может быть возмещена требуемым функционалом других агентов группы с соответствующей реконфигурацией задач.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коллективы интеллектуальных роботов. Сферы применения / под ред. В.И. Сырымкина. – Томск: STT, 2018. – 140 с.
2. Abrosimov V., Mochalkin A. Collective behavior strategy development based on friendship of robots // Proceedings of 4th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering (ICMRE), Valenciennes, France. – P. 38-4. – DOI: <https://doi.org/10.1145/3191477.3191479>.
3. Rzevski G., Skobelev P. Managing Complexity. – Wit Pr/Computational Mechanics, 2014. – 216 p.
4. Майоров И.В. Мультиагентные модели и технологии ситуационного управления ресурсами предприятий в условиях неопределенности: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. – Самара: ФГБОУ ВО Самарский государственный технический университет, 2017. – 259 с.
5. Колесников А.В. Методика количественной оценки миссии организации // Вестник РЭУ им. Г.В. Плеханова. – 2017. – № 5 (95). – С. 119-125.
6. Коротков Э.М. Менеджмент: учебник для бакалавров. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: ИД Юрайт, 2014. – 684 с.
7. Сидоренков А.В., Ульянова Н.Ю. Управление эффективностью групп и команд в организации: учеб. пособие. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2016. – 328 с.
8. Карпов В.Э. Коллективное поведение роботов. Желаемое и действительное // Современная мехатроника: Сб. научных трудов Всероссийской научной школы (г. Орехово-Зуево, 22-23 сентября 2011). – Орехово-Зуево, 2011. – С. 35-51. – URL: <https://publications.hse.ru/chapters/51216080> (дата обращения: 02.11.2022).
9. Павлов А.С. Методика планирования траектории движения группы мобильных роботов в неизвестной замкнутой среде с препятствиями // Системы управления, связи и безопасности. – 2021. – № 3. – С. 38-59.
10. Melnik E., Safronkova I., Kapustyan S. The Efficiency Improvement of Robots Group Operation by Means of Workload Relocation // Proceedings of the International Conference on Interactive Collaborative Robotics. – 2021. – P. 126-137. – DOI: 10.1007/978-3-030-87725-5.
11. Taeyong C., Jongwoo P., Jeong-Jung K., Young-Sik S., Hyunuk S. Work Efficiency Analysis of Multiple Heterogeneous Robots for Harvesting Crops in Smart Greenhouses // Agronomy. – 2022. – No. 12 (11):2844. – DOI: 10.3390/agronomy12112844.
12. Бакиров А.К., Кирильченко А.А. Проблемы управления распределенными мобильными системами. – М., 2000. – 23 с.
13. Essers M.S., Vaneker T.N.J. Developing Concepts for Improved Efficiency of Robot Work Preparation // Proceedings CIRP. – 2013. – Vol. 7. – P. 515-520. – DOI: [10.1016/j.procir.2013.06.025](https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.06.025).
14. Beloglazov D., Pereverzev V., Soloviev V., Pshikhov V., Morozov R. Method of Formation of Quantitative Indicators of Complexity of the Environment by a Group of Autonomous Mobile Robots // Journal of Robotics. – 2020. – No. 3. – P. 1-14 DOI: 10.1155/2020/6874291.
15. Altshuler H., Wagner I.V., Bruckstein F.M. With caution-decreasing a swarm robotics' efficiency by imprudently enhancing the robots' capabilities // IEEE Xplore Conference: Autonomous Robots and Agents. – 2009. – DOI: 10.1109/ICARA.2000.4804014.
16. Elshamy W. Adaptive Control in Swarm Robotics Computer Science. – 2021. – <https://www.semanticscholar.org/paper/Adaptive-Control-in-Swarm-Robotics-Elshamy/b112317012d4380a0311276936ddefd7c8cddd16>.

17. Hayes A.T. How Many Robots? Group Size and Efficiency in Collective Search Tasks // Distributed Autonomous Robotic Systems. – 2002. – No. 5. – P. 289-298. – DOI: 10.1007/978-4-431-65941-9_29.
18. Мочалкин А.С., Воцук Д.С., Воцук Г.Ю., Майоров И.В. Разработка сетцентрической интеллектуальной системы адаптивного планирования действий группы автономных беспилотных аппаратов для согласованного выполнения поставленных задач // Управление и обработка информации в технических системах: Тез. докл. X Всероссийской науч.-практ. конф. Перспективные системы и задачи управления. – Ростов-на-Дону, 2015. – С. 166-172.
19. Майорова В.И., Банников А.М., Гришко Д.А., Жаринов И.С., Леонов В.В., А.Г. Топорков, Харлан А.А. Контроль состояния сельскохозяйственных полей на основе прогнозирования динамики индекса NDVI по данным космической мультиспектральной и гиперспектральной съемки // Наука и образование. – 2013. – № 7. – С. 199-228.
20. Skobelev P. Multi-Agent Systems for Real Time Adaptive Resource Management // Industrial Agents: Emerging Applications of Software Agents in Industry / Eds.: P. Leitão, S. Karmouskos. – Elsevier, 2015. – P. 207-230.

REFERENCES

1. Kollektivny intellektual'nykh robotov. Sfery primeneniya [Teams of intelligent robots. Spheres of application], ed. by V.I. Syryamkina. Tomsk: STT, 2018, 140 p.
2. Abrosimov V., Mochalkin A. Collective behavior strategy development based on friendship of robots, *Proceedings of 4th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering (ICMRE), Valenciennes, France*, pp. 38-4. DOI: <https://doi.org/10.1145/3191477.3191479>.
3. Rzevski G., Skobelev P. Managing Complexity. Wit Pr/Computational Mechanics, 2014, 216 p.
4. Mayorov I.V. Mul'tiagentnye modeli i tekhnologii situatsionnogo upravleniya resursami predpriyatiy v usloviyakh neopredelennosti: dis. ... kand. tekhn. nauk [Multi-agent models and technologies of situational management of enterprise resources in conditions of uncertainty: cand. of eng. sc. diss.]: 05.13.01. Samara: FGBOU VO Samarskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 2017, 259 p.
5. Kolesnikov A.V. Metodika kolichestvennoy otsenki missii organizatsii [Methodology of quantitative assessment of the organization's mission], *Vestnik REU im. G.V. Plekhanova* [Bulletin of Plekhanov Russian University of Economics], 2017, No. 5 (95), pp. 119-125.
6. Korotkov E.M. Menedzhment: uchebnik dlya bakalavrov [Management: textbook for bachelors]. 3rd ed. Moscow: ID Yurayt, 2014, 684 p.
7. Sidorenkov A.V., Ul'yanova N.Yu. Upravlenie effektivnost'yu grupp i komand v organizatsii: ucheb. posobie [Managing the effectiveness of groups and teams in an organization: a textbook]. Rostov-on-Donu: Izd-vo YuFU, 2016, 328 p.
8. Karpov V.E. Kollektivnoe povedenie robotov. ZHelaemoe i deystvitel'noe [Collective behavior of robots. Wishful and valid], *Sovremennaya mekhatronika: Sb. nauchnykh trudov Vserossiyskoy nauchnoy shkoly (g. Orekhovo-Zuevo, 22-23 sentyabrya 2011)* [Modern mechatronics: Collection of scientific papers of the All-Russian Scientific School (Orekhovo-Zuevo, September 22-23, 2011)]. Orekhovo-Zuevo, 2011, pp. 35-51. Available at: <https://publications.hse.ru/chapters/51216080> (accessed 02 November 2022).
9. Pavlov A.S. Metodika planirovaniya traektorii dvizheniya gruppy mobil'nykh robotov v neizvestnoy zamknutoy srede s prepyatstviyami [Methodology for planning the trajectory of a group of mobile robots in an unknown closed environment with obstacles], *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti* [Control, communication and security systems], 2021, No. 3, pp. 38-59.
10. Melnik E., Safronenkova I., Kapustyan S. The Efficiency Improvement of Robots Group Operation by Means of Workload Relocation, *Proceedings of the International Conference on Interactive Collaborative Robotics*, 2021, pp. 126-137. DOI: 10.1007/978-3-030-87725-5.
11. Taeyong C., Jongwoo P., Jeong-Jung K., Young-Sik S., Hyunuk S. Work Efficiency Analysis of Multiple Heterogeneous Robots for Harvesting Crops in Smart Greenhouses, *Agronomy*, 2022, No. 12 (11):2844. DOI: 10.3390/agronomy12112844.
12. Bakirov A.K., Kiril'chenko A.A. Problemy upravleniya raspredelennymi mobil'nymi sistemami [Problems of management of distributed mobile systems]. Moscow, 2000, 23 p.
13. Essers M.S., Vaneker T.N.J. Developing Concepts for Improved Efficiency of Robot Work Preparation, *Proceedings CIRP*, 2013, Vol. 7, pp. 515-520. DOI: [10.1016/j.procir.2013.06.025](https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.06.025).
14. Beloglazov D., Pereverzev V., Soloviev V., Pshikhov V., Morozov R. Method of Formation of Quantitative Indicators of Complexity of the Environment by a Group of Autonomous Mobile Robots, *Journal of Robotics*, 2020, No. 3, pp. 1-14 DOI:10.1155/2020/6874291.

15. Alitshuler H., Wagner I.V., Bruckstein F.M. With caution-decreasing a swarm robotics' efficiency by imprudently enhancing the robots' capabilities, *IEEE Xplore Conference: Autonomous Robots and Agents*, 2009. DOI: 10.1109/ICARA.2000.4804014.
16. Elshamy W. Adaptive Control in Swarm Robotics Computer Science, 2021. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Adaptive-Control-in-Swarm-Robotics-Elshamy/b112317012d4380a0311276936ddefd7c8cddd16>.
17. Hayes A.T. How Many Robots? Group Size and Efficiency in Collective Search Tasks, *Distributed Autonomous Robotic Systems*, 2002, No. 5, pp. 289-298. DOI: 10.1007/978-4-431-65941-9_29.
18. Mochalkin A.S., Voshchuk D.S., Voshchuk G.Yu., Mayorov I.V. Razrabotka setetsentricheskoy intellektual'noy sistemy adaptivnogo planirovaniya deystviy gruppy avtonomnykh bespilotnykh apparatov dlya soglasovannogo vypolneniya postavlennykh zadach [Development of a network-centric intelligent system for adaptive planning of actions of a group of autonomous unmanned vehicles for the coordinated performance of assigned tasks], *Upravlenie i obrabotka informatsii v tekhnicheskikh sistemakh: Tez. dokl. X Vserossiyskoy nauch.-prakt. konf. Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya* [Management and processing of information in technical systems: Abstracts of the X All-Russian Scientific and Practical Conference Perspective systems and management tasks.]. Rostov-on-Don, 2015, pp. 166-172.
19. Mayorova V.I., Bannikov A.M., Grishko D.A., Zharinov I.S., Leonov V.V., A.G. Toporkov, Kharlan A.A. Kontrol' sostoyaniya sel'skokhozyaystvennykh poley na osnove prognozirovaniya dinamiki indeksa NDVI po dannym kosmicheskoy mul'tispektral'noy i giperspektral'noy s'emki [Monitoring the state of agricultural fields based on forecasting the dynamics of the NDVI index according to the data of space multispectral and hyperspectral surveys], *Nauka i obrazovanie* [Science and Education], 2013, No. 7, pp. 199-228.
20. Skobelev P. Multi-Agent Systems for Real Time Adaptive Resource Management, *Industrial Agents: Emerging Applications of Software Agents in Industry*, Eds.: P. Leitão, S. Karnouskos. Elsevier, 2015, pp. 207-230.

Статью рекомендовал к опубликованию д.в.н., доцент А.А. Селиванов.

Абросимов Вячеслав Константинович – Главный научно-исследовательский испытательный межвидовой центр перспективного вооружения Министерства обороны РФ; e-mail avk787@yandex.ru; г. Москва, Россия; тел.: +7916 815 35 12; д.т.н.; с.н.с.; в.н.с.

Седов Александр Николаевич – НПК "Сетецентрические платформы"; e-mail: a-mochalkin@mail.ru; г. Самара, Россия; тел.: +79613848484; Генеральный директор.

Abrosimov Vyacheslav Konstantinovich – Chief Research and Testing Interspecific Armament Center of the Ministry of Defense of the Russian Federation; e-mail avk787@yandex.ru; Moscow, Russia; phone: +79168153512; dr. of eng. sc.; senior researcher; leading researcher.

Sedov Alexander Nikolaevich – NPK "Network-centric platforms"; e-mail a-mochalkin@mail.ru; Samara, Russia; phone: +79613848484; CEO.

УДК 621.337.11:004.942:519.876.5

DOI 10.18522/2311-3103-2023-1-19-31

П.П. Чернусь, П.П. Чернусь, А.А. Яковлев, Р.В. Сахабудинов, А.С. Голосий

СИНТЕЗ ЦИФРОВОГО РЕГУЛЯТОРА ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ПОДВОДНОГО ОБЪЕКТА

Представлены результаты разработки и синтеза гидравлической системы стабилизации подводного объекта. Для полноты и точности математического моделирования в гидравлической системе учтены силы сухого трения между поршнем и стенками гидроцилиндра, силы сухого трения между штоком и гидроцилиндром, которые в сумме определяют общую силу сухого трения в активном гидроцилиндре, общие силы сухого трения в пассивном гидроцилиндре, ускорения движения. Также учтены приведенная масса системы блоков и полиспаста, массы подвижных частей активного и пассивного гидроцилиндров. После расчета мас-

совых и динамических характеристик гидравлической системы стабилизации было проведено математическое моделирование разработанной системы. В процессе разработки и синтеза системы были учтены особенности и типовые нелинейности входящих в состав системы гидравлической и пневматической частей, такие как расходная характеристика гидрораспределителя золотникового типа, малые расходы утечек и сжатия в рабочих полостях активного гидроцилиндра. При проектировании был принят адиабатический характер процесса в пневмогидровытеснителе, поскольку реакция и движение гидравлической системы стабилизации происходит достаточно быстро, в виду чего тепловой обмен с окружающей средой будет пренебрежимо мал. В процессе синтеза математической модели системы учитывается нелинейность коэффициента упругости троса. Проведено исследование устойчивости математической модели системы стабилизации и проведен синтез системы управления гидравлической частью системы с использованием ПИД-регулятора. Расчет параметров ПИД-регулятора произведен с применением стандартной методики расчета. Поскольку результат работы системы стабилизации при таком синтезе системы управления сильно зависит от сигнала возмущения, было принято решение повысить инвариантность системы по отношению ко входному сигналу путем введения комбинированного управления. Такое улучшение системы оказалось достаточным для повышения качества работы математической модели гидравлической системы стабилизации. Проведено цифровое перепроектирование регулятора, учтены особенности работы аналого-цифровых преобразователей датчиков. Результаты моделирования показали работоспособность такой системы управления.

Гидропривод; устойчивость; синтез систем управления; комбинированное управление; цифровое перепроектирование; период дискретизации по времени.

P.P. Chernus, P.P. Chernus, A.A. Yakovlev, R.V. Sakhabudinov, A.S. Golosiy

SYNTHESIS OF A DIGITAL REGULATOR OF A HYDRAULIC SYSTEM FOR STABILIZING AN UNDERWATER OBJECT

The article presents the results of the development and synthesis of a hydraulic system for stabilizing an underwater object. For completeness and accuracy of mathematical modeling in the hydraulic system, the forces of dry friction between the piston and the walls of the hydraulic cylinder, the forces of dry friction between the rod and the hydraulic cylinder, which together determine the total dry friction force in the active hydraulic cylinder, the total dry friction force in the passive hydraulic cylinder, and the acceleration of movement, are taken into account. Also taken into account is the reduced mass of the system of blocks and chain hoist, the mass of the moving parts of the active and passive hydraulic cylinders. After calculating the mass and dynamic characteristics of the hydraulic stabilization system, mathematical modeling of the developed system was carried out. In the process of developing and synthesizing the system, the features and typical non-linearities of the hydraulic and pneumatic parts included in the system were taken into account, such as the flow characteristic of a spool-type hydraulic valve, low leakage and compression costs in the working cavities of the active hydraulic cylinder. When designing, the adiabatic nature of the process in the pneumohydraulic displacer was adopted, since the reaction and movement of the hydraulic stabilization system occurs quite quickly, which means that the heat exchange with the environment will be negligible. In the process of synthesizing the mathematical model of the system, the nonlinearity of the rope elasticity coefficient is taken into account. A study of the stability of the mathematical model of the stabilization system was carried out and a synthesis of the control system for the hydraulic part of the system was carried out using a fairly common PID controller. The PID controller parameters were calculated using a standard calculation method. Since the result of the operation of the stabilization system with such a synthesis of the control system strongly depended on the perturbation signal, it was decided to increase the invariance of the system with respect to the input signal by introducing a combined control. Such an improvement of the system turned out to be sufficient to improve the quality of the mathematical model of the hydraulic stabilization system. A digital redesign of the controller was carried out, the features of the operation of analog-to-digital transducers of sensors were taken into account. The simulation results showed the operability of such a control system.

Hydraulic drive; stability; synthesis of control systems; combined management; digital redesign; time sampling period.

Введение. Схема работы рассматриваемой системы стабилизации представлена на рис. 1. Здесь 1 – пневмогидроаккумулятор; 2 – пассивный гидроцилиндр; 3 – активный гидроцилиндр; 4 – вьюшка; 5 – лебедка транзитная; 6 – датчик натяжения; 7 – выключатель бесконтактный SQ2; 8 – выключатель бесконтактный SQ1; 9 – гидроцилиндр; 10 – пневмогидроаккумулятор; 11, 12, 13, 19 – блок неподвижный; 14, 18 – блок подвижный; 15 – каретка; 16 – каретка; 17 – датчик линейных перемещений; 20, 21, 22, 23, 26, 27 – блок направляющий; 24, 28 – акселерометр; 25, 29 – канифас-блок; 30 – штырь; 31 – выключатель бесконтактный SQ3; 32 – выключатель бесконтактный SQ4; 33 – привод заштыривания; А, Б, В, Г, Д, Е, Ж, И – полость.

Уравнение сил в активном гидроцилиндре может быть записано в виде:

$$F_{\text{И}} = F_f + F_{\text{visc}} + F_{\text{dry}} + F_{\text{дин}}, \quad (1)$$

где $F_{\text{И}} = S_{\text{П}}(P_1 - P_2)$ – индикаторное усилие на штоке активного гидроцилиндра, $S_{\text{П}}$ – эффективная площадь поршня активного гидроцилиндра, P_1 и P_2 – давления в полостях активного гидроцилиндра; F_f – внешнее усилие на штоке (возмущающее воздействие); $F_{\text{visc}} = f_{\text{fr}} v_{\text{ш}}$ – сила вязких трений на штоке, f_{fr} – коэффициент вязких трений, $v_{\text{ш}}$ – скорость перемещения штока активного гидроцилиндра; F_{dry} – сила сухих трений активного гидроцилиндра; $F_{\text{дин}} = M \frac{d}{dt} v_{\text{ш}}$ – динамическая сила на штоке активного гидроцилиндра, M – общая масса подвижных частей активного и пассивного гидроцилиндров [1–3].

При расчетах была учтена сила сухого трения между поршнем и стенками гидроцилиндра, штоком и гидроцилиндром по следующей зависимости

$$F_{\text{тр}} = \pi D l_1 f_{\text{ф}} P, \quad (2)$$

где D, l_1 – диаметр и ширина контактной поверхности колец, см, $f_{\text{ф}}$ – коэффициент трения фторопласта, P – давление рабочей среды, кгс/см² [4, 5].

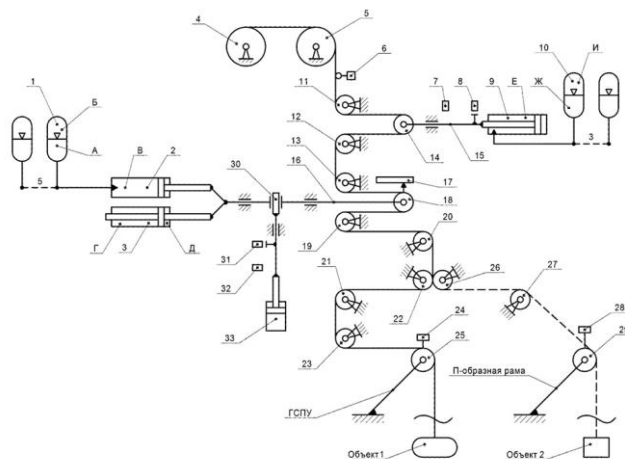


Рис. 1. Система стабилизации подводного объекта

Расчет параметров математической модели, таких как силы сухого трения между поршнем и стенками гидроцилиндра, силы сухого трения между штоком и гидроцилиндром, которые в сумме определяют общую силу сухого трения в активном гидроцилиндре, общей силы сухого трения в пассивном гидроцилиндре, ускорения движения, учет приведенной массы системы блоков и полиспаста, массы подвижных частей активного и пассивного гидроцилиндров был подробно рассмотрен в публикации [6].

Математическая модель системы стабилизации. На основании полученных динамических параметров была спроектирована математическая модель механической части активного гидроцилиндра (рис. 2).

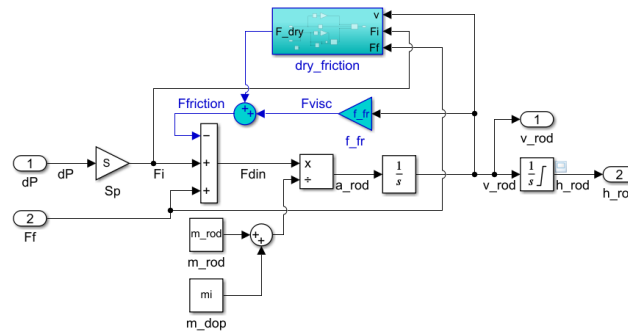


Рис. 2. Математическая модель механической части активного гидроцилиндра

Математическая модель уравнения расходов активного гидроцилиндра вместе с моделью золотникового гидрораспределителя представлены на рисунке (рис. 3).

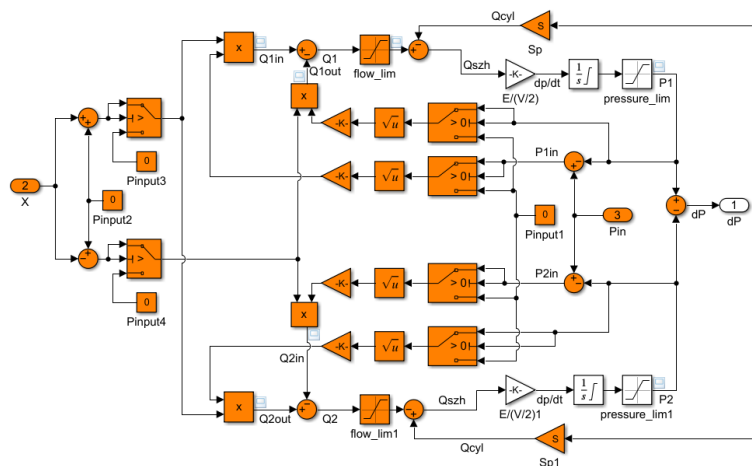


Рис. 3. Модель расходов гидроцилиндра и золотникового распределителя

Математическая модель пневмогидравтеснителя, созданная при условии адиабатического характера процесса (перемещение штоков происходит достаточно быстро [7–12]) представлена на рис. 4.

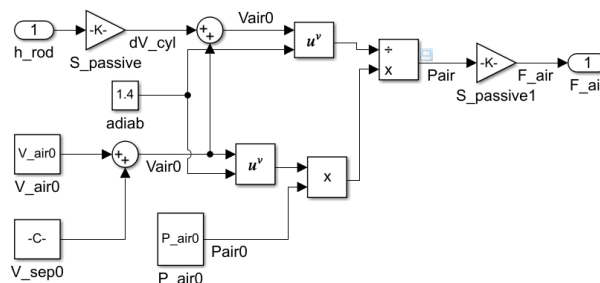


Рис. 4. Модель пневмогидравтеснителя

Нелинейная математическая модель троса, учитывающая растяжение троса при различной нагрузке представлена на рис. 5.

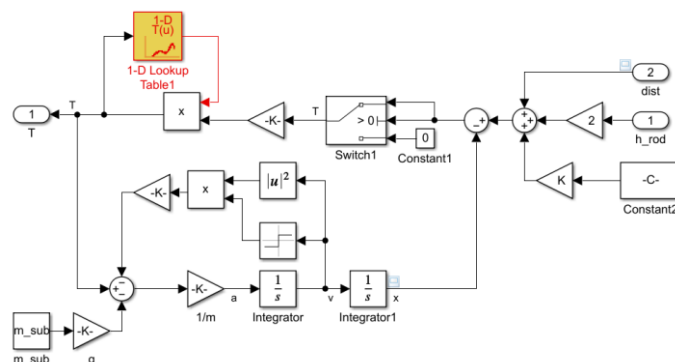


Рис. 5. Модель троса

Передаточная функция гидравлической и механической части гидроцилиндра имеет следующий вид:

$$W_{гц}(s) = \frac{\frac{2E}{V} \cdot \frac{1}{s} \cdot S \cdot W_m(s)}{1 + S \cdot \frac{2E}{V} \cdot \frac{1}{s} \cdot S \cdot W_m(s)} = \frac{169.5}{3.3 \cdot 10^{-4} s^2 + 1.8 \cdot 10^{-7} s + 1}. \quad (3)$$

Поскольку перепад давлений между давлением магистрали питания и давлением в полости гидроцилиндра составляет $\Delta P = 50 \cdot 10^5$ Па (точка линеаризации), то математическая модель линеаризованной системы будет иметь вид, представленный на рис. 6.

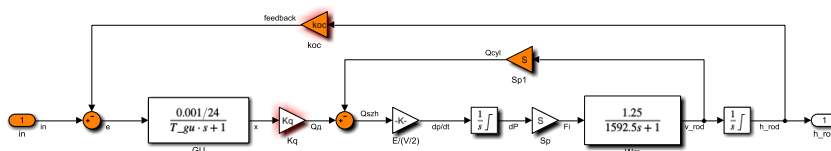


Рис. 6. Модель линеаризованной системы

При синтезе системы управления передаточную функцию гидроцилиндра можно заменить простым коэффициентом усиления [13–16], так как постоянные времени этого звена много меньше остальных постоянных времени. Правомочность такой замены также подтверждается графиками частотных характеристик, представленными на рис. 7, которые отличаются только в высокочастотной области [17].

В качестве регулятора при синтезе системы управления был выбран самый распространенный – ПИД-регулятор. Для определения параметров ПИД-регулятора была найдена упрощенная математическая модель системы, реакция которой на входные воздействия практически не отличается от системы амортизатора. Она имеет следующий вид

$$W(s) = \frac{0.184}{s(0.09s + 1)}. \quad (4)$$

Синтез регулятора. В теории подчиненного регулирования [13] для приведенной передаточной функции объекта управления существует два основных способа настройки [18–21]. Отличительная особенность данной передаточной функции заключается в наличии в самой системе интегрирующего звена. Поэтому первый способ – это синтез ПИ-регулятора, который позволяет скомпенсировать од-

ну, обычно большую постоянную времени. Реализуется такой способ введением рассчитанного П-регулятора. Второй способ – это синтез ПД-регулятора, который позволяет скомпенсировать обе постоянных времени.

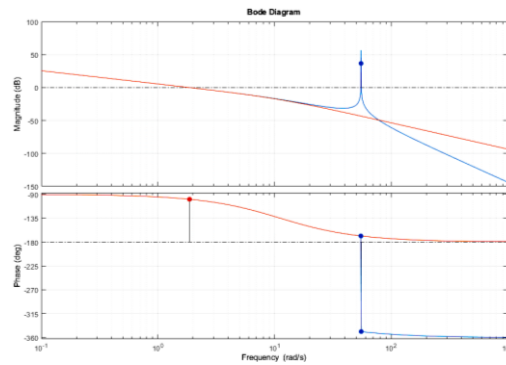


Рис. 7. Частотные характеристики системы

Поскольку синтез и реализация П-регулятора значительно проще и требуется компенсация только одной постоянной времени, то для коррекции системы был выбран П-регулятор. Более того, введение дифференцирующей составляющей негативно сказывается на колебательности давления в полостях активного гидроцилиндра.

При моделировании системы управления выбрано самое сложное возмущающее воздействие, имеющее максимальную амплитуду и частоту $dist(t) = 0.8 \sin 2\pi/5.4$. Модель полученной системы с П-регулятором представлена на рис. 8.

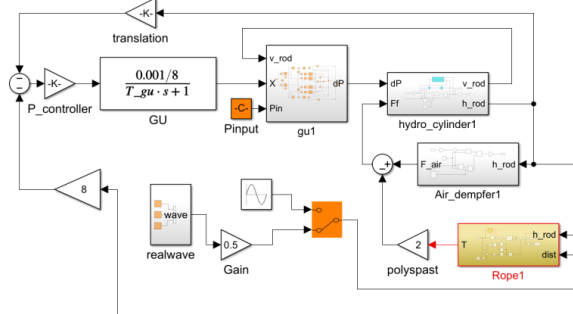


Рис. 8. Модель системы с П-регулятором

Перемещение объекта 1 при моделировании полученной системы управления приведено на рис. 9. На рис. 10 показан график давлений в полостях активного гидроцилиндра.

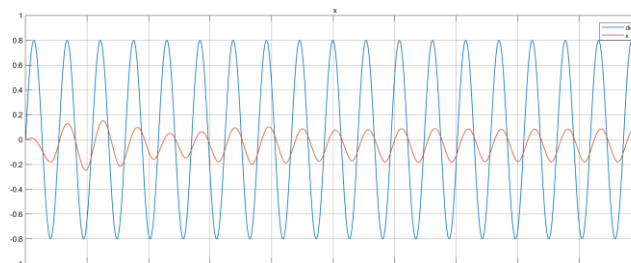


Рис. 9. Результаты моделирования системы с П-регулятором

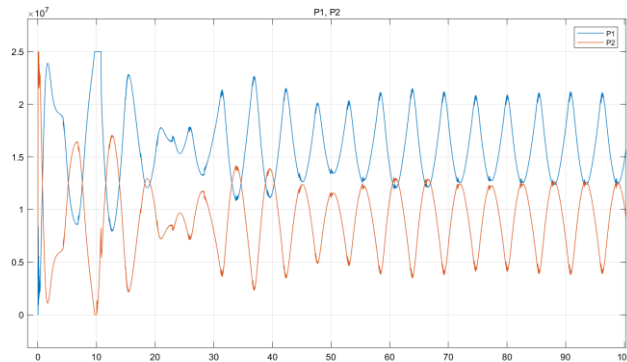


Рис. 10. График давлений в полостях активного гидроцилиндра

Реакция системы на сложное гармоническое колебание приведена на рис. 11.

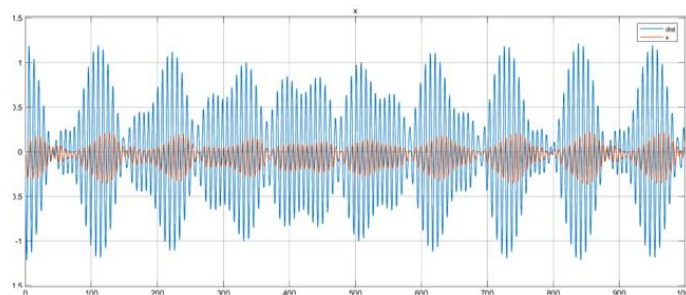


Рис. 11. Результаты моделирования системы с П-регулятором при сложном гармоническом воздействии

Видно, что после завершения переходного процесса объекта 1, колебания его положения не превышают 50 см, что превышает требуемое значение. При этом, колебания при отработке гармонического воздействия постоянной частоты не превышает 15 см. Поэтому необходимо рассмотреть методы повышения инвариантности системы по отношению ко входному сигналу.

Повышение инвариантности системы. Основным методом, используемым при построении инвариантных систем в случае измеримых возмущений, является применение так называемого комбинированного управления, когда, наряду с управлением по отклонению, используется управление по возмущающему воздействию. Идея метода приведена на рис. 12.

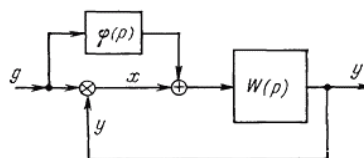


Рис. 12. Идея комбинированного управления

Для получения условия полной инвариантности системы управления, следует принять

$$\varphi(s) = \frac{1}{W(s)}. \quad (5)$$

Модель инвариантной системы представлена на рис. 13.

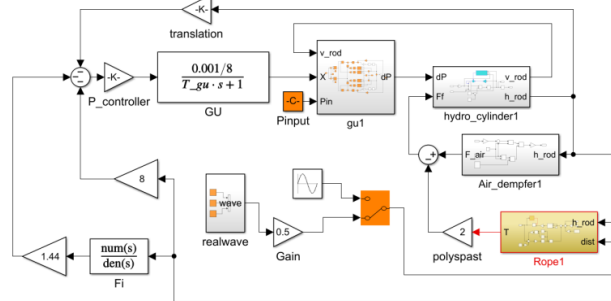


Рис. 13. Модель инвариантной системы

Часто при решении приведенной задачи возникает вопрос физической реализуемости такого корректирующего устройства. Это связано с тем, что у передаточной функции $\varphi(s)$ порядок числителя становится больше знаменателя. Однако в нашем случае в качестве датчика обратной связи применяется акселерометр, который дает сигнал пропорционально второй производной перемещения корабля, и поэтому нет необходимости введения численных вторых производных, и проблем с физической нереализуемостью не возникает.

По результатам моделирования получим графики переходных процессов положения объекта 1 (рис. 14) и давления в полостях активного гидроцилиндра (рис. 15) при сложном гармоническом воздействии. Время моделирования составило 500 с.

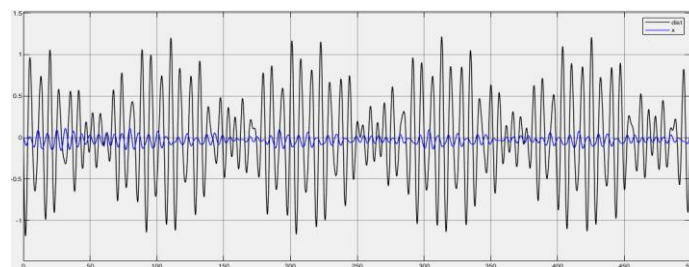


Рис. 14. Результаты моделирования инвариантной системы при сложном гармоническом воздействии

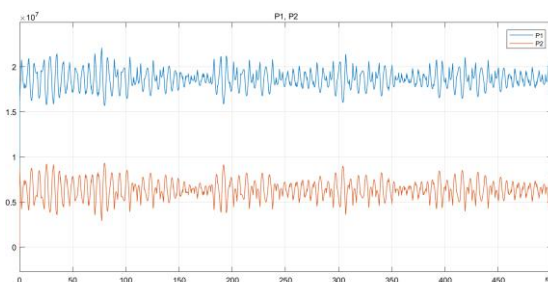


Рис. 15. Давление в полостях активного гидроцилиндра инвариантной системы при сложном гармоническом воздействии

Из рис. 14 видно, что реакция инвариантной системы уже на сложное гармоническое воздействие не превышает 15 см.

$$W(s) = \frac{k_{o6} \cdot k_p}{T_2 s(T_1 s + 1)} = \frac{0.0706 \cdot 2.95}{s(T_{aus} s + 1)} = \frac{0.2083 = K}{s(0.15s + 1)}. \quad (6)$$

Для получения условия полной инвариантности системы управления, следует принять

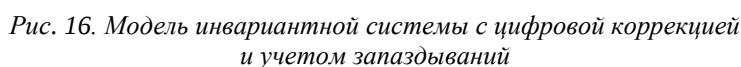
Такое звено является физически нереализуемым, поэтому при моделировании на первом этапе можно ввести в знаменатель колебательное звено 2-го порядка с малой постоянной времени T_d .

Задача цифрового перепроектирования широко освещена в литературе, поэтому перепроектируя по методу Тастина ($s = \frac{2z-1}{T_0z+1}$) получим

При $T_0 = T_d = 0.05, T_{qu} = 0.09$ получим

$k_{fi} = \frac{1}{K} = 4.8$, что значительно. Это связано с тем, что номинальный перепад давления взят $\Delta P = 50$ атм, по факту же перепад может быть больше, особенно при малых массах объекта 1. Поэтому k_{fi} следует уменьшить примерно в 2 раза. В системе подобран коэффициент в 1.44.

Модель инвариантной системы с цифровой коррекцией и учетом запаздываний представлена на рис. 16.



По результатам моделирования получим графики переходных процессов положения объекта 1 (рис. 17) и давления в полостях активного гидроцилиндра (рис. 18) при сложном гармоническом воздействии. Время моделирования составило 500 с.

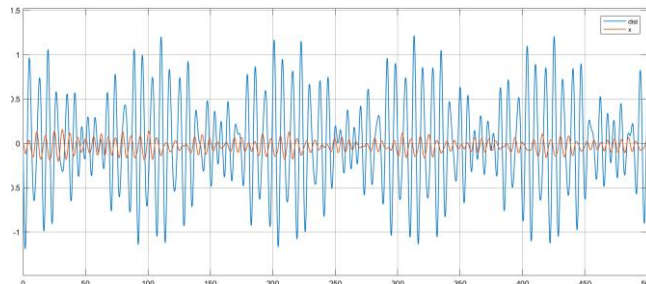


Рис. 17. Результаты моделирования цифровой инвариантной системы при сложном гармоническом воздействии

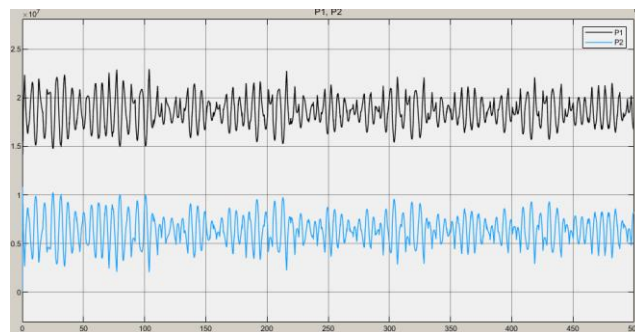


Рис. 18. Давление в полостях активного гидроцилиндра цифровой инвариантной системы при сложном гармоническом воздействии

Закключение. В результате синтеза получена инвариантная система регулирования, причем введение блока компенсации реализуемо, поскольку основным датчиком обратной связи является акселерометр. При этом в контуре главной обратной связи используется корректирующий ПИ-регулятор. Цифровое перепроектирование корректирующих устройств проведено с применением билинейной аппроксимации.

Поскольку гидравлическая система стабилизации подводного объекта отличается наличием задержек по времени, вызванных аналого-цифровым преобразованием, при выборе периода дискретизации цифровой части системы учитывалось время выполнения программы и частота работы датчиков обратной связи.

С учетом изложенных особенностей объекта регулирования в результате разработки удалось получить качественную систему стабилизации, применив при этом достаточно простые и широко распространенные методы цифрового перепроектирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гамынин Н.С. Гидравлический привод систем управления. – М.: Машиностроение, 1972. – 376 с.
2. Тран В.Т., Кориков А.М., Нгуен Т.Т. Моделирование гидравлической системы автоматической стабилизации // Электронные средства и системы управления: Матер. докладов Международной научно-практической конференции. – 2021. – № 1-2. – С. 85-88.
3. Игамбердиев К.А. Математическое моделирование стабилизации гидропривода с нелинейной нагрузкой // Проблемы вычислительной и прикладной математики. – 2019. – № 3 (21). – С. 30-39.

4. Воронов Д.Ю. Гидроцилиндры: учеб.-метод. пособие. – Тольятти: ТГУ, 2011. – 72 с.
5. Pan M., Johnston N., Plummer A. Theoretical and experimental studies of a switched inertance hydraulic system // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*. – Vol. 228, Issue 1. – P. 12-25.
6. Кудрявцев Д.С., Яковлев А.А., Чернусь Петр П., Чернусь Павел П., Сахабудинов Р.В., Голосий А.С. Обеспечение функционирования робототехнической системы «автономный глубоководный аппарат» в режиме активной компенсации качки // Тр. 33-й Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника», 29-30 сентября 2022 г. – СПб.: Изд-во: ЦНИИ РТК, 2022. – С. 295-307.
7. Черный Г.Г. Газовая динамика: учебник для университетов и вузов. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 424 с.
8. Лебедева Н.А. Моделирование колебаний температуры в гидравлической системе с перепуском топлива // *Вопросы науки*. – 2015. – Т. 7. – С. 11-15.
9. Knežević D., Savić V. Mathematical modeling of changing of dynamic viscosity, as a function of temperature and pressure, of mineral oils for hydraulic systems // *Facta universitatis - series: Mechanical Engineering*. – 2006. – Vol. 4, br. 1. – P. 27-34.
10. Helian V., Chen Z., Yao B., Lyu L. Accurate motion control of a direct-drive hydraulic system with an adaptive nonlinear pump flow compensation // *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. – Oct. 2021. – Vol. 26, No. 5. – P. 2593-2603. DOI: 10.1109/TMECH.2020.3043576.
11. Coskun G., Kolcuoglu T., Dogramac T. Analysis of a priority flow control valve with hydraulic system simulation model // *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* – 2017. – Vol. 39. – P. 1597-1605.
12. Рыбак А.Т., Ляхницкая О.В. Моделирование приводов технологических машин с учётом объёмной жёсткости их гидравлических систем // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*. – 2015. – Т. 3, № 9-3 (20-3). – С. 271-276.
13. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 320 с.
14. Колисниченко А.С., Струтинская Е.В. Использование программного пакета Simulink для имитационного моделирования гидравлической системы // *Новые технологии – нефтегазовому региону: Матер. Международной научно-практической конференции*. – 2016. – С. 86-88.
15. Çetin Ş., Akkaya A.V. Simulation and hybrid fuzzy-PID control for positioning of a hydraulic system // *Nonlinear Dynamics*. – 2010. – Vol. 61. – P. 465-476.
16. Chalupa P., Novák J. Modeling and model predictive control of a nonlinear hydraulic system // *Elsevier, Computers & Mathematics with Applications*. – August 2013. – Vol. 66, Issue 2. – P. 155-164.
17. Плыкина Е.В. Цифровой алгоритм управления гидроприводом с золотниковым распределителем // *Техника XXI века глазами молодых ученых и специалистов*. – 2020. – № 18. – P. 166-174.
18. Нечаев Ю.М., Никущенко Д.В. Нечеткая формальная система управления моделированием нестационарной динамики подводных объектов // *XXIII Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям*. – 2020. – Т. 1. – С. 174-176.
19. Shi Z., Gu F., Lennox B., Ball A.D. The development of an adaptive threshold for model-based fault detection of a nonlinear electro-hydraulic system // *Control Engineering Practice*. – November 2005. – Vol. 13, Issue 11. – P. 1357-1367.
20. Huang K., Wu S., Li F., Yang C. Fault diagnosis of hydraulic systems based on deep learning model with mutilate data samples // *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. – November 2022. – Vol. 33, Issue 11.
21. Feng H., Yin C., Ma W., Yu H., Cao D. Parameters identification and trajectory control for a hydraulic system // *ISA Transactions*. – September 2019. – Vol. 92. – P. 228-240.

REFERENCES

1. Gamynin N.S. *Gidravlicheskiy privod sistem upravleniya* [Hydraulic drive of control systems]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1972, 376 p.
2. Tran V.T., Korikov A.M., Nguen T.T. *Modelirovanie gidravlicheskoj sistemy avtomaticheskoy stabilizatsii* [Modeling of the hydraulic system of automatic stabilization], *Elektronnye sredstva i sistemy upravleniya: Mater. dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Electronic means and control systems: Materials of reports of the International scientific-practical conference], 2021, No. 1-2, pp. 85-88.

3. Igamberdiev K.A. Matematicheskoe modelirovanie stabilizatsii gidroprivoda s nelineynoy nagruzkoy [Mathematical modeling of the stabilization of a hydraulic drive with a nonlinear load], *Problemy vychislitel'noy i prikladnoy matematiki* [Problems of Computational and Applied Mathematics], 2019, No. 3 (21), pp. 30-39.
4. Voronov D.Yu. Gidrotsilindry: ucheb.-metod. posobie [Hydraulic cylinders: textbook-method. Allowance]. Tol'yatti: TGU, 2011, 72 p.
5. Pan M., Johnston N., Plummer A. Theoretical and experimental studies of a switched inertance hydraulic system, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, Vol. 228, Issue 1, pp. 12-25.
6. Kudryavtsev D.S., Yakovlev A.A., Chernus' Petr P., Chernus' Pavel P., Sakhabudinov R.V., Golosiy A.S. Obespechenie funktsionirovaniya robototekhnicheskoy sistemy «avtonomnyy glubokovodnyy apparat» v rezhime aktivnoy kompensatsii kachki [Ensuring the functioning of the robotic system "autonomous deep-sea vehicle" in the mode of active roll compensation], *Tr. 33-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Ekstremal'naya robototekhnika», 29-30 sentyabrya 2022 g.* [Proceedings of the 33rd International Scientific and Technical Conference "Extreme Robotics", September 29-30, 2022]. St. Petersburg: Izd-vo: TSNII RTK, 2022, pp. 295-307.
7. Chernyy G.G. Gazovaya dinamika: uchebnik dlya universitetov i vtuzov [Gas dynamics: A textbook for universities and colleges]. Moscow: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit., 1988, 424 p.
8. Lebedeva N.A. Modelirovanie kolebaniy temperatury v gidravlicheskoj sisteme s perepuskom topliva [Modeling of temperature fluctuations in a hydraulic system with fuel bypass], *Voprosy nauki* [Questions of science], 2015, Vol. 7, pp. 11-15.
9. Knežević D., Savić V. Mathematical modeling of changing of dynamic viscosity, as a function of temperature and pressure, of mineral oils for hydraulic systems, *Facta universitatis - series: Mechanical Engineering*, 2006, Vol. 4, br. 1, pp. 27-34.
10. Helian V., Chen Z., Yao B., Lyu L. Accurate motion control of a direct-drive hydraulic system with an adaptive nonlinear pump flow compensation, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Oct. 2021, Vol. 26, No. 5, pp. 2593-2603. DOI: 10.1109/TMECH.2020.3043576.
11. Coskun G., Kolcuoglu T., Dogramac T. Analysis of a priority flow control valve with hydraulic system simulation model, *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, 2017, Vol. 39, pp. 1597-1605.
12. Rybak A.T., Lyakhnitskaya O.V. Modelirovanie privodov tekhnologicheskikh mashin s uchedom ob'emnoy zhestkosti ikh gidravlicheskikh sistem [Modeling of drives of technological machines taking into account the volumetric rigidity of their hydraulic systems], *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice], 2015, Vol. 3, No. 9-3 (20-3), pp. 271-276.
13. German-Galkin S.G. Komp'yuternoe modelirovanie poluprovodnikovyykh sistem v MATLAB 6.0 [Computer modeling of semiconductor systems in MATLAB 6.0]. St. Petersburg: KORONA print, 2001, 320 p.
14. Kolisnichenko A.S., Strutinskaya E.V. Ispol'zovanie programmnoy paketa Simulink dlya imitatsionnogo modelirovaniya gidravlicheskoy sistemy [Using the Simulink software package for hydraulic system simulation], *Novye tekhnologii – neftegazovomu regionu: Mater. Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [New technologies for the oil and gas region. materials of the International scientific-practical conference], 2016, pp. 86-88.
15. Çetin Ş., Akkaya A.V. Simulation and hybrid fuzzy-PID control for positioning of a hydraulic system, *Nonlinear Dynamics*, 2010, Vol. 61, pp. 465-476.
16. Chalupa P., Novák J. Modeling and model predictive control of a nonlinear hydraulic system, *Elsevier, Computers & Mathematics with Applications*, August 2013, Vol. 66, Issue 2, pp. 155-164.
17. Plykina E.V. Tsifrovoy algoritm upravleniya gidroprivodom s zolotnikovym raspredelitelem [Digital control algorithm for a hydraulic drive with a spool valve], *Tekhnika XXI veka glazami molodykh uchenykh i spetsialistov* [Technology of the XXI century through the eyes of young scientists and specialists], 2020, No. 18, pp. 166-174.
18. Nechaev Yu.M., Nikushchenko D.V. Nechetkaya formal'naya sistema upravleniya modelirovaniem nestatsionarnoy dinamiki podvodnykh ob"ektov [Fuzzy formal control system for modeling the unsteady dynamics of underwater objects], *XXIII Mezhdunarodnaya konferentsiya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam* [XXIII International Conference on Soft Computing and Measurements], 2020, Vol. 1, pp. 174-176.
19. Shi Z., Gu F., Lennox B., Ball A.D. The development of an adaptive threshold for model-based fault detection of a nonlinear electro-hydraulic system, *Control Engineering Practice*, November 2005, Vol. 13, Issue 11, pp. 1357-1367.

20. Huang K., Wu S., Li F., Yang C. Fault diagnosis of hydraulic systems based on deep learning model with mutilate data samples, *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, November 2022, Vol. 33, Issue 11.
21. Feng H., Yin C., Ma W., Yu H., Cao D. Parameters identification and trajectory control for a hydraulic system, *ISA Transactions*, September 2019, Vol. 92, pp. 228-240.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.П. Ковалев.

Чернусь Петр Павлович – БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова; e-mail: petr.chernus@yandex.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +78124900518; к.т.н.; доцент.

Чернусь Павел Павлович – e-mail: pavel.chernus@yandex.ru; тел.: +78124900518; к.т.н.; доцент.

Яковлев Александр Анатольевич – АО «Конструкторское бюро «Арсенал» им. М.В. Фрунзе; e-mail: aa.yakovlev@kbarsenal.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79052500726; к.т.н.; начальник управления.

Сахабудинов Роман Владиславович – e-mail: srv@kbarsenal.ru; тел.: +79211852881; к.т.н.; коммерческий директор.

Голосий Александр Сергеевич – e-mail: as.golosiy@kbarsenal.ru; тел.: +79213025903; к.т.н.; советник.

Chernus Peter Pavlovich – BSTU "VOENMEH" D.F. Ustinova; e-mail: petr.chernus@yandex.ru; Saint Petersburg, Russia; phone: +78124900518; cand. of eng. sc; associate professor.

Chernus Pavel Pavlovich – e-mail: pavel.chernus@yandex.ru; phone: +78124900518; cand. of eng. sc; associate professor.

Yakovlev Aleksandr Anatolievich – Arsenal Design Bureau JSK; e-mail: aa.yakovlev@kbarsenal.ru; Saint Petersburg, Russia; phone: +79052500726; cand. of eng. sc; head of department.

Sakhbudinov Roman Vladislavovich – e-mail: srv@kbarsenal.ru; phone: +79211852881; cand. of eng. sc; commercial director.

Golosiy Aleksandr Sergeevich – e-mail: as.golosiy@kbarsenal.ru; phone: +79213025903; cand. of eng. sc.; adviser.

УДК 629.3.051

DOI 10.18522/2311-3103-2023-1-31-40

И.А. Шипов, Е.В. Ветошкин

ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПЛЕКСИРОВАННОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НАЗЕМНОГО ОБЪЕКТА

Цель работы – создание эффективной программно-аппаратной модели навигационной системы наземного подвижного объекта. Процесс моделирования является одним из ключевых инструментов, позволяющих проводить отработку технических решений на всех этапах жизненного цикла сложной технической системы. В процессе проектирования комплексированных инерциальных систем возникает ряд научно-технических задач, эффективность решения которых зависит от степени их отработки. Моделирование – один из вариантов апробации технических решений. В статье приведено описание решения задачи моделирования комплексированной инерциальной навигационной системы наземного объекта. Модель навигационной системы, описанная в данной работе, является программно-аппаратной и реализована в виде программных модулей, поддерживающих аппаратное взаимодействие друг с другом. Описанная система моделирования навигационной системы наземного объекта была разработана в рамках ряда опытно-конструкторских и научно-исследовательских работ. Сформированная модель навигационной системы наземного подвижного объекта включает в себя несколько про-

граммных блоков, каждый из которых имитирует функционирование реального изделия с достаточным уровнем достоверности. Внутренние и внешние интерфейсы взаимодействия, протоколы обмена навигационной системы также промоделированы с соблюдением циклограмм работы реального объекта. При этом одним из основных преимуществ программного моделирования перед стендовой отработкой или макетированием является возможность проведения глубокого анализа алгоритмов функционирования без задействования дополнительных ресурсов. Однако для обеспечения соответствия процедуры моделирования реальному функционированию зачастую требуется проектирование программно-аппаратных средств. Процедура моделирования архитектуры навигационной системы позволяет провести сравнительный анализ нескольких вариантов набора базовых компонентов и схем их взаимодействия. Результатом такого сравнения является оптимальная структура, позволяющая обеспечить потребителя навигационной информацией с наибольшей эффективностью. В статье определены основные задачи процесса моделирования. При проектировании сложной технической системы этап моделирования может стать критически важным для достижения оптимального результата. Предложенная структура, перечень ключевых элементов системы моделирования наземной навигации и подходы организации взаимосвязи между ними были апробированы в рамках нескольких опытно-конструкторских работ. При этом было определено, что достоверность разработанных моделей и их соответствие моделируемым блокам позволяет производить анализ навигационных систем с высоким уровнем объективности. Разработанная программно-аппаратная модель позволила провести обработку записей телеметрии, полученных при различных условиях эксплуатации изделий, провести анализ и выработать технические решения, повышающие эффективность функционирования навигационных систем.

Моделирование; навигационная система; программное моделирование; математическая модель; техническая реализация.

I.A. Shipov, E.V. Vetoshkin

HARDWARE-IN-THE-LOOP SIMULATION OF AN INTERCONNECTED INERTIAL NAVIGATION SYSTEM OF A GROUND OBJECT

The purpose of this paper is creation of an efficient software and hardware model of a ground mobile object navigation system. Simulation process is one of the key instruments for engineering solutions development at all stages of a complex technical system lifecycle. Navigation system model described in this paper is software-hardware by nature and is implemented as software modules that support hardware interaction with each other. The described system of ground object navigation system simulation has been developed in the course of several design projects and scientific research works. The developed model of a ground mobile object navigation system includes several programming units. Each of these units simulates the operation process as close as possible to the original. Internal and external interaction interfaces and navigation system communication protocols are also simulated with the account for real object operation cyclograms. It should be noted that one of the main advantages of a software simulation over a developmental testing or breadboarding is the opportunity to perform a profound analysis of operation algorithms without the use of any additional resources. At the same time, it is often necessary to perform firmware design in order to make the simulation process identical with the real operation. The process of navigation system architecture simulation allows performing a comparative analysis of several base components sets and their interaction patterns. Such comparison results in an optimal system structure providing the information user with navigation data in the most efficient way. The paper determines basic simulation process tasks. The simulation stage may become crucial for complex systems design as it may aid achieving the best technical result. The proposed structure, key elements of a ground navigation simulation system and approaches to their interaction arrangement have been approved in the course of several research and development works. At the same time, it was found that the validity of developed models and their compliance to simulated units allows performing a highly reliable navigation system analysis. The developed software-hardware model allowed processing telemetry records obtained under different product operation conditions, performing their analysis and developing engineering solutions that increase the efficiency of navigation systems.

Simulation; navigation system; software simulation; mathematical model; engineering implementation.

Введение. Программно-аппаратное моделирование является эффективным инструментом при проектировании наземных объектов и отработке технических решений на уровне их подсистем. При этом значимость этапа моделирования возрастает вместе со сложностью структуры и расширением набора функциональных задач изделия. Также пропорционально сложности системы возрастает и сложность разработки ее эквивалента.

Цель данного исследования – формирование облика и программно-алгоритмических решений в области моделирования комплексированной инерциальной навигационной системы. Для достижения поставленной были решены задачи:

- ♦ сформулирована концепция программно-аппаратной модели комплексированной инерциальной системы;
- ♦ разработаны алгоритмы функционирования и внутреннего взаимодействия модулей;
- ♦ разработаны программные модули;
- ♦ спроектированы аппаратные решения, обеспечивающие необходимый уровень детализации.

Навигационная система наземного объекта (НС) как сложная техническая система может быть представлена в виде программно-аппаратной модели. При ее проектировании необходимо учитывать особенности функционирования, внутреннюю структуру и каналы взаимодействия элементов, циклограмму функционирования и ряд других особенностей. Построение объективной программно-аппаратной модели системы навигации позволит проводить отработку как внутренних алгоритмов функционирования, так и взаимодействия в составе объекта. Учитывая ключевую роль навигационной информации в контуре системы управления наземного объекта, программная модель НС может быть использована на различных этапах ее проектирования.

Роль моделирования. Учитывая значительную стоимость и длительность закупки электронных компонентов, уровень сложности проектирования современных аппаратных средств на отечественной элементной базе [1–4] и необходимость проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в кратчайшие сроки, можно сделать вывод, что имитационное моделирование является одним из важнейших этапов разработки навигационной системы. Создание математических и программных моделей может существенно снизить риски конструктивных дефектов при одновременном сокращении длительности проектирования. Экономическая целесообразность проведения процедуры моделирования заключается в том, что эффект от улучшения модели должен быть больше, чем связанные с его разработкой затраты. Ключевым фактором применения разработанных моделей также является уровень их достоверности, который, как правило, обратно пропорционален ущербу от их использования.

На рис. 1 иллюстративно изображены кривые затрат на проведение моделирования, ущерба от использования модели и суммарная кривая, показывающая условные границы предела целесообразности ее уточнения [5].

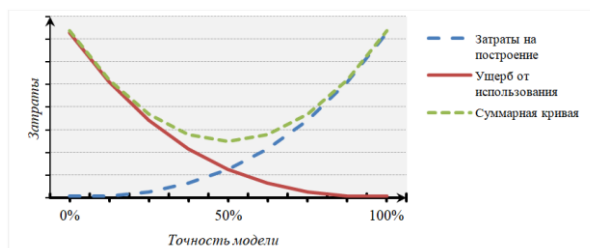


Рис. 1. Сопоставление затрат на моделирование

Применительно к навигационной системе средствами моделирования могут быть отработаны:

- ◆ алгоритмы решения задачи ориентирования;
- ◆ алгоритмы и протоколы внутреннего взаимодействия;
- ◆ алгоритмы определения местоположения объекта в различных режимах;
- ◆ временная циклограмма работы.

Также могут быть скорректированы основные функции НС с учетом специфики ее применения, и определен облик системы в целом.

Процесс моделирования навигационной системы наземных объектов можно разделить на два основных типа:

- ◆ моделирование архитектуры;
- ◆ моделирование поведения.

Проведение моделирования архитектуры НС позволяет сформировать облик будущей навигационной системы [6] с учетом типовых особенностей каждого структурного элемента [7, 8]. При этом разрабатываемая модель может иметь более детальную проработку на уровне взаимодействия элементов, но иметь обобщенный вид в части алгоритмов их функционирования. Для проведения объективного сравнительного анализа вариантов архитектуры разрабатываемой НС должен быть сформирован перечень критериев с учетом ранжирования по значимости. Стоит отметить, что процедура определения приоритетов критериев, как правило, носит экспертный характер.

Моделирование навигационной системы. Эффективность моделирования поведения навигационной системы зависит от полноты реализации функций используемых моделей. Немаловажную роль играет реализация имитации взаимосвязей между элементами с учетом привязки к единой шкале времени [9, 10].

Процесс создания программно-аппаратного комплекса моделирования делится на несколько этапов. На начальном этапе были спроектированы программные модули, являющиеся эквивалентами всех ключевых элементов типовой структуры НС. На следующем этапе были разработаны аппаратные решения, обеспечивающие их взаимодействие друг с другом и возможность встраивания при стендовой отработке.

Впоследствии спроектированные модули были объединены в единый программно-аппаратный комплекс, который состоит из следующих основных элементов:

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

Набор элементов был определен исходя из принципа обеспечения проведения глубокого анализа функционирования как системы в целом, так и отдельных ее элементов.

В связи с тем, что проектируемый программно-аппаратный комплекс моделирования должен поддерживать возможность взаимодействия с аппаратными средствами, было принято решение о разработке каждого модуля как полноценного исполняемого файла, написанного на языке C++.

Одним из ключевых требований к проектируемым модулям являлась реализация возможности встраивания в контур штатной структуры НС без дополнительных доработок. Таким образом, должно быть реализовано программное и аппаратное соответствие программных протоколов и аппаратных интерфейсов информационного взаимодействия всех элементов.

Модуль имитации инерциальной системы ориентирования (ИСО) может как взаимодействовать с аппаратным блоком чувствительных элементов по каналам информационного взаимодействия, так и моделировать функционирование по унифицированным записям телеметрии, полученным при различных условиях эксплуатации.

Наличие функции работы с файлами данных делает возможным анализ алгоритмов функционирования ИСО, построенных на чувствительных элементах различного типа, а также повышает эффективность анализа модели компенсации систематических погрешностей и фильтрации первичной информации [11–13]. Экранная форма управления основными режимами работы модели ИСО изображена на рис. 2.

При этом во всех режимах работы модуля происходит индикация, в том числе в виде графической информации, и фиксирование в файл промежуточных параметров функционирования. Пример экранной формы изображен на рис. 3.

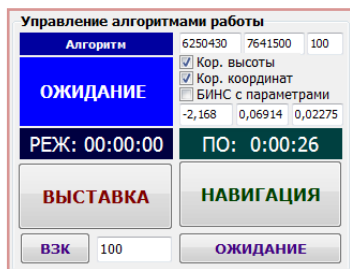


Рис. 2. Экранная форма управления режимами ИСО

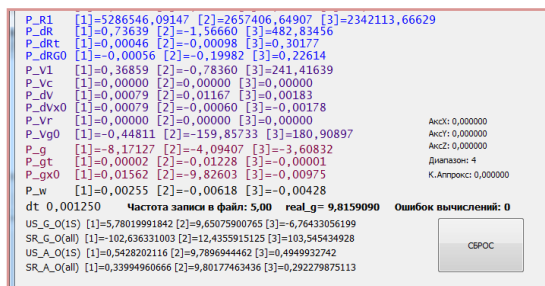


Рис. 3. Экранная форма промежуточных параметров функционирования инерциальной системы

Функция коррекции переменных предназначена для моделирования поведения НС в случае возникновения нештатных ситуаций.

В рамках программно-аппаратного комплекса реализована возможность воспроизведения сценариев функционирования. В связи с этим одним из возможных подходов к расширению функционала модели в целом является накопление базы статистических данных. Так, например, модуль имитации аппаратуры спутниковой навигации позволяет воспроизводить треки движения, полученные во время эксплуатации наземного объекта, отслеживать пропадание сигналов и имитировать работу алгоритмов компенсации погрешностей [14]. На рис. 4 представлена экранная форма генерирования сигналов спутниковой навигации [15]. Модуль поддерживает взаимодействие по штатным протоколам с формированием признаков работы спутниковой аппаратуры, работу в нескольких системах координат.

Функция задания пункта назначения позволяет осуществлять передачу данных, формируемых спутниковой аппаратурой при движении по маршруту между двумя и более точками.

Данный модуль также позволяет работать с электронными картами местности (рис. 5). Реализованы функции масштабирования, наложения маршрутов, корректировки коэффициентов, нанесения контрольных точек и ряд других. Поддерживается загрузка потоковых файлов данных стандартных протоколов обмена спутниковой аппаратуры.

Реализована поддержка растровых карт из общедоступных источников с возможностью их адаптации и масштабирования по контрольным точкам.

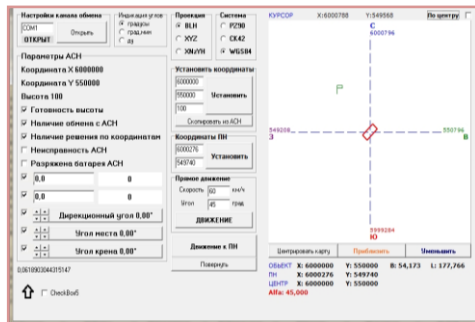


Рис. 4. Структура вычислителя инерциальной навигационной системы

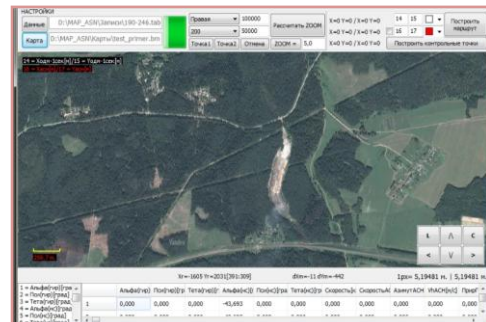


Рис. 5. Экранная форма работы с цифровой картой местности

На рис. 6 изображена экранная форма модуля имитации инерциальной системы ориентирования. Циклограмма работы выполнена в строгом соответствии штатной системе. При этом оператор может в оперативном режиме менять параметры и создавать исключительные ситуации для отработки сценариев поведения потребителя навигационного решения.

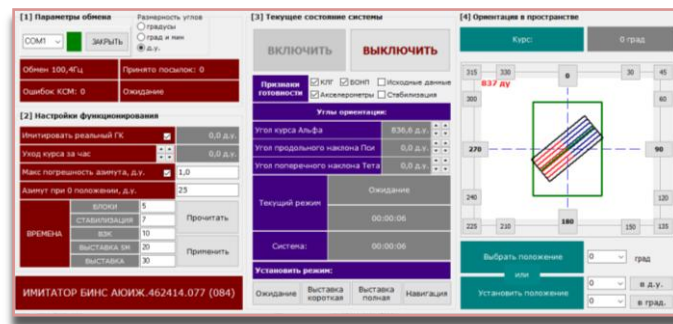


Рис. 6. Модуль имитации инерциальной системы ориентирования

Еще одним ключевым элементом навигационной системы наземного объекта является датчик сигналов скорости. В рамках работы были разработаны программно-аппаратные модели двух типов датчиков. На рис. 7 изображена экранная форма механического датчика скорости. Данный модуль выполнен в форме программно-аппаратного решения и способен формировать исходящие аналоговые сигналы. Использование модуля имитации сигналов скорости исключает необходимость использования реального прибора и снижает нагрузку стендового оборудования.

Разработанный программно-аппаратный модуль имитации доплеровского датчика скорости позволяет осуществлять отработку алгоритмов автономного счисления координат и комплексирования без использования реального прибора. При этом оператор может задавать скорость движения, необходимую дистанцию, направление движения и другие параметры. Экранная форма управления изображена на рис. 8.

Данный модуль позволяет провести отработку алгоритма работы навигационной системы наземного объекта с «эталонной» путевой системой. Таким образом, могут быть отработаны алгоритмические решения без учета ряда источников погрешностей.

Программные модули одометрических датчиков в сочетании с имитацией аппаратуры спутниковой навигации обеспечивают возможность проведения исследований в области создания эффективных алгоритмов комплексирования при различных условиях эксплуатации.

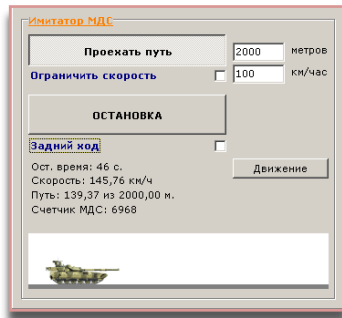


Рис. 7. Экранная форма модуля имитации механического датчика скорости



Рис. 8. Экранная форма модуля имитации доплеровского датчика скорости

На рис. 9 представлена обобщенная схема [16, 17] взаимодействия разработанных модулей, входящих в единую систему моделирования навигационной системы наземного подвижного объекта. Внутренние и внешние протоколы взаимодействия соответствуют штатным, поэтому любой из элементов может быть заменен на штатный прибор, а любой имитационный модуль может быть встроен в штатную систему [18–20].

При этом на каждом этапе формирования навигационного решения могут быть зафиксированы промежуточные данные расчета для дальнейшего анализа в виде файлов.

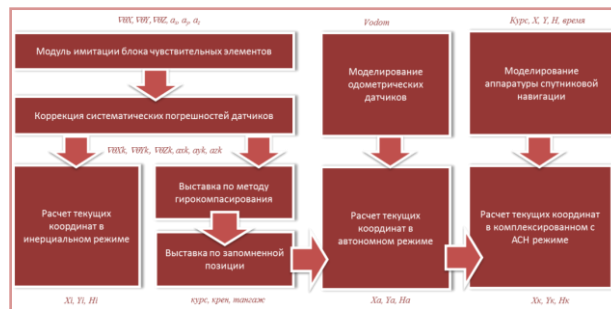


Рис. 9. Схема взаимодействия имитационных программных модулей

Для обеспечения полноты набора инструментов анализа и отработки алгоритмов работы НС, а также воспроизведения условий их эксплуатации в составе программно-аппаратного комплекса моделирования предусмотрен модуль взаимодействия со стендовым оборудованием. На данный момент реализована поддержка трехосных, двухосных стенов моделирования движения и климатических камер.

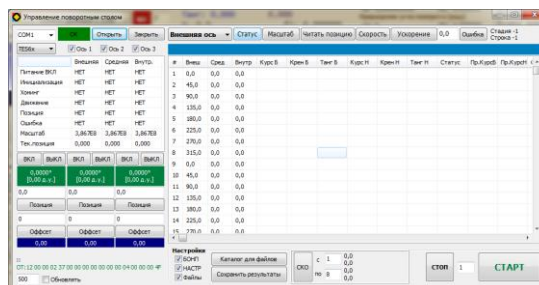


Рис. 10. Экранная форма модуля управления стендом имитации движения

Экранная форма формирования сценария работы стенда моделирования движения представлена на рис. 10. Данный модуль может взаимодействовать с другими компонентами программно-аппаратного комплекса и осуществлять управление режимами их работы.

Заключение. Учитывая сложность и специфику построения навигационной системы наземного объекта, можно выделить следующие основные задачи программно-аппаратного моделирования:

- ♦ отработка алгоритмов определения углов ориентирования и компенсации систематических погрешностей датчиков;
- ♦ отработка алгоритмов автономной, комплексированной и инерциальной навигации;
- ♦ моделирование поведения систем по записям телеметрии в реальных условиях эксплуатации;
- ♦ гибкая модульная структура обеспечивает применение в нескольких работах;
- ♦ взаимодействие со стендовым оборудованием, в том числе со стендами моделирования движения;
- ♦ функционирование как с использованием реальных приборов, так и по записям телеметрии.

В рамках проведенного исследования была определена концепция программно-аппаратной модели комплексированной инерциальной навигационной системы, проведена ее разработка и апробация.

Основные перспективы развития разработанного комплекса моделирования заключаются в расширении набора протоколов взаимодействия со стендовым оборудованием, а также в поддержке файлов записей телеметрии. При этом к основным направлениям можно отнести:

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

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Шипов И.А.* Реализация распределенных вычислений на отечественных микропроцессорных устройствах // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – №1 (225). – С. 218-226.
2. *Белов А.В.* Конструирование устройств на микроконтроллерах. – СПб.: Наука и Техника, 2005. – 256 с.
3. *Vincent Mahout.* Assembly Language Programming: Arm Cortex-M3, 2011.
4. *Алямов А.Э., Баласов И.Ю., Бажанов В.А.* Импортзамещение электронной компонентной базы в оборонном производстве // Всероссийский экономический журнал ЭКО. – 2015. – № 11 (497). – С. 19-29.
5. *Systems Engineering Handbook, version 2a.* INCOSE, 2004.
6. *Шипов И.А., Ветошкин Е.В.* Комплексированная навигация наземных робототехнических комплексов // Робототехника и техническая кибернетика. – 2021. – Т. 9, № 2 (225). – С. 127-132.

7. Брозуль Л.И., Зайцев А.В. Состояние и перспективы развития инерциальных навигационных систем // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2006. – № 3.
8. Шупов И.А., Ветошкин Е.В., Морозов А.В. «Интегрированные инерциально-спутниковые системы наземных робототехнических комплексов» // Сб. трудов XXXII конференции памяти Н.Н. Острякова в направлении «Гироскопические и интегрированные инерциально-спутниковые системы».
9. Васильев К.К., Аникин А.А. Калмановское комплексирование и моделирование навигационных систем // Электронная техника: Межвузовский сборник научных трудов / под ред. Д.В. Андреева. – Ульяновск: УлГТУ, 2005.
10. Stallings W. Operating Systems: Internals and Design Principles. – Seventh ed. – Prentice Hall, 2011.
11. Grewal M., Henderson V., Miyasako R. Application of Kalman filtering to the calibration and alignment of inertial navigation systems/M. Grewal // IEEE Transactions, Automatic Control. – 1991. – Vol. 36.
12. Белочкин П.Е., Кацай Д.А. Особенности моделирования бесплатформенной системы ориентации по уравнениям Эйлера в среде Matlab и Mathcad // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 5. – С. 18-20.
13. Жидкова Н.В., Волков В.Л. Моделирование бесплатформенной системы ориентации. // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1. – URL <http://www.science-education.ru/121-17099>.
14. Tel G. Introduction to Distributed Algorithms. Second edition. – Cambridge University Press, 2000.
15. Tranquilla J.M., Cam J.P., Al-Rizzo H.M. Analysis of a Choke Ring Groundplane for Multipath Control in Global Positioning System (GPS) Applications // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1994. – Vol. 42, No. 7. – P. 905-911. – DOI: <https://doi.org/10.1109/8.299591>.
16. Матвеев В.В., Распопов В.Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / под ред. В.Я. Распопова. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электрон», 2009. – 280 с.
17. Volkov V.L. Mathematical modeling of inertial measurement systems // International Journal of Applied and Fundamental Research. – 2015. – № 2. – URL: www.science-sd.com/457-24631.
18. Woodman O.J. An introduction to inertial navigation // Technical reports published by the University of Cambridge Computer Laboratory are freely available via the Internet. – 37 p. – <http://www.cl.cam.ac.uk/techreports/> 2007.
19. Bilich A., Larson K. M., Axelrad P. SNR-Based Multipath Corrections to GPS Phase Measurements: Improving the Accuracy of Permanent GPS Stations // AGU Fall Meeting Abstracts. – 2002. – Vol. 1. – P. 06.
20. Филиппов С.И., Матахин В.В., Шупов И.А., Петров А.В. Применение методик и инструментов системной инженерии при создании систем наземной навигации // Оборонная техника. – 2017. – № 7-8. – С. 38-44.

REFERENCES

1. Shipov I.A. Realizatsiya raspredelennykh vychisleniy na otechestvennykh mikroprotssessomykh ustroystvakh [Implementation of distributed computing on domestic microprocessor devices], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 1 (225), pp. 218-226.
2. Belov A.V. Konstruirovaniye ustroystv na mikrokontrollerakh [Designing devices on microcontrollers], *Nauka i tekhnika* [Science and Technology]. Saint Petersburg, 2005, 256 p.
3. Vincent Mahout Assembly Language Programming: Arm Cortex -M3, 2011.
4. Alyamov A.E., Balasov I.Yu., Bazhanov V.A. Importozameshchenie elektronnoy komponentnoy bazy v oboronnom proizvodstve [Import substitution of electronic components in the production of defense], *Vserossiyskiy ekonomicheskii zhurnal EKO* [All-Russian ECO Journal], 2015, No. 11 (497), pp. 19-29.
5. Systems Engineering Handbook, version 2a. INCOSE, 2004.
6. Shipov I.A., Vetoshkin E.V. Kompleksirovannaya navigatsiya nazemnykh robototekhnicheskikh kompleksov [Integrated navigation of unmanned ground vehicles], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and Technical Cybernetics], 2021, Vol. 9, No. 2 (225), pp. 127-132.
7. Brozgul L.I., Zaytsev A.V. Sostoyanie i perspektivy razvitiya inertsial'nykh navigatsionnykh sistem [The state and development prospects of inertial navigation systems], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2006, No. 3.

8. Shipov I.A., Vetoshkin E.V., Morozov A.V. Integrirovannye inertsial'no-sputnikovye sistemy nazemnykh robototekhnicheskikh kompleksov [Integrated inertial satellite systems of ground-based robotic complexes], *Sbornik trudov XXXII konferentsii pamyati N.N. Ostryakova v napravlenii "Giroskopicheskie i integrirovannye inertsial'no-sputnikovye sistemy"* [Proceedings of the XXXIIth Conference in Memory of N.N. Ostryakov in the Field of Gyroscopic and Integrated Inertial Satellite Systems].
9. Vasil'ev K.K., Anikin A.A. Kalmanovskoe kompleksirovanie i modelirovanie navigatsionnykh sistem [Kalman complexation and navigation systems simulation], *Electronnaya tekhnika: Mezhevuzovskiy sbornik nauchnykh trudov, pod red. D.V. Andreeva, Ulyanovsk: UIGTU* [Electronic Technology: Interuniversity Collection of Scientific Papers], ed. by D.V. Andreev. Ulyanovsk: UISTU, 2005.
10. Stallings W. Operating Systems: Internals and Design Principles. Seventh Edition. Prentice Hall, 2011.
11. Grewal M., Henderson V., Miyasako R. Application of Kalman Filtering to the Calibration and Alignment of Inertial Navigation Systems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1991, Vol. 36.
12. Belochkin P.E., Katsay D.A. Osobennosti modelirovaniya besplatformennoy sistemy orientatsii po uravneniyam Eylera v srede Matlab i Mathcad [Features of strapdown orientation system simulation using Euler equations in Matlab and Mathcad], *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern High Technologies], 2014, No. 5, pp. 18-20.
13. Zhidkova N.V., Volkov V.L. Modelirovanie besplatformennoy sistemy orientatsii [Modeling of a strapdown system of orientation], *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern Problems of Science and Education], 2015, No. 1. Available at: <http://www.science-education.ru/121-17099>.
14. Tel G. Introduction to Distributed Algorithms. Second ed. Cambridge University Press, 2000.
15. Tranquilla J.M., Cam J.P., Al-Rizzo H.M. Analysis of a Choke Ring Groundplane for Multipath Control in Global Positioning System (GPS) Applications, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1994, Vol. 42, No. 7, pp. 905-911. DOI: <https://doi.org/10.1109/8.299591>.
16. Matveev V.V., Raspopov V.Ya. Osnovy postroeniya besplatformennykh inertsial'nykh navigatsionnykh sistem [Fundamentals of strapdown inertial navigation system design], ed. by V.Ya. Raspopov. St. Petersburg: SSC RF JSC "Concern "Central Research Institute "Electropribor", 2009, 280 p.
17. Volkov V.L. Matematicheskoe modelirovanie inertsial'nykh sistem izmereniya [Mathematical modeling of inertial measurement systems], *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* [International Journal of Applied and Fundamental Research], 2015, No. 2. Available at: www.science-sd.com/457-24631.
18. Woodman O.J. An Introduction to Inertial Navigation, *Technical reports published by the University of Cambridge Computer Laboratory are freely available via the Internet*, 37 p. Available at: <http://www.cl.cam.ac.uk/techreports>, 2007.
19. Bilich A., Larson K. M., Axelrad P. SNR-Based Multipath Corrections to GPS Phase Measurements: Improving the Accuracy of Permanent GPS Stations, *AGU Fall Meeting Abstracts*, 2002, Vol. 1, p. 6.
20. Filippov S.I., Matakhn V.V., Shipov I.A., Petrov A.V. Primenenie metodik i instrumentov sistemnoy inzhenerii pri sozdanii sistem nazemnoy navigatsii [Application of system engineering methods and tools in creation of ground navigation systems], *Oboronnaya tekhnika* [Defense technology], 2017, No. 7-8, pp. 38-44.

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

Шипов Илья Александрович – АО «Всероссийский научно-исследовательский институт «Сигнал»; e-mail: pil14@inbox.ru; г. Ковров, Россия; тел.: +79100905025; заместитель начальника отдела.

Ветошкин Евгений Владимирович – e-mail: vetoshkin@vniisignal.ru; тел.: +79206244967; главный конструктор средств навигационно-геодезического обеспечения.

Shipov Ilya Aleksandrovich – All-Russian Scientific Research Institute "Signal" JSC; e-mail: pil14@inbox.ru; Kovrov, Russia; phone: +79100905025; deputy head of department.

Vetoshkin Evgeniy Vladimirovich – e-mail: vetoshkin@vniisignal.ru; phone: +79206244967; chief designer of navigation and geodetic systems.

В.В. Ланцов, К.В. Ланцов, А.В. Корякин, Л.А. Мартынова**МЕТОД И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ
СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА
ОТ МАЛОРАЗМЕРНОГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ***

Целью исследования является оценка эффективности системы защиты подвижного охраняемого объекта от малоразмерного беспилотного воздушного судна (БВС). В связи с особенностью построения системы защиты подвижного объекта, связанной с перемещением синхронно с объектом критической зоны, в которую не должен попасть БВС, потребовалась разработка метода и математической модели оценки эффективности БВС. В качестве показателя эффективности принята вероятность отведения БВС от критической зоны. Проанализировано, что отведение БВС от критической зоны осуществляется за счет своевременного обнаружения БВС и его перехода от навигации по сигналам спутниковых навигационных систем – к навигации по бортовой инерциальной навигационной системе. Своевременность обнаружения определяется дальностью обнаружения БВС. Дальность обнаружения определяется, прежде всего, параметрами самих средств обнаружения, топологией их размещения, размерами критической зоны вокруг охраняемого объекта, направлением движения БВС. Размер критической зоны определяется опасностью видеосъемки с борта БВС или сброса полезной нагрузки. Наиболее уязвимым для охраняемого объекта направлением движения БВС является движение к точке встречи с охраняемым объектом. Результаты анализа и разработанные алгоритмы функционирования системы защиты от малоразмерного БВС учтены при разработке математической модели оценки эффективности защиты охраняемого объекта. Ввиду того, что часть параметров БВС заранее неизвестна, их значения разыгрывались равномерно. Для расчета показателя эффективности использован метод статистических испытаний (метод Монте-Карло). В каждом испытании разыгрывались случайные параметры БВС, задавались исходные данные, воспроизводились процессы движения охраняемого объекта и БВС, изменялись положение критической зоны, оценивалось попадание БВС в зоны обзора средств обнаружения, отведение от генерального курса БВС и попадание его в пределы критической зоны. Разработанные метод и математическая модель оценки эффективности позволили провести численный эксперимент, направленный на оценку влияния скорости БВС на эффективность защиты подвижного охраняемого объекта. Результаты работы могут быть использованы при проектировании и разработке системы защиты охраняемого объекта от БВС, при сравнительном анализе альтернативных систем защиты от БВС. Предложенные метод и математическая модель могут быть использованы также и в подводной морской среде при оценке эффективности защиты охраняемого обитаемого/необитаемого объекта от морских робототехнических комплексов.

Беспилотное воздушное судно; защита подвижного объекта; оценка эффективности; средства обнаружения; вероятность обнаружения; метод статистических испытаний.

V.V. Lantsov, K.V. Lantsov, A.V. Koryakin, L.A. Martynova**THE METHOD AND MATHEMATICAL MODEL FOR EVALUATING
THE EFFECTIVENESS OF THE SYSTEM FOR PROTECTING A MOVING
OBJECT FROM A SMALL-SIZED ROBOTIC COMPLEX**

The purpose of the study is to evaluate the effectiveness of the system for protecting a mobile protected object from a small unmanned aerial vehicle (UAV). In connection with the peculiarity of the construction of the protection system for a mobile object, associated with the movement synchronously with the object of the critical zone, into which the UAV should not fall, it was necessary to develop a method and a mathematical model for assessing the effectiveness of the UAV.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ 23-29-00803.

As an indicator of efficiency, the probability of diverting the UAV from the critical zone was taken. It is analyzed that the removal of the UAV from the critical zone is carried out due to the timely detection of the UAV and its transition from navigation using the signals of satellite navigation systems to the onboard inertial navigation system. The timeliness of detection is determined by the detection range of the UA. The detection range is determined, first of all, by the parameters of the detection means themselves, the topology of their placement, the size of the critical zone around the protected object, and the direction of movement of the UAV. The size of the critical zone is determined by the danger of video filming from the UAV or payload drop. The direction of movement of the UAV most vulnerable to the protected object is the movement to the meeting point with the protected object. The results of the analysis and the developed algorithms for the functioning of the protection system against a small UAV were taken into account when developing a mathematical model for assessing the effectiveness of protecting a protected object. Due to the fact that some of the parameters of the BVS are not known in advance, their values were played with equiprobability. The method of statistical tests (Monte Carlo method) was used to calculate the efficiency indicator. In each test, random parameters of the UAV were played out, initial data were set, the processes of movement of the protected object and the UAV, changes in the position of the critical zone were reproduced, the UAV hitting the viewing areas of the detection tools, moving away from the general course of the UAV and getting into the limits of the critical zone were evaluated. The developed method and mathematical model for evaluating the effectiveness made it possible to conduct a numerical experiment aimed at assessing the influence of the UAV speed on the protection efficiency of a mobile guarded object. The results of the work can be used in the design and development of a system for protecting a protected object from UA, in a comparative analysis of alternative systems for protecting against UA. The proposed method and mathematical model can also be used in the underwater marine environment when evaluating the effectiveness of protecting a protected inhabited / uninhabited object from marine robotic systems.

Unmanned aerial vehicle; multipath and multipath; dense urban development; difference-range method; location determination.

Введение. В настоящее время широко разрабатываются системы защиты различных объектов от беспилотных воздушных судов (БВС) [1], и для сравнения вариантов систем защиты и понимания, насколько эффективно построенная система обеспечивает защиту, а также для оценки влияния внешней среды на результат защиты, необходимо иметь оценку эффективности разрабатываемых и уже разработанных систем защиты от малоразмерных БВС [2–6].

Особенность системы защиты подвижных объектов по сравнению с защитой стационарных объектов заключается в зависимости эффективности защиты не только от средств обнаружения, движения БВС и внешней среды, но и от движения самого подвижного объекта. Из-за этого защите подлежит протяженная территория, сопредельная с маршрутом следования подвижного объекта, в связи с чем необходимо либо по всей территории разместить средства обнаружения, что экономически затратно, либо средства обнаружения должны синхронно перемещаться вместе с подвижным объектом, что не всегда технически возможно и сложно реализуемо. Из-за протяженного маршрута возможна изменчивость внешней обстановки по мере перемещения объекта: это может быть открытая местность, переходящая в пересеченную и горную, в городские условия с плотной застройкой или малоэтажными домами. От условий положения подвижного объекта существенно зависит дальность обнаружения и погрешность определения координат БВС.

В связи с этим актуальным является задача разработки метода оценки эффективности системы защиты подвижного охраняемого объекта от БВС.

Имеющиеся публикации посвящены в основном средствам обнаружения БВС [7–9] однако публикации по оценке эффективности систем защиты подвижного охраняемого объекта от малоразмерных БВС в литературе практически отсутствуют.

Целью работы явилась разработка метода оценки эффективности подвижного объекта от БВС.

Постановка задачи. В глобальной системе координат Oxy (рис.1) рассмотрим следующий тактический эпизод. Пусть имеется охраняемый объект, движущийся курсом Q_a и скоростью V_a . Пусть вокруг объекта сформирована критическая зона в виде круга радиуса R_{KZ} , от которой необходимо отвести БВС. По мере перемещения подвижного объекта критическая зона также синхронно перемещается. Для исключения попадания БВС в критическую зону на охраняемом объекте и вдоль траектории его движения размещены средства обнаружения (СО), характеризующиеся дальностью обнаружения D_{CO} и координатами своего положения x_{CO}, y_{CO} .

Пусть по направлению к охраняемому объекту движется БВС со скоростью V_b и курсом Q_b , которые заранее неизвестны. Пусть навигация БВС осуществляется по сигналам спутниковых навигационных систем. По мере приближения БВС к охраняемому объекту на дистанцию D_{ob} БВС обнаруживается средствами обнаружения и через время принятия решения о включении противодействия происходит подавление сигналов спутниковых навигационных систем [1, с.81]. БВС вынужденно [1, с.31] переходит на навигацию по бортовой инерциальной навигационной системе (БИНС). Навигация по БИНС характеризуется постепенным накоплением погрешности δ_b определения навигационных параметров: пусть известно СКО σ отклонения БВС от первоначальной траектории при работе БИНС [10]. В связи с этим по мере подлета БВС к охраняемому объекту происходит постепенное его отклонение от направления на охраняемый объект, в результате чего БВС может оказаться в стороне от него на расстоянии δ_b .

Для обеспечения отведения БВС от критической зоны необходимо, чтобы погрешность δ_b превышала радиус критической зоны R_{KZ} , то есть выполнялось условие $\delta_b > R_{KZ}$.

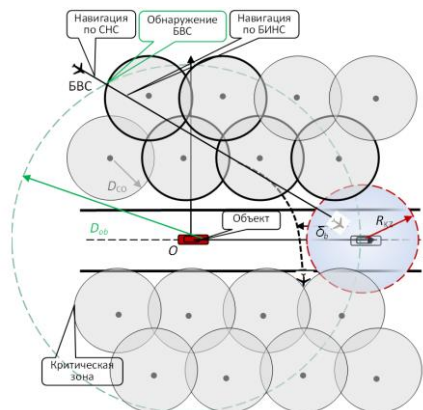


Рис. 1. Схема тактического эпизода

Необходимо разработать математическую модель оценки эффективности защиты подвижного объекта от БВС при различных вариантах его движения:

- ◆ равномерного-прямолинейного движения;
- ◆ неравномерного и непрямолинейного движения;
- ◆ плотной застройки или горного района, влияние которых сказывается на дальности обнаружения, которая падает из-за затухания или переотражения сигнала от БВС при различной ориентации улиц/ущелий.

Будем считать, что система защиты подвижного объекта эффективна, если она обеспечивает отведение БВС от критической зоны. Поэтому в работе в качестве показателя эффективности принята вероятность отведения БВС от критической зоны.

Для оценки эффективности системы защиты рассмотрим особенности эффективности защиты подвижного объекта.

Особенности эффективности защиты подвижного объекта. Отведение БВС от критической зоны осуществляется за счет своевременного отключения у БВС навигации по сигналам спутниковых навигационных систем (СНС). Своевременность отключения СНС обеспечивается за счет дальности обнаружения БВС. Поэтому первое, от чего зависит эффективность отведения БВС от критической зоны – это от дальности обнаружения БВС.

Дальность обнаружения определяется, прежде всего, возможностями самих средств обнаружения. Кроме того, значение имеет расположение средства обнаружения: в низине или на возвышенности, с затенением или без.

Второе, чем определяется вероятность отведения – это размерами критической зоны вокруг охраняемого объекта. Размеры зоны определяются, прежде всего, опасностью видеосъемки или сброса полезной нагрузки.

Третье, чем определяется вероятность отведения – это направлением движения БВС: наиболее уязвимое для охраняемого объекта является движение БВС по направлению к точке встречи при текущих скоростях движения его и охраняемого объекта. В связи с этим при оценке эффективности необходимо рассматривать наихудший для охраняемого объекта вариант движения БВС в направлении точки их встречи.

Исходя из сказанного, математическая модель оценки эффективности защиты охраняемого объекта должна учитывать все вышесказанное как это было сделано, например, в [11–14]. В связи с этим рассмотрим подробнее каждый из указанных факторов, влияющих на эффективность защиты подвижного охраняемого объекта.

Формирование дальности обнаружения. Пусть для увеличения дальности обнаружения построена система защиты в несколько эшелонов [15].

При дальности обнаружения D_{CO} ширина полосы вокруг положения маршрута движения охраняемого объекта с учетом расположения СО в шахматном порядке определяется выражениями:

$$D_{ob} = D_{CO} + \sqrt{3} D_{CO} \quad (1)$$

при размещении СО в два эшелона,

$$D_{ob} = 2 D_{CO} + 2\sqrt{2} D_{CO} \quad (2)$$

при размещении СО в три эшелона.

При определении топологии размещения СО исходим из обязательного условия обнаружения БВС СО. Для этого средства обнаружения должны быть так размещены, чтобы для любой j -ой точки пространства в защищаемой области найдется, по крайней мере, одна i' зона обзора, в пределах которой эта точка окажется, то есть:

$$\forall i \in [1; N] \quad \exists i': \left(X_b - X_{zo i'} \right)^2 + \left(Y_b - Y_{zo i'} \right)^2 < R_{zo i'}^2 \quad (3)$$

Обозначим множество точек защищаемой области M_o . Площадь области, покрываемой зонами обзора, обозначим S_{ZO} и определим как площадь, покрываемую множеством точек, удовлетворяющих выражению:

$$S_{ZO} = \left(\bigcup_{i=1}^N S_{zo i} \right) \cap M_o. \quad (4)$$

где $S_{zo i}$ – площадь i -ой зоны обзора, определяется выражением: $S_{zo i} = \pi R_{zo i}^2$.

Тогда вероятность обнаружения БВС определяется выражением:

$$\begin{cases} P = \frac{S_{ZO}}{S_o} & \text{при } S_{ZO} < S_o \\ P = 1 & \text{при } S_{ZO} \geq S_o \end{cases} \quad (5)$$

где $S_o = \pi D_{co}^2$

Для определения топологии размещения средств обнаружения и их координат рассматриваемая задача формализована как задача о покрытии [16, 17].

Исходными данными задачи о покрытии множества является конечное множество U (охраняемая область) и семейство S его подмножеств (зоны обзора). Покрытием называют семейство $C \subseteq S$ наименьшей мощности, объединением которых является U .

При определении топологии размещения СО решение возможно перебором различных вариантов, однако в целях экономии временных и вычислительных ресурсов целесообразно использовать традиционный в таких случаях жадный алгоритм [18–21].

Следуя жадному алгоритму, выбиралось множество зон обзора, руководствуясь следующим правилом: на каждом этапе выбирается множество зон обзора, покрывающее максимальное число точек ещё не покрытых частей защищаемой территории.

Если небольшие участки останутся незакрытыми или имеются зоны тени, то следуя жадному алгоритму, выбирается под каждый такой участок дополнительное средство обнаружения.

Такое постепенное покрытие защищаемой области зонами обзора средств обнаружения происходит до тех пор, пока не произойдет одно из следующих событий:

- ♦ закончился запас средств обнаружения;
- ♦ вся защищаемая область покрыта зонами обнаружения.

Определение размера критической зоны. Для определения отклонения БВС от критической зоны необходимо знать ее размер.

Размер критической зоны определяется скоростью движения БВС и ошибками навигационного оборудования, находящегося у него на борту.

По результатам исследований, приведенных в [15], радиус критической зоны принят равным 100 м. Именно в этих пределах приближение БВС к охраняемому объекту опасно, прежде всего, из-за возможного проведения видео- и фотосъемки, а также – из-за возможной доставки полезной нагрузки.

Для отведения БВС от критической зоны в [15] показано, что при уходе точности определения местоположения за 1 мин на δ_{b1} по горизонтали – для ухода точности на R_{KZ} потребуется время t_b , за которое БВС, двигаясь со скоростью V_b и ориентируясь по БИНС, преодолеет расстояние:

$$S_b = V_b \cdot R_{KZ} / \delta_{b1}. \quad (6)$$

В связи с этим в [15] предложено располагать СО вокруг подвижного охраняемого объекта таким образом, чтобы обеспечить дальность обнаружения средств обнаружения D_{CO} , близкую к S_b .

Поскольку охраняемый объект – подвижный, то критическая зона представляет собой полосу шириной $2S_b$, центральной линией полосы является маршрут движения охраняемого объекта. Поскольку дальность обнаружения существующих средств обнаружения в разы меньше требуемой S_b , то для эффективной работы системы защиты предложено размещение средств обнаружения в несколько эшелонов на удалении от охраняемого объекта так, чтобы $D_{ob} = S_b$. Исходя из размера критической зоны СО размещают таким образом, чтобы обеспечить требуемую дальность обнаружения БВС.

Для эффективной защиты подвижного объекта сформированы основные принципы топологии размещения СО, обеспечивающие требуемую дальность обнаружения.

Направление движения БВС. Модель движения охраняемого объекта представим в виде:

$$\begin{aligned}x_a(t) &= x_{a0} + V_{ax} \cdot t \cdot \sin Q_a \\y_a(t) &= y_{a0} + V_{ay} \cdot t \cdot \cos Q_a.\end{aligned}\quad (7)$$

где Q_a – курс охраняемого объекта.

Модель движения БВС:

$$\begin{aligned}x_b(t) &= x_{b0} + V_{bx} \cdot t \cdot \sin Q_b \\y_b(t) &= y_{b0} + V_{by} \cdot t \cdot \cos Q_b\end{aligned}\quad (8)$$

Определим курс БВС, направленный в упреждающую точку встречи с охраняемым объектом.

При движении БВС с постоянной скоростью V_b и курсом Q_b сближение с охраняемым объектом в точке С определяется соотношением:

$$\frac{\sin q_a}{\sin q_b} = \frac{V_b}{V_a}, \quad (9)$$

где q_a и q_b – курсовые углы охраняемого объекта и БВС соответственно. Под курсовым углом будем понимать [22] угол между диаметральной плоскостью охраняемого объекта А (наблюдателя) и направлением «А (наблюдатель) – БВС (объект поиска)». Курсовые углы измеряются от 0 до 180° соответствующего борта наблюдателя и БВС.

Предполагается, что первоначально момент появления БВС, его координаты, курс и скорость не известны, однако по результатам его попадания в зоны обзора средств обнаружения параметры его движения становятся известными.

Наихудший вариант для охраняемого объекта – движение БВС в упрежденную точку встречи, определяется, исходя из координат БВС x_b, y_b , известных скоростей V_a и V_b и координатах объекта x_a, y_a , а также текущего его курса Q_a . Исходя из этих данных – определяются курсовые углы q_a и q_b (рис. 2).

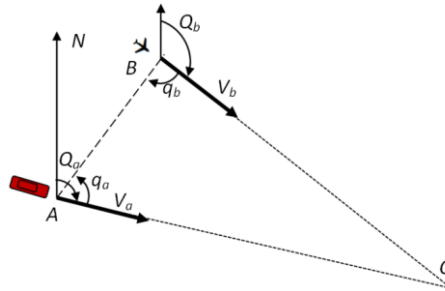


Рис. 2. Взаимное положение охраняемого объекта и БВС для расчета курса сближения БВС с охраняемым объектом

Из треугольника ABC относительный курс БВС определяется выражением (рис. 2):

$$Q_b = \arctg \left(\frac{y_a - y_b}{x_a - x_b} \right). \quad (10)$$

Расчет относительной скорости БВС V_p :

$$V_p = -V_b \cdot \cos Q_b \pm \sqrt{V_b^2 - V_a^2 + \sin^2 \xi}. \quad (11)$$

Из треугольника скоростей по теореме косинусов получаем выражение:

$$V\rho = \sqrt{V_a^2 + V_b^2 - 2V_a V_b \cos \xi}, \quad (12)$$

из которого находим ξ .

Поскольку угол ξ представляет собой разность курсов Q_a и Q_b , то курс Q_b движения БВС в точку встречи с охраняемым объектом определяется выражением:

$$Q_b = Q_a + \xi. \quad (13)$$

Определение вероятности обнаружения БВС. При движении БВС по направлению к охраняемому объекту происходит последовательное пересечение БВС зон обзора (ЗО) СО в моменты времени $t_1, t_2, \dots, t_M$, где M – количество пересечаемых зон.

Полагаем, что БВС обнаружено, если в ходе движения оно попало в пределы зоны обзора i -го средства обнаружения:

$$(X_b - X_{zoi})^2 + (Y_b - Y_{zoi})^2 < R_{zoi}^2, \quad (14)$$

где X_{zoi}, Y_{zoi} – координаты положения средств обнаружения

R_{zoi} – радиус зоны обзора средств обнаружения, равный дальности обнаружения СО.

Поэтому в результате пересечения M зон обзора (например, на рис. 1, $M=3$), вероятность обнаружения пролетающего БВС определяется выражением:

$$P_{об} = 1 - (1 - P_0)^M. \quad (15)$$

Попадание БВС в критическую зону характеризуется условием:

$$(X_b - X_a)^2 + (Y_b - Y_a)^2 < R_{KZ}^2. \quad (16)$$

Как только вероятность совокупного обнаружения по зонам обзора, в которые попал БВС, превысила заданный порог, с этого момента считается, что включилась система отведения БВС от критической зоны, и БВС переходит на навигацию по БИНС. Это означает, что с этого момента координаты положения БВС имеют добавленную ошибку, вследствие чего БВС начинается смещаться в сторону от прежнего курса Q_b .

Для получения оценки эффективности защиты подвижного объекта необходимо определить, удалось ли отвести БВС от критической зоны, которая перемещается вместе с подвижным объектом, или нет.

Математическая модель оценки эффективности системы защиты подвижного объекта от БВС. Математическая модель оценки эффективности системы защиты подвижного объекта от БВС описывает параллельно протекающие или слабо связанные между собой процессы:

- ♦ движение охраняемого объекта по заданной траектории по (7);
- ♦ формирование критической области по (6);
- ♦ движение БВС, которое направлено в гипотетическую точку пересечения с траекторией движения охраняемого объекта (8);
- ♦ попадание в зону обзора средств обнаружения по (14), из-за которой в результате происходит отклонение БВС с прежнего направления;
- ♦ попадание БВС в критическую зону по (16).

Результатом этих параллельно протекающих процессов является прохождение БВС вне критической зоны.

Из-за наличия случайных факторов, которые заранее неизвестны, воспользуемся методом статистических испытаний (метод Монте-Карло) при моделировании.

При использовании метода статистических испытаний разыгрываются случайные значения заранее не известных параметров. Чтобы исключить предвзятость в выборе случайных чисел и зависимости результата от выбранного числа, проводится серия испытаний. По результатам серии испытаний оценивается вероятность $P_{\text{эм}}$ отведения БВС от критической зоны как отношение результативных испытаний к общему количеству проведенных испытаний.

$$P_{\text{BM}} = \frac{N_0}{N}. \quad (17)$$

Тем самым определяется оценка эффективности работы системы защиты подвижного охраняемого объекта от БВС.

Для определения результативности испытаний в каждом испытании задаются исходные данные:

- ◆ маршрут следования охраняемого объекта в виде координат путевых точек, включая точку старта;
- ◆ скорость охраняемого объекта V_a ;
- ◆ внешние условия – равнинные, горные или городские с плотной застройкой;
- ◆ момент времени появления, координаты начального положения и скорость БВС V_b ;

- ◆ вероятность обнаружения БВС при нахождении его в зоне обзора P_0 .

В момент старта моделирования:

- ◆ начинается движение охраняемого объекта со скоростью V_a ;
- ◆ разыгрываются координаты начального положения БВС;
- ◆ определяет направление движения БВС по начальным координат БВС, которое ориентировано на точку потенциальной встречи с движущимся охраняемым объектом.

После этого – начинается цикл по времени, время представлено в виде тактов имитации заданной длительности Δt .

В каждом такте имитации происходит:

- ◆ расчет текущих координат охраняемого объекта;
- ◆ определение положения подвижной критической зоны радиуса R_{KZ} вокруг охраняемого объекта, в которую не должен попасть БВС;
- ◆ расчет текущего положения БВС в предположении их определения по сигналам СНС и его равномерном и прямолинейном движении.

В ходе движения БВС оценивается его попадание в зоны обнаружения средств обнаружения по результатам выполнения условия (14). При попадании БВС в зону обзора средства обнаружения считается, что БВС обнаружен. После обнаружения БВС спустя некоторое известное время, необходимое для подтверждения обнаружения и включения системы противодействия, происходит переход БВС от навигации по СНС к навигации по БИНС.

С этого момента времени предполагается, что происходит постепенное с течением времени накопление ошибки п БИНС, и, как следствие, отклонение БВС от изначального направления движения.

При дальнейшем движении по БИНС происходит определение направления движения БВС с ошибкой, значение которой разыгрывается случайным образом в заданных пределах δ . Из-за ошибочной навигации происходит отклонение БВС от заданного маршрута движения, направленного на охраняемый объект. Одновременно происходит оценка расстояния между движущимся охраняемым объектом и БВС.

Постоянно в каждом такте имитации проверяется выполнение условие (16) попадания БВС в пределы критической зоны. Если условие (16) выполнено, то есть БВС попал в пределы критической зоны, то регистрируется нерезультативное испытание, и моделирование испытания заканчивается. Если условие (16) не вы-

полнено, то моделирование процессов движения БВС, движения охраняемого объекта, пересечения зон обзора СО, перемещения критической зоны продолжается до тех пор, пока БВС не пересечет трассу движения охраняемого объекта. После этого предполагается, что БВС при дальнейшем движении ни при каких условиях не окажется в пределах критической зоны. В этом случае считается, что испытание результативно.

При определенном сочетании скоростей охраняемого объекта и БВС может оказаться, что БВС никогда не попадет в пределы критической зоны:

- ◆ если БВС настолько медленный, что не успевает даже по траверзу приблизиться к траектории движения охраняемого объекта;
- ◆ если их курсы движения охраняемого объекта и БВС параллельны, но эта и предыдущая ситуации не могут возникнуть из-за особенностей рассматриваемой задачи: БВС стремится к охраняемому объекту;
- ◆ БВС будет долго и медленно следовать к точке встречи с охраняемым объектом: в этом случае у него может просто не хватить энергоресурса.

Результаты численного эксперимента. Целью проведения численного эксперимента являлось определение зависимости вероятности отведения БВС от критической при различных скоростях движения БВС из заданного диапазона.

Если БВС летит по траверзу к маршруту движения охраняемого объекта, а это наиболее логичный вариант, то время от обнаружения до встречи – мало, и отклонение на требуемую величину может и не успеть произойти.

Если же предположить, что охраняемый объект движется с высокой скоростью, то БВС ничего не остается, как двигаться практически параллельным курсом, в результате чего обнаружение произойдет задолго до момента встречи, и есть шанс отклонить БВС.

Это означает в качестве рекомендаций, что целесообразно охраняемому объекту двигаться с высокой скоростью. Понятно, что это не всегда возможно, например, из-за плохой видимости, скользкого покрытия, дороги серпантином и т.д.

При оценке влияния скорости БВС на эффективность защиты для каждого значения скорости БВС регистрировались:

- ◆ расчетный курс БВС в точку встречи;
- ◆ количество пройденных зон обзора средств обнаружения;
- ◆ вероятность обнаружения БВС;
- ◆ момент времени, с которого начинается отклонение БВС от начального курса;
- ◆ курс БВС в момент прохождения траектории движения охраняемого объекта (если это происходит) или в момент попадания БВС в критическую зону;
- ◆ эффективность отклонения БВС от критической зоны.

Скорость охраняемого объекта V_o принималась равной 52,5 км/ч.

Вероятность обнаружения БВС при нахождении его в зоне обзора принималась равной $P_0 = 0,95$.

Отклонение при навигации по БИНС на $0,5^\circ + \text{Rand}[0;1]$.

Скорость БВС V_b перебиралась из диапазона [52,5; 127,5] км с шагом 7,5 км.

Результаты моделирования показали следующее.

При движении БВС на скорости, сопоставимой с движением охраняемого объекта, направление к точке встречи практически параллельно траектории движения охраняемого объекта. в связи с этим отведение БВС от движущейся вместе с объектом критической зоны практически гарантировано.

С увеличением скорости движения БВС траектория приближается постепенно к траверзной, БВС быстрее достигает траектории движения охраняемого объекта и все чаще успевает попасть в критическую зону, несмотря на отклонение из-за перехода на БИНС.

Сказанное подтверждает зависимость вероятности отведения БВС от критической зоны при различных скоростях движения БВС; зависимость представлена на рис. 3.

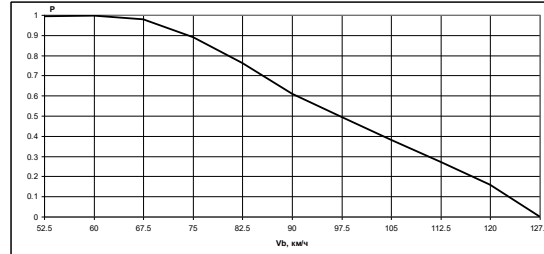


Рис. 3. Зависимость вероятности отведения БВС от критической зоны при различных скоростях полета БВС

Из результатов, представленных на рис. 3, видно, что при скоростях, близких к скорости движения охраняемого объекта, вероятность отведения равна 1, с увеличением скорости движения БВС вероятность постепенно падает до 0,8 при движении БВС на скорости 82,5 км/ч, и до 0,2 при скорости движения БВС 115 км/ч.

Из полученных результатов можно сделать вывод о том, что для повышения эффективности защиты охраняемого объекта от БВС целесообразно двигаться со скоростью, сопоставимой со скоростью БВС, то есть свыше 100 км/ч. Однако этому могут помешать осадки, качество дорожного покрытия, извилистость трассы, по которой следует охраняемый объект.

Заключение. При рассмотрении задачи защиты подвижного охраняемого объекта от БВС предложен метод оценки эффективности защиты и математическая модель, реализующая предложенный метод.

В предложенном методе оценивается критическая область вокруг охраняемого объекта, от которой необходимо отвести БВС; определяется дальность, с которой БВС должен быть обнаружен; оценивается курс БВС в точку встречи с охраняемым объектом, анализируется попадание БВС в зоны обзора, регулярно размещенные вдоль трассы движения охраняемого объекта, определяется вероятность обнаружения, и в зависимости от нее – переход БВС на навигацию по БИНС, определяется попадание БВС в пределы критической зоны.

В качестве показателя эффективности предложено использовать вероятность отведения БВС от критической зоны.

Расчет показателя эффективности осуществлялся методом статистических испытаний.

Разработанная математическая модель оценки эффективности была использована при проведении численного эксперимента при оценке вероятности отведения БВС от критической зоны при различных его скоростях.

Предложенные метод и математическая модель могут быть использованы также и в подводной морской среде при оценке эффективности защиты охраняемого обитаемого/необитаемого объекта от морских робототехнических комплексов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Макаренко С.И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам: монография. – СПб.: Научно-технические технологии, 2020. – 204 с.
2. Классификация БПЛА по летным характеристикам. – Свободный режим доступа: <https://docs.geoscan.aero/ru/master/database/const-module/classification/classification.html>.
3. DJI Mavic 2 Pro - Drone Quadcopter UAV with Hasselblad Camera 3-Axis Gimbal HDR 4K Video Adjustable Aperture 20MP 1" CMOS Sensor, up to 48mph, Gray. – Свободный режим доступа: <https://www.amazon.com/DJI-Quadcopter-Hasselblad-Adjustable-Aperture/dp/B07GDC5X74> (дата обращения: 03.03.2023).

4. Phantom 4 Pro V2.0. – Свободный режим доступа: https://www.amazon.com/DJI-Phantom-Pro-V2-0-White/dp/B07CXX39Y7/ref=sr_1_6?crid=49MI5QNHNAAT&keywords=Phantom+4+Pro+V2.0&qid=1677785368&srefix=phantom+4+pro+v2.0+%2Caps%2C173&sr=8-6 (дата обращения: 03.03.2023).
5. БЛА Т23Э. – Свободный режим доступа: https://web.archive.org/web/20081211023223/http://www.enics.ru/detail?product_id=20 (дата обращения: 03.03.2023).
6. Куб-БЛА. – Свободный режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D1%83%D0%B1-%D0%91%D0%9B%D0%90> (дата обращения: 03.03.2023).
7. Системы и средства для обнаружения беспилотников (БПЛА). – <https://anti-dron.ru/blog/sistemy-i-sredstva-dlya-obnaruzheniya-bespilotnikov-i-effektivnost-ikh-primeneniya.html> (дата обращения: 03.03.2023).
8. Филин Е.Д., Киричек Р.В. Методы обнаружения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов на основе анализа электромагнитного спектра // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2018. – Т. 6, № 2. – С. 87-93.
9. Системы обнаружения и нейтрализации беспилотников. – Свободный режим доступа: <http://robotrends.ru/robopedia/sistemy-obnaruzheniya-i-nyaytralizacii-bespilotnikov> (дата обращения: 03.03.2023).
10. Нагин И.А., Мухамедзянов Т.А. Экспериментальные исследования алгоритма комплексирования в инерциально-спутниковой навигационной системе NV216C-IMU // Перспективные системы и задачи управления: материалы XVII Всероссийской научно-практической конференции и XIII молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах». – Таганрог: ИП Марук М.Р., 2022. – С. 153-159.
11. Мартынова Л.А., Машошин А.И., Пашкевич И.В. Подходы к оценке эффективности автономного необитаемого подводного аппарата // Управление в морских и аэрокосмических системах (УМАС-2016); Матер. 9-ой Мультиконференции по проблемам управления. Председатель президиума мультиконференции В.Г. Пешехонов. – 2016. – С. 205-209.
12. Мартынова Л.А., Машошин А.И. Особенности оценки эффективности функционирования автономных необитаемых подводных аппаратов в нештатных ситуациях // Экстремальная робототехника. – 2016. – Т. 1, № 1. – С. 86-91.
13. Мартынова Л.А., Розенгауз М.Б. Определение эффективного поведения группы АНПА в сетцентрической системе освещения подводной обстановки // Информационно-управляющие системы. – 2017. – № 3 (88). – С. 47-57.
14. Мартынова Л.А. Инструментарий для исследований эффективности ведения сейсморазведки с использованием автономных необитаемых подводных аппаратов // Информационно-управляющие системы. – 2017. – № 2 (87). – С. 77-87.
15. Корякин А.В., Ланцов В.В., Мартынова Л.А. Формирование комплекса обнаружения беспилотного летательного аппарата – элемента морской роботизированной системы // Управление в морских системах (УМС-2022): 15-я Мультиконференция по проблемам управления. Материалы конференции. – СПб., 2022. – С. 20-23.
16. Ali J., Dyo V. Coverage and Mobile Sensor Placement for Vehicles on Predetermined Routes: A Greedy Heuristic Approach (SCITEPRESS, Madrid, 2017). – P. 83-88.
17. Cruz Caminha P.H., Souza Couto R. De, Maciel Kosmowski Costa L.H., Fladenmuller A., Amorim M. Dias de On the Coverage of Bus-Based Mobile Sensing, 2018. MDPI. Basel.
18. Cormen T.H., Leiserson C.E., Rivest R.L., Stein C. Introduction to Algorithms. – MIT Press. Massachusetts, 2009. – 984 p.
19. Cai X. Canonical Coin Systems for Change-Making Problems // IEEE Computer Society Conference Publishing Services (CPS). Danvers. – 2009. – P. 499-504.
20. Edmonds J. Matroids and the greedy algorithm. – Springer, Berlin, 1971. – P. 127-136.
21. Curtis S. The classification of greedy algorithms. – Elsevier. Amsterdam, 2003. – P. 125-157.
22. Абчук В., Суздаль В. Понск объектов. – М.: Сов. Радио, 1977. – 334 с.

REFERENCES

1. Makarenko S.I. Protivodeystvie bespilotnym letatel'nyim apparatam: monografiya [Countermeasures against unmanned aerial vehicles: monograph]. Saint Petersburg: Naukoemkie tekhnologii, 2020, 204 p.
2. Klassifikatsiya BPLA po letnym kharakteristikam. Free access mode: <https://docs.geoscan.aero/ru/master/database/const-module/classification/classification.html>.

3. DJI Mavic 2 Pro - Drone Quadcopter UAV with Hasselblad Camera 3-Axis Gimbal HDR 4K Video Adjustable Aperture 20MP 1" CMOS Sensor, up to 48mph, Gray. Free access mode: <https://www.amazon.com/DJI-Quadcopter-Hasselblad-Adjustable-Aperture/dp/B07GDC5X74> (accessed 03 March 2023).
4. Phantom 4 Pro V2.0. Free access mode: https://www.amazon.com/DJI-Phantom-Pro-V2-0-White/dp/B07CXX39Y7/ref=sr_1_6?crid=49MI5QNHNAAT&keywords=Phantom+4+Pro+V2.0&qid=1677785368&sprefix=phantom+4+pro+v2.0+%2Caps%2C173&sr=8-6 (accessed 03 March 2023).
5. BLA T23E [UAV T23E]. Free access mode: https://web.archive.org/web/20081211023223/http://www.enics.ru/detail?product_id=20 (accessed 13 May 2022).
6. Kub-BLA [Cube UAV]. Free access mode: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D1%83%D0%B1-%D0%91%D0%9B%D0%90> (accessed 03 March 2023).
7. Sistemy i sredstva dlya obnaruzheniya bespilotnikov (BPLA) [Systems and means for detecting unmanned aerial vehicles (UAVs)]. Free access mode: <https://anti-dron.ru/blog/sistemy-i-sredstva-dlya-obnaruzheniya-bespilotnikov-i-effektivnost-ikh-primeneniya.html> (accessed 03 March 2023).
8. Filin E.D., Kirichek R.V. Metody obnaruzheniya malorazmernykh bespilotnykh letatel'nykh apparatov na osnove analiza elektromagnitnogo spektra [Methods for detecting small unmanned aerial vehicles based on the analysis of the electromagnetic spectrum], *Informatsionnye tekhnologii i telekommunikatsii* [Information technologies and telecommunications], 2018, Vol. 6, No. 2, pp. 87-93.
9. Sistemy obnaruzheniya i neytralizatsii bespilotnikov [Systems for detecting and neutralizing drones]. Free access mode: <http://robotrends.ru/roboedia/sistemy-obnaruzheniya-i-nyaytralizatsii-bespilotnikov> (accessed 03 March 2023).
10. Nagin I.A., Mukhamedzyanov T.A. Eksperimental'nye issledovaniya algoritma kompleksirovaniya v inertial'no-sputnikovoy navigatsionnoy sisteme NV216C-IMU [Experimental studies of the integration algorithm in the NV216C-IMU inertial satellite navigation system], *Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya: materialy XVII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii i XIII molodezhnoy shkoly-seminara «Upravlenie i obrabotka informatsii v tekhnicheskikh sistemakh»* [Perspective systems and control tasks: materials of the XVII All-Russian Scientific and Practical Conference and the XIII Youth School-Seminar "Control and Information Processing in Technical Systems"]. Taganrog: IP Maruk M.R., 2022, pp. 153-159.
11. Martynova L.A., Mashoshin A.I., Pashkevich I.V. Podkhody k otsenke effektivnosti avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata [Approaches to evaluating the effectiveness of an autonomous uninhabited underwater vehicle], *Upravlenie v morskikh i aerokosmicheskikh sistemakh (UMAS-2016): Mater. 9-oy Mul'tikonferentsii po problemam upravleniya. Predsedatel' prezidiuma mul'tikonferentsii V.G. Peshekhonov* [Management in marine and aerospace systems (UMAS-2016). Materials of the 9th Multiconference on Management Problems. Chairman of the presidium of the multiconference V.G. Peshekhonov], 2016, pp. 205-209.
12. Martynova L.A., Mashoshin A.I. Osobennosti otsenki effektivnosti funktsionirovaniya avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov v neshtatnykh situatsiyakh [Peculiarities of evaluating the efficiency of functioning of autonomous uninhabited underwater vehicles in emergency situations], *Ekstremal'naya robototekhnika* [Extremal Robotics], 2016, Vol. 1, No. 1, pp. 86-91.
13. Martynova L.A., Rozengauz M.B. Opredelenie effektivnogo povedeniya gruppy ANPA v setsetricheskoy sisteme osveshcheniya podvodnoy obstanovki [Determination of the effective behavior of a group of AUVs in a network-centric system for lighting the underwater environment], *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2017, No. 3 (88), pp. 47-57.
14. Martynova L.A. Instrumentariy dlya issledovaniy effektivnosti vedeniya seysmorazvedki s ispol'zovaniem avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov [Tools for researching the effectiveness of seismic surveys using autonomous uninhabited underwater vehicles], *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Information and control systems], 2017, No. 2 (87), pp. 77-87.
15. Koryakin A.V., Lantsov V.V., Martynova L.A. Formirovanie kompleksa obnaruzheniya bespilotnogo letatel'nogo apparata – elementa morskoy robotizirovannoy sistemy [Formation of a detection complex for an unmanned aerial vehicle - an element of a marine robotic system], *Upravlenie v morskikh sistemakh (UMS-2022): 15-ya Mul'tikonferentsiya po problemam upravleniya. Materialy konferentsii* [Management in Marine Systems (UMS-2022). 15th Multiconference on Management Problems. Conference materials]. Saint Petersburg, 2022, pp. 20-23.
16. Ali J., Dyo V. Coverage and Mobile Sensor Placement for Vehicles on Predetermined Routes: A Greedy Heuristic Approach (SCITEPRESS, Madrid, 2017), pp. 83-88.

17. Cruz Caminha P.H., Souza Couto R. De, Maciel Kosmowski Costa L.H., Fladenmuller A., Amorim M. Dias de On the Coverage of Bus-Based Mobile Sensing, 2018. MDPI. Basel.
18. Cormen T.H., Leiserson C.E., Rivest R.L., Stein C. Introduction to Algorithms. MIT Press. Massachusetts, 2009, 984 p.
19. Cai X. Canonical Coin Systems for Change-Making Problems, *IEEE Computer Society Conference Publishing Services (CPS)*. Danvers, 2009, pp. 499-504.
20. Edmonds J. Matroids and the greedy algorithm. Springer, Berlin, 1971, pp. 127-136.
21. Curtis S. The classification of greedy algorithms. Elsevier. Amsterdam, 2003, pp. 125-157.
22. Abchuk V., Suzdal' V. Poisk ob"ektov [Search for objects]. Moscow: Sov. Radio, 1977, 334 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. профессор Г.С. Малышкин.

Ланцов Валентин Вадимович – Государственный научно-исследовательский институт прикладных проблем (ГосНИИПП); e-mail: well999@list.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 89811570699; соискатель, инженер-программист.

Ланцов Константин Вадимович – e-mail: stawrkest999@mail.ru; тел.: 89118108819; соискатель; инженер-программист.

Корякин Александр Викторович – e-mail: koral.spb@yandex.ru; тел.: 89117771452; д.т.н.; с.н.с.; г.н.с.

Мартынова Любовь Александровна – АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»; e-mail: martynowa999@bk.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 89219411395; д.т.н.; с.н.с.; в.н.с.

Lantsov Valentin Vadimovich – State Research Institute of Applied Problems (GosNIIPP); e-mail: well999@list.ru; Sankt-Peterburg, Russia; phone: +79811570699; applicant; software engineer.

Lantsov Konstantin Vadimovich – e-mail: stawrkest999@mail.ru; phone: +79118108819; applicant; software engineer.

Koryakin Aleksandr Viktorovich – e-mail: koral.spb@yandex.ru; phone: +79117771452; dr. of eng. sc.; senior researcher; chief researcher.

Martynova Liubov Alexandrovna – JSC CSRI Elektropribor; e-mail: martynowa999@bk.ru; Sankt-Peterburg, Russia; phone: +79219411395; dr. of eng. sc., senior researcher, leading researcher.

УДК 004.738.5: 621.391

DOI 10.18522/2311-3103-2023-1-53-65

Г.П. Виноградов

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НА ОСНОВЕ ЗНАНИЙ В СОЕДИНЕНИЯХ ВООРУЖЕННЫХ СИЛ

*Предметом исследования являются методы интеллектуализации автоматизированных систем и комплексов в ВС РФ на базе использования моделей и технологий, основанных на знаниях, а также реагирующих беспроводных сенсорных сетей (RWSN), которые имеют большую перспективу применения особенно при проведении локальных спецопераций силами мобильных тактических групп. **Актуальность работы** связана с тем, что динамика современного боестолкновения предполагает оперативную концентрацию всех видов информации при принятии адекватных боевой ситуации решений, что позволяет реализовать новый подход к ведению боевых действий, основанный на интеграции систем всех уровней и родов войск. Формой интеграции является тактическая группа. Реализация подхода требует при принятии решений построение цикла знаний, включающего этапы восприятия, представления, осознания и их пополнения на базе новых архитектур построения и использования информационных технологий. **Целью работы** является исследование возможности построения информационной системы обеспечения данными одного из ключевых этапов – этапа приобретения знаний из распределенных источников при использовании в качестве первичного элемента системы реагирующих сенсорных сетей. **Основные ре-***

зультаты. Исследования показали, что наиболее эффективное решение основано на использовании средств SCADA и сенсорных сетей путем их интеграции, а также гибридизации со знаниями экспертов. Предложена архитектура информационной системы тактической группы, обеспечивающая ситуационную осведомленность на всем тактическом спектре боевых операций и принятие решений в условиях жестких временных ограничений. Подобная система может рассматриваться как один из основных ключевых факторов для создания превосходства над противником. Приведен обзор возможных вариантов применения RWSN в военных областях. Показана их высокая эффективность при выполнении боевых задач. **Практическая значимость.** Обоснована целесообразность применения полученных результатов при проектировании RWSN.

Сенсорные сети; сенсорные узлы; паттерны; инженерия знаний; ситуационная осведомленность.

G.P. Vinogradov

KNOWLEDGE-BASED INFORMATION TECHNOLOGIES IN THE ARMED FORCES

The subject of the study is the methods of intellectualization of automated systems and complexes in the Armed Forces of the Russian Federation based on the use of knowledge-based models and technologies, as well as reactive wireless sensor networks (RWSN), which have a great prospect of application, especially when conducting local special operations by mobile tactical groups. The relevance of the work is due to the fact that the dynamics of a modern clash involves the concentration of all types of information when making decisions that are adequate to the combat situation, which makes it possible to implement a new approach to the conduct of hostilities based on the integration of systems of all levels and types of troops. The form of integration is the tactical group. The implementation of the approach requires the construction of a knowledge cycle when making decisions, including the stages of perception, representation, awareness and their replenishment based on new architectures for the construction and use of information technologies. The aim of the work is to study the possibility of building an information system for providing data for one of the key stages - the stage of acquiring knowledge from distributed sources when using responsive sensor networks as the primary element of the system. Main results. Studies have shown that the most effective solution is based on the use of SCADA tools and sensor networks through their integration, as well as hybridization with expert knowledge. The architecture of the tactical group information system is proposed, which provides situational awareness on the entire tactical spectrum of combat operations and decision-making under severe time constraints. Such a system can be considered as one of the main key factors for creating superiority over the enemy. An overview of possible applications of RWSN in military areas is given. Their high efficiency in performing combat missions is shown. Practical significance. The expediency of applying the results obtained in the design of RWSN is substantiated.

Sensor networks; sensor nodes; patterns; knowledge engineering; situational awareness.

Введение. Современные информационные технологии позволяют концентрировать все виды информации при принятии адекватных боевой ситуации решений и реализовать новый подход к ведению боевых действий. Их роль при выполнении боевых задач тактической группой должна рассматриваться с позиции влияния на человека. Они должны помогать командиру, упрощая и повышая эффективность его работы в условиях дефицита времени на принятие решений. Командир при этом должен и обязан быть элементом системы управления (*human in the loop control*), в том числе, и при использовании робототехнических систем – РТК (далее агентов). Сложность и многочисленность ситуаций, возникающих при выполнении задач, делают практически невыполнимой задачу их выявления априори по результатам испытаний и формирования на их основе базы знаний агентов. Следовательно, необходимо реализовать схему мониторинга для выявления классов ситуаций и успешных способов действия для формирования моделей поведения (паттернов) на основе данных, получаемых в реальных условиях.

Поведение агентов на основе формальных моделей исследуется в теории агентов, теории принятия решений, поведенческой робототехники, в теории искусственного интеллекта и ряда других направлений [1–4]. Отметим, что формальная теория выбора [5] развивалась путем абстрагирования от субъективных факторов, что привело к созданию нормативной теории принятия решений «идеальным» субъектом. В нормативной теории принятия решений считалось, что процесс принятия решений является неконтролируемым фактором. Логика развития проблемы выбора привела к необходимости изучения, как и почему в реальных условиях происходит «отход» субъекта от нормативной рациональности [5–7]. Однако, не смотря на обилие работ в данном направлении [8, 9] проблема остается актуальной.

Постановка задачи. Рассматривается задача построения архитектуры интеллектуальной информационной системы, реализующей цикл анализа, извлечения и использования знаний с последующей фиксацией успешного опыта в нормативных документах, в которой человек рассматривается как активный элемент. Ее решение связывается с: 1) разработкой модели поведения человека на основе субъективных представлений о ситуации выбора; 2) проектированием на этой основе архитектуры интеллектуальной информационной системы, где источником данных являются беспроводные сенсорные сети. Предлагаемый подход направлен на решение следующих проблем: 1) как формируются правила выбора человеком; 2) как он проверяет их адекватность и полезность в конкретных ситуациях целеустремленного состояния; 3) как формируются представления человека в ситуации выбора.

Архитектура интеллектуальной системы управления. Система управления тактической группой имеет иерархическую структуру. Верхний уровень, реализуемый командиром, соответствует таким свойствам, как выживание, безопасность, выполнение обязательств миссии, накопление и корректировка базы знаний в виде эффективных паттернов поведения в условиях жестких временных ограничений. Объектом управления для нее является подразделения, имеющие в своем составе РТК. Командир отрабатывает паттерны поведения в типовых ситуациях (ТС) при выполнении миссии, рассчитывает последовательности состояний $y(t)$, определяет задачи подразделениям и выполняет расчет оценки удельной эффективности отработки фактических ситуаций $V(t)$ и анализ выполнения миссии по правилу: $\mu A(\text{миссия выполнена}) \geq \alpha_V^*$. Подход к моделированию поведения на основе паттернов аналогичен подходу в прагматической эпистемологии, согласно которому знания рассматриваются как множество теорий или моделей, каждая из которых представляет собой описание поведения при решении определенного класса задач. Теории, описывающие класс явлений, могут «перекрываться», и возникает проблема выбора способа решения задач в конкретной предметной области. Критерием выбора становится ожидаемая удельная ценность возможного результата [6]. Процесс получения знания в предлагаемой схеме аналогичен процессу биологической эволюции. Следовательно, критерием истинности знания искусственной сущности является «*приспособленность*» знания для решения задач предметной области.

Модель нечеткого описания паттерна поведения. Поведение в ТС связано с выбором, который происходит в ситуации целеустремленного состояния [10]. Рассмотрим модель поведения в виде нечеткого описания модели ситуации выбора. Возможный вариант такой конструкции предложено строить путем «парадигмальной прививки» идей, транслируемых из других наук, например [7, 10].

Целеустремленное состояние складывается из следующих компонент:

- ♦ Субъект, осуществляющий выбор (агент), $k \in K$.

♦ Окружение выбора (S), под которым понимается множество элементов и их существенных свойств, изменение в любом из которых может стать причиной или продуцировать изменение состояния целеустремленного выбора. Часть этих элементов может не являться элементами системы и образует внешнюю среду для нее. Воздействие внешней среды описывается с помощью некоторого набора переменных.

♦ Доступные способы действий $c_j^k \in C^k$, $j = \overline{1, n}$ k -го агента, которые ему известны и могут быть использованы для достижения i -го результата (их еще называют альтернативами). Каждый способ этого множества характеризуется набором параметров, которые называются управляющими воздействиями.

♦ Возможные при окружении S результаты существенные для агента – $o_i^k \in O^k$, $i = \overline{1, m}$. Оценка результатов производится с помощью некоторого набора параметров, которые называются выходными параметрами ситуации целеустремленного состояния.

♦ Способ оценки свойств получаемых результатов в результате выбора способа действия. Очевидно, что оценки результата должны отражать ценность результата для агента и тем самым отражать его индивидуальность.

♦ Ограничения, отражающие требования, накладываемые ситуацией выбора на выходные переменные и управляющие воздействия.

♦ Модель предметной области, которая представляет собой множество соотношений, описывающих зависимость управляющих воздействий, параметров и возмущений с выходными переменными.

♦ Модель ограничений агента. Она подробно описана в работе [10]. Независимо от используемого вида описания ограничений будем предполагать наличие у агента определенной степени уверенности о возможности изменения части ограничений в сторону расширения множества возможных вариантов (альтернатив) выбора.

Введем для описанных компонент меры, которые будут использоваться для оценки целеустремленного состояния.

1. Будем считать, что агент способен выделять факторы – характеристики окружения $X^k = \{x_i^k, i = \overline{1, N}\}$. Влияние каждого фактора агент оценивает с помощью лингвистической переменной степень влияния фактора $\mu_x^k(x_i^k) : x_i^k \rightarrow [0, 1]$. Введем параметр, с помощью которого агент оценивает свою ситуационную осведомленность в ситуации целеустремленного состояния

$$Es^k = \frac{\sum_{i=1}^N \mu_x^k(x_i^k) x_i^k}{\sum_{i=1}^N \mu_x^k(x_i^k)}.$$

Можно определить следующее ограничение: $\sigma^k(Es^k) \geq \sigma_0^k$, где σ_0^k – некоторый пороговый уровень осведомленности агента от использования собственных источников информации.

2. Будем предполагать, что для описания влияния выделенных факторов на результаты o_i^k , $i = \overline{1, m}$ агент использует аппроксимацию в виде продукционных правил, которые имеют вид:

Если x_1 есть A_{r1}^k и если x_2 есть A_{r2}^k и ... и если x_N есть A_{rN}^k , то

$$o_i^k = f_{ir}^k(x_1, x_2, \dots, x_N), r = \overline{1, R}, i = \overline{1, m}, \quad (1)$$

где R – количество продукционных правил, r – номер текущего продукционного правила, $o_i^k = f_{ir}^k(x_1, x_2, \dots, x_N)$ – четкая функция, отражающая представление агента о причинно-следственной связи входных факторов с возможными результатами для r -го правила; A_{ri}^k – нечеткие переменные, определенные на $X^k = \{x_i^k, i = \overline{1, N}\}$.

В качестве функции $f_{ir}^k(\bullet)$ могут использоваться, например, как математические модели, словесное описание, графики, таблицы, алгоритмы т.д.

Поскольку c_j^k является функцией параметров состояния внешней среды, принимаемых во внимание, свойств системы, то набор предположений об их возможных значениях образует сценарий возможного состояния внешней среды, функциональных возможностей системы. Реализация сценариев, например, с помощью правил (1) позволяет сформировать представление о возможных результатах o_i^k . Неравнозначность при выборе способа действия можно описать как степень уверенности необходимости его применения для получения результата o_i^k . Эту оценку можно описать лингвистической переменной

$$\psi_j^k = \psi_j^k(c_j^k \in C^k \mid s_i \in S \rightarrow o_i^k) \in [0,1].$$

Эта мера является индивидуальной характеристикой агента, которая может меняться в результате обучения и приобретения опыта, а также в результате коммуникационного взаимодействия агентов между собой и с оператором. Поэтому $\psi_j^k = \psi_j^k(c_j^k \in C^k \mid s_i \in S, I^k \rightarrow o_i^k) \in [0,1]$, где I^k – информация, которой располагает агент на момент времени tk .

3. Выбор способа действий c_j^k при принятии решения агентом в ситуации целеустремленного состояния для достижения результата o_i^k связан, как показано в [10], с построением количественной оценки свойств выбираемого решения. Список свойств и параметров формируется на основе опыта, знания, интеллекта и глубины понимания им ситуации принятия решения. Правильное описание свойств и параметров способа действий – одно из основных условий того, что выбор c_j^k приведет к достижению результата o_i^k . Выбор перечня свойств и параметров их характеризующих целиком зависит от агента (его индивидуальности). Представим возможные результаты при заданном окружении выбора агента в виде $o_i^k \in \{o_{ij}^k, j = \overline{1, J}\}$, где o_{ij}^k – множество возможных результатов при выборе j -го способа действия $i \in I$ – множество результатов, принимаемых во внимание k -м агентом. Очевидно, что $o_{ij}^k = o_{ij}^k(s_i), s_i \in S$.

4. Ценность результатов o_i^k . Поскольку $o_{ij}^k = o_{ij}^k(s_i)$, а $s_i = S(c_j^k)$, то ценность i -го вида результата можно оценить следующей лингвистической переменной $\varphi_i^k(o_i^k(c_j^k)) \in [0,1]$. Функция $\varphi_i^k(o_i^k(c_j^k))$ для результата o_i^k будет монотонным преобразованием, так как $\varphi_i^k(\bullet)$ переводит область значений функции $o_i^k(c_j^k)$ в множество значений лингвистической переменной. Так как базовому значению лингвистической переменной соответствует нечеткие переменные, то это преобразование переводит область значений функции o_i^k в область значений базовых нечетких переменных.

5. Эффективность способа действия с точки зрения результата – это уверенность получения данного результата этим способом действия при известных (или предполагаемых) затратах на его реализацию. Степень уверенности E_{ij}^k в том, что некоторый способ действия c_j^k будет приводить к результату o_i^k в окружении S , если агент выберет именно его: $E_{ij}^k = E_{ij}^k(o_i^k | A \text{ выберет } c_j^k \text{ в } S) \in [0, 1]$.

Она является лингвистической переменной и выражает индивидуальную оценку агента последствий выбора с точки зрения затрат.

Модель выбора при реализации паттерна. Введенные три лингвистические переменные $\mu_i^k(x_i^k)$, ψ_{ij}^k , E_{ij}^k образуют модель представлений агента о ситуации целеустремленного выбора.

Поскольку c_j^k можно описать в терминах X_i^k и агент имеет представление о зависимости в виде базы правил, которая связывает c_j^k и ценность возможного i -го результата o_i^k , то можно определить ценность целеустремленного состояния по i -му результату o_i^k для k -го агента в соответствии с правилом [10, 14]:

$$E\varphi_i^k = \frac{\sum_{j \in J} \varphi_{ij}^k(o_i^k(c_j^k)) \bullet o_{ij}^k(s^k)}{\sum_{j \in J} \varphi_{ij}^k(o_i^k(c_j^k))}.$$

По аналогии можно оценить ценность целеустремленного состояния для k -го агента по эффективности для i -го вида результата:

$$EE_i^k = \frac{\sum_{j \in J} EE_{ij}^k(o_i^k(c_j^k)) \bullet \psi_i^k(c_j^k)}{\sum_{j \in J} \psi_i^k(c_j^k)}.$$

Оценка агентом желательности целеустремленного состояния по i -му результату и эффективности его достижения в ситуации выбора выполняется по правилу $\chi_{i1}^k = \chi_1^k(E\varphi_i^k) \in [0,1]$, $\chi_{i2}^k = \chi_2^k(EE_i^k) \in [0,1]$ [5]. Можно определить следующие ограничения: $\sum_i \chi_{i1}^k(E\varphi_i^k) \geq \chi_1^0$ и $\sum_i \chi_{i2}^k(EE_i^k) \geq \chi_2^0$, где χ_1^0 и χ_2^0 – ожидания агента

от выполнения миссии, которые отражают баланс между затратами и достигнутыми результатами o_i^k . Моделью ситуации выбора агента в ТС будем называть множество структурных и функциональных свойств, которыми по его убеждению обладает ситуация выбора и которые по его убеждению влияют на его удовлетворенность или неудовлетворенность ситуацией.

Есть еще одна группа факторов, которые определяют реализацию результата: воля, склонность к рискам, самооценка, мотивированность. Эти факторы позволяют говорить о таком показателе, как уверенность $\rho_i^k(o_i^k)$ в получении результата o_i^k в ситуации выбора при использовании одного из возможных способов действия $c_j^k \in C^k$.

В соответствии с гипотезой о рациональном поведении агент формирует решение в соответствии с

$$\begin{aligned} P_i^k(s \in S) &= \text{Arg max}_{c_j^k} (\sum_{j \in J} E\varphi_i(o_i^k(c_j^k)) - EE_i^k(o_i^k(c_j^k))) \\ c_j^k &\in C^k(I_t^i), I_t^i \subseteq M, o_i^k \in O^k \\ \sum_i \chi_{i1}^k(E\varphi_i^k) &\geq \chi_1^0, \sum_i \chi_{i2}^k(EE_i^k) \geq \chi_2^0 \\ \sigma^k(Es^k(X)) &\geq \sigma_0^k \end{aligned} \quad (2)$$

Поскольку выбор связан с представлениями агента о ситуации выбора, то в (2) необходимо включить базу знаний (1).

Соотношения (2) описывают паттерн поведения агента (киберфизической системы) при стремлении достичь i -го результата. Агент рассматривает паттерн (2) как способ описания задачи, принцип и алгоритм ее решения, которая часто возникает, причем таким образом, что ее решение можно использовать много раз ничего не изобретая заново.

Показатели ценность целеустремленного состояния по результату $E\varphi_i^k$ и ценность целеустремленного состояния по эффективности EE_i^k являются элементами интегрального показателя ценности целеустремленного состояния для k -го индивида – $\sum_i E\varphi_i^k \bullet EE_i^k$. Учитывая его степень уверенности в получении результата ζ_i^k , получить показатель ожидаемой удельной ценности

$$EV_k = \frac{\sum_i (E\varphi_i^k - EE_i^k) \bullet \zeta_i^k}{\sum_i \zeta_i^k} \quad (3)$$

Это означает, что если два субъекта находятся в одной и той же ситуации выбора, то разница в их поведении должна проявляться в значениях оценок удельной ценности по результату и эффективности и в степени уверенности достижения цели.

Соотношения (2–3) означают, что, когда агент хочет получить какой-либо результат, то располагает для этого несколькими альтернативными способами достижения с разной эффективностью, которыми он может попытаться достичь желаемого результата, и его уверенность в получении желаемого результата значительна. Такая модель индивидуального поведения автономного агента предполагает формирование базы знаний путем обучения на основе экспериментального опыта, что по-

зволяет реализовать эволюцию «кооперативного интеллекта» благодаря использованию искусственного когнитивного процесса, аналогичного тому, что имеет место у естественных существ [6, 10]. Отметим, что эта возможность отсутствует в системах на основе знаний, так как в ней отсутствует компьютерная модель адаптивного поведения. Таким образом, общие принципы мышления агента являются вполне традиционными и включают следующие три основные фазы: а) восприятие – получение данных и построение модели сцены в загруженном мире; б) познание – анализ и формирование сценария действий субъекта для достижения поставленных целей; в) исполнение намеченного сценария с постоянным сопоставлением ожидаемых и наблюдаемых результатов. В отличие от других подобных систем, в рассматриваемой системе реализация этих фаз осуществляется через два базовых механизма: абстрагирования и конкретизации, тесно связанных между собой.

Описание компонент паттерна соответствует языку программирования, где элементарные структуры описывают управление процессом реализации паттерна.

Сетевые информационные системы в вооруженных силах. Сетевые тактические информационные системы, обеспечивающие ситуационную осведомленность во всем стратегическом спектре боевых операций и принятие решений в условиях жестких временных ограничений, основа для превосходства над противником. Это качество достигается путем обработки максимально возможной совокупности мультимедийных и мультиспектральных данных в реальном времени. Эта способность позволяет реализовать адаптивное планирование боевых задач, вести целеуказание, оценку боевых потерь, оценивать надежность распределенных мобильных средств связи и т.п., как на уровне зоны проведения боевых операций, так и на уровне театра военных действий (ТВД). Для этого мобильное боевое информационное оборудование, тактические сетевые средства связи и спешенные оперативные средства управления, интегрируются с регулируемыми, устойчивыми и прозрачными для пользователя глобальными сетями, что соответствует философии «солдат как система».

Исследования возможности использования сенсоров совместно с беспроводной сетью положили начало развитию нового вида коммуникационных сетей под названием беспроводные сенсорные сети (БСС или англ. WSN) [11, 12]. БСС рассматриваются как основа для сбора и обработки исходной информации для военных приложений. Прогресс в миниатюризации физических датчиков, встроенных микроконтроллеров и радиоинтерфейсов и интеграция их на одном чипе, развитие теории и практики беспроводных сетей привели к появлению нового поколения беспроводных сенсорных сетей. Они стали рассматриваться как одна из технологических основ *окружающего интеллекта*, способными собирать огромное количество информации из окружающей среды. В настоящее время сенсорные узлы оснащены достаточно мощным бортовым процессором, что позволяет использовать их вычислительные мощности для локального выполнения простых вычислений, частичной обработке и передачи данных, также принятию решений в зоне своей ответственности.

Примерная архитектура WSN военного назначения. Вариант многоуровневой архитектуры WSN для военных приложений может быть построен с использованием сенсорных узлов с радиосвязью ближнего действия и беспроводных шлюзов с беспроводной связью на большие расстояния [12, 13].

Сенсорные узлы находятся на первом уровне иерархии, где они выполняют основные операции мониторинга и воздействия на среду. Они оснащены встроенными преобразователями, такими как акустические, сейсмические, пассивные инфракрасные (PIR), магнитные и пьезоэлектрические и др. для обнаружения событий, представляющих интерес. При этом они способны подтвердить обнаружение,

используя перекрестный поиск и выполнить классификацию. Каждый узел датчика в сети действует как маршрутизатор, пересылая пакеты данных на соседние узлы. Они формируют сеть «на лету» и поддерживают единый радиointерфейс для двунаправленной связи между узлами с датчиками и узлом слияния.

На втором уровне иерархии узлы слияния обеспечивают более сложные функции, такие как синхронизация базы данных, формирование кластера, формирование логики работы приложения и управление. Узлы слияния получают информационные запросы от пользователей, отслеживают команды, отвечают на запросы, формируют задачи узлам датчиков, собирают информацию и сохраняют историю событий, произошедших в зоне ответственности, охватываемой узлом слияния. Узлы слияния могут выступать в качестве исполнительных механизмов в сети, например, для запуска встроенной или близлежащей камеры для получения изображений, близких к реальному времени и пр. В отличие от типичной WSN, узлы слияния на втором уровне иерархии также образуют специальную сеть, обеспечивающую расширенный охват для более масштабной поддержки развертывания. Они могут быть оснащены несколькими радиointерфейсами для связи с сенсорными узлами и другими узлами слияния, а также для передачи данных на большие расстояния на узел управления. Сенсорные узлы и узлы слияния образуют кластеры, которые соединяются между собой через головные узлы слияния для создания автоматической наземной сенсорной системы.

Узел управления на третьем уровне обеспечивает оперативный контроль и управление системой. Узел слияния на этом уровне использует канал дальней связи для связи с узлом управления. Авторизованные пользователи могут в соответствии с правом доступа получать доступ к системе с узлов слияния данных на уровне 2 или с узла управления на уровне 3. Используя портативное устройство, ноутбук пользователь с надлежащей авторизацией может запрашивать события и подписываться на них, получать оповещения и просматривать историю действий системы.

Система управления, использующая паттерны Жесткие требования в ряде предметных областей к времени реагирования, вычислительным ресурсам предполагают использование сравнительно простых алгоритмов, построенных путем описания лучшего опыта человека при выполнении функциональных задач. Как было показано, что такое описание можно реализовать, если выявить классы типовых ситуаций и успешные способы действия в реальных условиях для формирования моделей поведения (паттернов). В работах [10, 14] дана следующая обобщенная логическая схема описания паттерна

Имя паттерна:

$$\begin{aligned} &\text{так как [мотивы } M] \\ &\text{поскольку [цели } G] \\ &\text{если [предусловия } U'] \\ &\text{то способ действия } r_q(t) \\ &\text{из-за чего [постусловие } U''] \\ &\dots \\ &\text{есть альтернатива } [r_p(t)] \end{aligned} \quad (4)$$

В этой модели все составляющие, кроме логических связей, могут представлять собой языковые конструкции на естественном или естественно-профессиональном языке. Следовательно, модель (1) – типовая естественно-языковая модель паттерна. Формальная модель паттерна поведения в типовой ситуации приведена в [17]. Там же показано, что модель предметной области и модель принятия решений в условиях дефицита времени можно формализовать с помощью нечетких продукционных сетей. Мотивы в модели (1) – это причины, определяемые потребностями и/или обязательствами. Они побуждают агента к

активности, в рамках которой потребовался паттерн. Описание мотивов и целей в модели (1) представляет контекст повторного применения паттерна с позиции необходимости и возможности его применения (потребности → мотивы → цели). Контекст определяется «ожидаемыми» постусловиями. Постусловия связаны с целями, затребовавшими паттерн, но отражают их в форме возможного состояния, к которому приведет применение паттерна. Цели определяют желаемое состояние и могут быть причиной, определяющей необходимость и полезность стремления к их достижению. Способ действия представляет собой код как естественно-языковое описание схемы действия, реализация которой приводит к выполнению паттерна. Такое описание имеет вид методик, реализованных на языке программирования или в форме уставов. Набор моделей или паттернов поведения, образуют опыт или базу знаний его носителя.

Реализация и эксперименты. Для реализации описанного подхода разработан программно-технический комплекс, позволяющий производить моделирование среды (контекста) и паттерна поведения агента [16,17]. Выделены четыре базовые позиции моделирования, с которых осуществляется сбор и интерпретация информации для идентификации модели паттерна поведения. Первая позиция (собственная точка зрения человека), вторая позиция (восприятие ситуации с точки зрения экспериментатора), третья позиция (рассмотрение ситуации с точки зрения возможности использования формальных процедур), четвертая позиция восприятия подразумевает рассмотрение ситуации с точки зрения надсистемы, задействованной в ситуации. Интегрирование точек зрения и их согласование позволяет агенту расширить свое понимание ситуации целеустремленного состояния и паттерна поведения в ней.

Моделирование из первой позиции заключается в том, чтобы человек, обладающий опытом выполнения миссии, реализует свое поведение, осуществляя голосовое управление «аватаром» в трехмерном пространстве. Полученный управляющий код используется для вызова соответствующей процедуры для изменения поведения аватара. Для формирования сложного поведения аватар снабжен набором элементарных паттернов поведения: и базой знаний, с помощью которой он реализует так называемое реактивное поведение. Таким образом, моделируются функции лимбической системы, которая играет роль среднего мозга человека. С ее помощью мозг обнаруживает так называемые «значительные» стимулы, угрожающие выживанию, и посылает информацию телу, чтобы оно могло реагировать на них надлежащим образом, минуя сознание и используя врожденные реакции. И только потом изменения в теле фиксируются сознанием, вызывая соответствующую эмоциональную оценку. Например, реакции страха или гнева начинаются в лимбической системе, что вызывает диффузное влияние на симпатическую нервную систему (она регулирует расход энергоресурсов и мобилизует организм в стрессовых ситуациях). Реакция организма, известная как «бей или беги», готовит человека к угрожающим ситуациям путем увеличения частоты его сердечных сокращений, дыхания или кровяного давления. В результате человек может в зависимости от обстоятельств защищаться или бежать. Аналогичным механизмом снабжен и аватар. Применение описанной системы проводилось при подготовке подразделения на выполнение боевых задач. Слаженность личного состава повысилась в среднем на 18–20%, эффективность выполнения задач на 8–10%.

Заключение. Для повышения возможностей применения WSNs в военных приложениях исследования и разработки должны быть направлены на создание: отечественных одно кристаллических процессоров, разработку алгоритмов идентификации нескольких одновременных событий; классификации объектов и событий в задачах обнаружения; миниатюризации и интеграции различных типов датчиков,

повышение их надежности; форматов и стандартов для выходов датчиков и коммуникаций [18–20]. Востребованными проблемами являются: разработка алгоритмов Sensor Data Mining на основе методов искусственного интеллекта и интеллектуального анализа данных, синтеза и генерации знаний на основе бортовой осведомленности и онтологий. Для повышения жизненного цикла WSNs требуется разработка новых источников питания, и энергоэффективных протоколов коммуникации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Городецкий В.И., Самойлов В.В., Троцкий Д.В. Базовая онтология коллективного поведения автономных агентов и ее расширения // Известия РАН. Теория и системы. – 2015. – № 5.
2. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Методы и модели коллективного управления в группах роботов. – М.: Физматлит, 2009. – 280 с.
3. Red'ko V.G., Anokhin K.V., Burtsev M.S., Manolov A.I., Mosalov O.P., Nepomnyashchikh V.A., Prokhorov D.V. Project «Animat Brain»: Designing the animat control system on the basis of the functional systems theory / In: Butz M.V., Sigaud O., Pezzulo G., Baldassarre G. (Eds.) // Anticipatory Behavior in Adaptive Learning Systems: From Brains to Individual and Social Behavior. LNAI 4520. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag. 2007. – P. 94-107.
4. Жданов А.А. Метод автономного адаптивного управления // Известия академии наук. Теория и системы управления. – 1999. – № 5. – С. 127-134.
5. Современные технологии. Киберфизические системы: учеб. пособие / авт.-сост.: Е.И. Громаков, А.А. Сидорова. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2021. – 166 с.
6. Городецкий В.И. Поведенческие модели кибер-физических систем и групповое управление: основные понятия // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 1. – С. 144-162.
7. Канеман Д., Словик П., Тверски А. Принятие решений в неопределенности: Правила и предубеждения. – Харьков: Гуманитарный центр, 2005.
8. Виноградов Г.П., Шматов Г.П., Борзов Д.А. Формирование представлений агента о предметной области в ситуации выбора // Программные продукты и системы. – 2015. – № 2 (110). – С. 83-94.
9. Куприяновский В.П., Намиот В.Е., Сиягов С.А. Киберфизические системы как основа цифровой экономики. // International Journal of Open Information Technologies. – 2019. – No. 4. – P. 31-42.
10. Виноградов Г.П., Прохоров А.А., Шепелев Г.А. Паттерны в системах управления автономными робототехническими комплексами // Мягкие измерения и вычисления. – 2020. – № 12.
11. Winkler M., Tuchs K.-D., Hughes K., and Barclay G. Theoretical and practical aspects of military wireless sensor networks // in Journal of Telecommunications and Information Technology. – 2008. – No. 2. – P. 37-45.
12. Lamont L., Toulgoat M., Déziel M., and Patterson G. Tiered wireless sensor network architecture for military surveillance applications // Proc. of the 5th International Conference on Sensor Technologies and Applications, SENSORCOMM 2011, Nice, France, August 21-27, 2011.
13. Cannon P.S. and Harding C.R. Future military wireless solutions // Ch. 8 in Wireless Communications: The Future. Editor William Webb, John Wiley & Sons, 2007.
14. Виноградов Г.П., Емцев А.С., Федотов И.С. Беспроводные сенсорные сети в защищаемых зонах // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 1. – С. 19-30.
15. Tafa Z. and Milutinović V. Evaluating and improving the area coverage and detectability in the large-scale surveillance networks // IEEE Communications Surveys & Tutorials (submitted).
16. Vinogradov G.P. Patterns in Intelligent Systems. Russian Advances in Fuzzy Systems and Soft Computing // Selected contributions to the 8-th International Conference on Fuzzy Systems, Soft Computing and Intelligent Technologies (FSSCIT-2020), June 29 – July 1, 2020, Smolensk, Russia. CEUR Workshop Proceedings, 2020, 2782. – P. 208-216.
17. Виноградов Г.П., Конюхов И.А., Шепелев Г.А. Подход к проектированию программного обеспечения систем управления искусственными сущностями // Программные продукты и системы. – 2021. – № 1 (34).
18. Merrill W.M. et al. Defense systems: self-healing land mines // Ch. 18 in Wireless Sensor Networks: A System Perspective, Editors N. Bulusu and S. Jha, Artech House, 2005.
19. Naz P., Hengy S., Hamery P. Soldier detection using unattended acoustic and seismic sensors // SPIE, Orlando, USA, 2012, 8389-28.
20. Rippin B. Pearls of wisdom: wireless networks of miniaturized unattended ground sensors // SPIE, Orlando, USA, 2012, 8388-17.

REFERENCES

1. Gorodetskiy V.I., Samoylov V.V., Trotskiy D.V. Bazovaya ontologiya kollektivnogo povedeniya avtonomnykh agentov i ee rasshireniya [Basic ontology of collective behavior of autonomous agents and its extensions], *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences, Theory and Systems], 2015, No. 5.
2. Kalyaev I.A., Gayduk A.R., Kapustyan S.G. Metody i modeli kollektivnogo upravleniya v gruppakh robotov [Methods and models of collective management in groups of robots]. Moscow: Fizmatlit, 2009, 280 p.
3. Red'ko V.G., Anokhin K.V., Burtsev M.S., Manolov A.I., Mosalov O.P., Nepomnyashchikh V.A., Prokhorov D.V. Project «Animat Brain»: Designing the animat control system on the basis of the functional systems theory, In: Butz M.V., Sigaud O., Pezzulo G., Baldassarre G. (Eds.), *Anticipatory Behavior in Adaptive Learning Systems: From Brains to Individual and Social Behavior. LNAI 4520*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2007, pp. 94-107.
4. Zhdanov A.A. Metod avtonomnogo adaptivnogo upravleniya [The method of autonomous adaptive control], *Izvestiya akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya* [Proceedings of the Academy of Sciences. Theory and control systems], 1999, No. 5, pp. 127-134.
5. Sovremennyye tekhnologii. Kiberfizicheskie sistemy: ucheb. posobie [Modern technologies. Cyberphysical systems: a textbook], authors-compilers: E.I. Gromakov, A.A. Sidorova. Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2021, 166 p.
6. Gorodetskiy V.I. Povedencheskie modeli kiber-fizicheskikh sistem i gruppovoe upravlenie: osnovnye ponyatiya [Behavioral models of cyber-physical systems and group management: basic concepts], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 1, pp. 144-162.
7. Kaneman D., Slovik P., Tverski A. Prinyatie resheniy v neopredelennosti: Pravila i predubezhdeniya [Decision-making in uncertainty: Rules and Biases]. Khar'kov: Gumanitarnyy tsentr, 2005.
8. Vinogradov G.P., Shmatov G.P., Borzov D.A. Formirovanie predstavleniy agenta o predmetnoy oblasti v situatsii vybora [Formation of agent's ideas about the subject area in a choice situation], *Programmnye produkty i sistemy* [Software products and systems], 2015, No. 2 (110), pp. 83-94.
9. Kupriyanovskiy V.P., Namiot V.E., Sinyagov S.A. Kiberfizicheskie sistemy kak osnova tsifrovoy ekonomiki [Cyber-physical systems as the basis of the digital economy], *International Journal of Open Information Technologies*, 2019, No. 4, pp. 31-42.
10. Vinogradov G.P., Prokhorov A.A., Shepelev G.A. Patterny v sistemakh upravleniya avtonomnymi robototekhnicheskimi kompleksami [Patterns in control systems of autonomous robotic complexes], *Myagkie izmereniya i vychisleniya* [Soft measurements and calculations], 2020, No. 12.
11. Winkler M., Tuchs K.-D., Hughes K., and Barclay G. Theoretical and practical aspects of military wireless sensor networks, in *Journal of Telecommunications and Information Technology*, 2008, No. 2, pp. 37-45.
12. Lamont L., Toulgoat M., Déziel M., and Patterson G. Tiered wireless sensor network architecture for military surveillance applications, *Proc. of the 5th International Conference on Sensor Technologies and Applications, SENSORCOMM 2011, Nice, France, August 21-27, 2011*.
13. Cannon P.S. and Harding C.R. Future military wireless solutions, *Ch. 8 in Wireless Communications: The Future*. Editor William Webb, John Wiley & Sons, 2007.
14. Vinogradov G.P., Emtsev A.S., Fedotov I.S. Besprovodnye sensornye seti v zashchishchaemykh zonakh [Wireless sensor networks in protected areas], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. 1, pp. 19-30.
15. Tafa Z. and Milutinović V. Evaluating and improving the area coverage and detectability in the large-scale surveillance networks, *IEEE Communications Surveys & Tutorials* (submitted).
16. Vinogradov G.P. Patterns in Intelligent Systems. Russian Advances in Fuzzy Systems and Soft Computing, *Selected contributions to the 8-th International Conference on Fuzzy Systems, Soft Computing and Intelligent Technologies (FSSCIT-2020), June 29 – July 1, 2020, Smolensk, Russia. CEUR Workshop Proceedings, 2020, 2782*, pp. 208-216.
17. Vinogradov G.P., Konyukhov I.A., Shepelev G.A. Podkhod k proektirovaniyu programmno obespecheniya sistem upravleniya iskusstvennymi sushchnostyami [An approach to the design of software for artificial entity management systems], *Programmnye produkty i sistemy* [Software products and systems], 2021, No. 1 (34).
18. Merrill W.M. et al. Defense systems: self-healing land mines, *Ch. 18 in Wireless Sensor Networks: A System Perspective*, Editors N. Bulusu and S. Jha, Artech House, 2005.

19. Naz P., Hengy S., Hamery P. Soldier detection using unattended acoustic and seismic sensors, SPIE. Orlando, USA, 2012, 8389-28.
20. Rippin B. Pearls of wisdom: wireless networks of miniaturized unattended ground sensors, SPIE. Orlando, USA, 2012, 8388-17.

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

Виноградов Геннадий Павлович – Тверской государственный технический университет; e-mail: wgp272ng@mail.ru; г. Тверь, Россия; д.т.н.; профессор; зав. лабораторией НИИ ЦПС; член РАИИ; член РАНСМВ.

Vinogradov Gennady Pavlovich – Tver State Technical University; e-mail: wgp272ng@mail.ru; Tver, Russia; dr. of eng. sc.; professor; head of the laboratory of the Research Institute of Centerprogram Systems; member of the Russian Association of Artificial Intelligence, member of the Russian Association of Fuzzy Systems and Soft Computing.

УДК 28.23.24: 28.23.27: 004.82

DOI 10.18522/2311-3103-2023-1-65-76

С.М. Соколов

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТЕПЕНИ АВТОНОМНОСТИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

На фоне всё возрастающих потребностей в робототехнических комплексах с повышенной степенью автономности и намечающемуся переходу к их широкому использованию актуализируется потребность в технологиях оценки качества и сравнения степени автономности таких устройств. В статье описывается текущее состояние вопросов оценивания и сравнения степени автономности беспилотных комплексов. Приводятся известные оценки степени автономности. В существующей системе классификации выделяется автономность информационная и интеллектуальная, которые рассматриваются в тесной связи. Предлагаются решения, дополняющие известные подходы к общему определению степени автономности и позволяющие формировать количественные оценки степени автономности роботов в различных областях народного хозяйства. Рассматриваются технологии, направленные на автоматизацию получения этих оценок. В частности, обсуждается возможность использования хорошо освоенного отечественными исследователями инструментария нечётких когнитивных карт для определения степени автономности в условиях неполноты информации, наличия качественной информации и влияния человеческого фактора. Обосновывается необходимость развития онтологий предметных областей для обеспечения возможности сравнения степени автономности различных робототехнических комплексов и их группировок. В целом, указывается подход, который направлен на систематизацию оценок качества и эффективности применения автономных роботов, и может позволить в короткие сроки подготовить методическую базу широкого внедрения робототехники. Одним из положительных следствий такого системного подхода является унификация формулировок и решений (модулей) в задачах информационного обеспечения РТК, что, в свою очередь облегчает взаимодействие между пользователями, заказчиками и разработчиками. Разработчикам РТК систематизированный подход даёт возможность повторного использования удачных решений в различных комбинациях. В заключении выражаются пожелания к сообществу отечественных робототехников в объединении усилий к унификации терминологии, описании постановок задач и метрик интеллектуальности робототехнических комплексов.

Автономность роботов; степень автономности; онтологии робототехники; нечёткие когнитивные карты; унификация решений в области автономии.

S.M. Sokolov

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE DEGREE OF ROBOTICS COMPLEX AUTONOMY

Against the background of the ever-increasing needs for robotic complexes with an increased degree of autonomy and the planned transition to their widespread use, the need for technologies for assessing the quality and comparing the degree of autonomy of such devices is being actualized. The article describes the current state of issues of evaluation and comparison of the degree of autonomy of unmanned complexes. Known estimates of the degree of autonomy are given. In the existing classification system, informational and intellectual autonomy are distinguished, which are considered in close connection. Solutions are proposed that complement the known approaches to the general definition of the degree of autonomy and allow us to form quantitative estimates of the degree of autonomy of robots in various areas of the national economy. Technologies aimed at automating the receipt of these estimates are considered. In particular, the possibility of using the tools of fuzzy cognitive maps well mastered by domestic researchers to determine the degree of autonomy in conditions of incomplete information, the availability of high-quality information and the influence of the human factor is discussed. The necessity of developing ontologies of subject areas is substantiated in order to ensure the possibility of comparing the degree of autonomy of various robotic complexes (RC) and their groupings. In general, the approach is indicated, which is aimed at systematizing assessments of the quality and effectiveness of the use of autonomous robots, and can allow in a short time to prepare a methodological basis for the widespread introduction of robotics. One of the positive consequences of such a systematic approach is the unification of formulations and solutions (modules) in the tasks of RC information support, which, in turn, facilitates interaction between users, customers and developers. For RC developers, a systematic approach makes it possible to reuse successful solutions in various combinations. In conclusion, wishes are expressed to the community of domestic roboticists in joining efforts to unify terminology, describe problem statements and metrics of intelligence of robotic complexes.

Robot autonomy; degree of autonomy; robotics ontologies; fuzzy cognitive maps; unification of solutions in the field of autonomy.

Введение. Международная федерация робототехники (International Federation of Robotics, IFR), а вслед за ней и Национальный стандарт РФ ГОСТ Р 60.0.0.4–2019 «Роботы и робототехнические устройства (термины и определения)» [1] определяет робота как «рабочий механизм, программируемый по нескольким осям с некоторой степенью автономности и способный передвигаться в пределах определенной среды, выполняя поставленные задачи». Из данного определения следует, что существенными признаками понятия «робот» (т.е. критериями для анализа создаваемых в разные исторические периоды механизмов) являются: автономность, что означает, что «робот способен интерпретировать среду, в которой находится, и адаптироваться под поставленные задачи» [2]; возможность его программирования по нескольким направлениям. Ещё одним, распространённым в среде учёных и практиков является следующее определение: робот – «любая машина, способная воспринимать окружающую среду и реагировать на нее на основе самостоятельно принимаемых решений» [3]. Таким образом, ключевым отличием роботов от других машин считается «автономность»: робот способен интерпретировать среду, в которой находится, и адаптироваться под поставленные задачи. Роботы эволюционируют от запрограммированного автоматизма к полуавтономным и более автономным сложным системам. Полностью автономные системы смогут самостоятельно принимать «решения» в среде своего назначения и выполнять задачи без помощи человека. В целом, можно сказать, что тенденциями современной робототехники становится усиление их автономности и возможности решать разнообразные задачи за счет использования искусственного интеллекта. Среди известных типов автономности технических устройств таких, как материально-техническая, информационная, интеллектуальная [4] выделяется именно интеллектуальная автономность, тесно связанная с информационной, необходимой для решения задач в заранее не известной, изменчивой среде. Следует отметить и тот факт, что всё

активнее растёт спрос и развитие автономных мобильных робототехнических технологий. Беспилотные транспортные средства начали использоваться во многих проблемных областях, начиная от национальной безопасности и поддержки на поле боя и заканчивая исследованием Марса. Военные и гражданские ведомства продолжают расширять функции, которые могут выполнять беспилотные системы. Различными учреждениями проявляется интерес и уточняются возможности беспилотных средств для будущих приложений, растёт спрос на понятную обобщающую структуру для описания возможностей автономных РТК. Востребована общая терминология для характеристики требований беспилотных средств и стандартные показатели для оценки автономных возможностей.

Анализу текущего положения дел в области характеристик интеллектуальной автономности робототехнических комплексов посвящена настоящая работа. В первой части представлены известные подходы к оценке степени автономности РТК с указанием проблемных мест в практическом использовании таких оценок. В следующих частях предлагается ряд технологий, направленных на разрешение указанных проблем. В заключении, отдавая отчёт сложности рассмотренной проблемы, выскажу ряд пожеланий к сообществу отечественных робототехников об объединении усилий в формировании унифицированного подхода к оценке и сравнению степени автономности РТК.

Компоненты и критерии автономности роботов. Чем должен обладать РТК, чтобы быть отнесённым к автономным и что должен уметь, исполнять какие алгоритмы? Специалисты прогнозируют, что в опытно-конструкторских работах по созданию роботов специального назначения, в соответствии с имеющимися тенденциями должны быть реализованы [5]:

- ◆ повышенная ресурсная автономность;
- ◆ модульность построения и реконфигурируемость;
- ◆ конструктивная и технологическая унификация образцов и их ключевых функциональных компонентов;
- ◆ помехозащищенные многоканальные средства и системы информационно-управляющего взаимодействия и опознавания;
- ◆ интеллектуальные программно-алгоритмические средства, позволяющие обеспечить распознавание объектов и рабочей обстановки, рефлексивное прогнозирование развития событий, планирование рационального (оптимального) поведения и, как следствие, адаптивное контролируемое функционирование роботов специального назначения в неопределённых, динамически изменяющихся разнородных условиях применения;
- ◆ интеллектуальные программно-алгоритмические средства, позволяющие обеспечить интеграцию разнотипных роботов специального назначения в единую группу с последующим управлением их совместными действиями в однотипных, разнотипных и смешанных боевых порядках;
- ◆ интеллектуальные системы человеко-машинного интерфейса и поддержки принятия решений операторами управления роботами специального назначения при решении боевых (ударных, огневых), обеспечивающих и специальных задач.

В публикациях встречается различные критерии автономности, например, общество автомобильных инженеров (SAE) чтобы помочь автомобильным инженерам, правительствам и страховым компаниям лучше освоить эту новую технологию, SAE определила шесть (включая отсутствие автономии) уровней автомобильной автономии [6]:

- ◆ Уровень 0: Совсем не автономен; водитель имеет единоличное управление транспортным средством.
- ◆ Уровень 1: Одна функция автоматизирована, но не обязательно использует информацию об условиях вождения. Автомобиль, работающий с простым круиз-контролем, будет квалифицироваться как уровень 1.

♦ Уровень 2: ускорение, замедление и рулевое управление автоматизированы, и для принятия решений используются сенсорные данные из окружающей среды. Современные автомобили с круиз-контролем и автоматическим обслуживанием полосы движения или торможением для предотвращения столкновений попадают в эту категорию. Водитель по-прежнему несет полную ответственность за безопасную эксплуатацию автомобиля.

♦ Уровень 3: на этом уровне все функции безопасности автоматизированы, но водитель по-прежнему должен взять на себя управление в экстренной ситуации, с которой автомобиль не может справиться. Примером могут служить автомобили Tesla с включенной функцией «автопилот». Это самый спорный уровень, потому что он требует, чтобы человек-водитель оставался бдительным и сосредоточенным на задаче вождения, даже если автомобиль выполняет большую часть работы. Люди, естественно, сочли бы эту ситуацию более утомительной, чем простое вождение автомобиля, и многие в сообществе автономных транспортных средств беспокоятся о том, что внимание водителя может отвлечься от текущей задачи, что приведет к катастрофическим результатам. Некоторые автопроизводители предпочитают пропустить уровень 3 и сразу перейти к уровню 4.

♦ Уровни 4 и 5: это полностью автономные уровни, на которых автомобиль принимает все решения по вождению без участия человека. Разница в том, что автомобили 4-го уровня ограничены определенным набором сценариев вождения, таких как движение по городу, пригороду и шоссе, тогда как автомобили 5-го уровня могут справиться с любым сценарием вождения, включая движение по бездорожью.

В среде разработчиков беспилотных летательных аппаратов принята похожая шкала автономности [7]. Существует пять уровней автономности БПЛА, составленных по принципу системы автономности самоуправляемых транспортных средств.

Уровень 0: Автономии нет.

Уровень 1: Автоматизированы некоторые системы, такие как контроль высоты, но человек управляет БПЛА.

Уровень 2: Автоматизировано несколько одновременно работающих систем, но человек все еще управляет БПЛА.

Уровень 3: БПЛА работает автономно при определенных условиях, но человек следит за его движением.

Уровень 4: Беспилотник автономен в большинстве ситуаций; человек может перенять управление, но это не обязательно.

Уровень 5: Беспилотник полностью автономен.

В настоящее время развитие технологии БПЛА находится между 3 и 4 уровнем, где беспилотник может принимать некоторые решения автономно, но человек все еще должен наблюдать за процессом работы устройства. Основная проблема в достижении 5 уровня – это решение технических задач и преодоление законов, правил и даже социального признания в различных регионах.

Много работ отечественных исследователей посвящено вопросам автономии роботов. Подробно рассматриваются классы автономии и те преимущества, которые автономия принесёт в случае её реализации [4, 8–12].

Наиболее фундаментально к исследованиям и конструктивному использованию понятия автономности подошли в США. Здесь с 2003 года вопросами автономии беспилотных средств занимается специально сформированная группа из представителей 18 организаций и ведомств [13]. Отдельные правительственные учреждения начали усилия по созданию механизмов содействия. Объединенный департамент обороны Программный офис (JPO), Центр поддержки маневров армии США и Национальный Институт стандартов и технологий (NIST) в рамках отдельных, но взаимосвязанных усилий описал уровни поведения роботов для будущих боевых систем армии (FCS) программы [14–16]. Исследовательская лаборатория военно-воздушных сил (AFRL) создала Шкалу уровней автономного управ-

ления (ACL) [17]. Армейский научный совет описал набор уровней автономного поведения [18]. Центральное место в этих начинаниях занимает концепция уровней автономии для беспилотников (рис. 1).

Усилиями этой группы ALFUS предложена понятная схема из чего складывается представление об автономности системы (рис. 2) и по каким показателям (рис. 3) можно оценивать автономность конкретной системы.

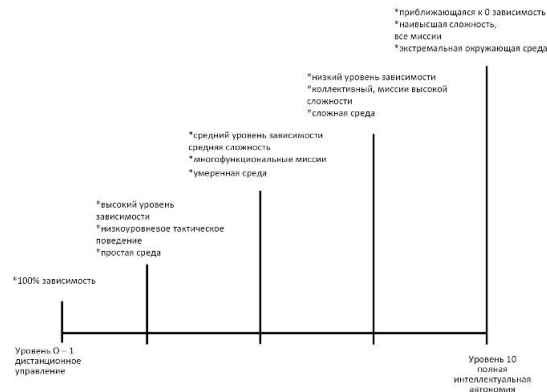


Рис. 1. Уровни автономности

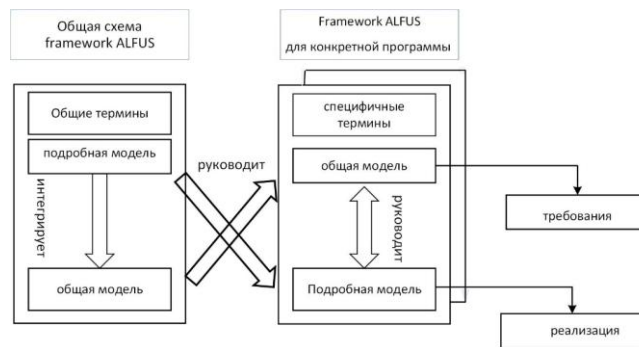


Рис. 2. Общая схема framework, предложенная группой ALFUS



Рис. 3 Показатели для определения уровня автономности, предложенные группой ALFUS («пространство автономии»)

Показатели автономности (наборы метрик) для детальной модели, определяющей уровень автономности, как показано на рис. 3 сведены в «пространство» автономности.

Сложность миссии можно измерить с помощью таких показателей, как уровни выполнения подзадач, принятия решений и совместной работы, требования к знаниям и восприятию, эффективность планирования и исполнения и т.д.

Уровень зависимости от человека (HI) может быть измерен с помощью таких показателей, как время и частота взаимодействия, рабочая нагрузка оператора, уровни квалификации, инициирование робота и т.д.

Сложность окружающей среды может быть измерена с помощью размера препятствий, плотности и движения, типов местности, характеристик городского движения, способности распознавать друзей / врагов / случайных прохожих и т.д.

Детальная модель ALFUS framework содержит следующие определяющие концепции:

- ◆ Автономность беспилотных средств (UMS) касается множества технических областей. Сложность задачи и адаптивность к окружающей среде являются одними из ключевых аспектов.

- ◆ Характер сотрудничества UMSs с операторами-людьми, такой как уровни вовлеченности и типы взаимодействия, важен для возможности автономии.

- ◆ Факторы производительности, такие как вероятность успеха миссии, время отклика, точность, разрешение и допустимые задержки, влияют на уровни автономности UMS [19].

В настоящее время ведутся работы по определению шкал измерения для предложенных метрик. Изогнутые линии для соединения трех оценок для каждого из оцениваемых транспортных средств указывают на то, что пользователи могут руководствоваться некоторыми сложными алгоритмами, в отличие от простых, средневзвешенных, для определения результирующих уровней автономности транспортных средств. Кривые линии также подразумевают, что они могут быть использованы для определения максимальных возможностей, т.е. беспилотное средство может работать при любой комбинации сложности / затрудненности/ независимости, которая лежит на поверхностях или под ними.

Предлагается следующая последовательность действий по использованию этой общей схемы оценки уровня автономности конкретной беспилотной системы.

- ◆ Определенная, заданная миссия декомпозируется с помощью принятого метода для создания структуры задач, охватывающей от миссии до навыков самого низкого уровня. В статье [20] описаны некоторые из существующих концепций такой декомпозиции. В частности, архитектура NIST 4D/RCS [21] может обеспечить жизнеспособный метод. Однако могут потребоваться модификации в соответствии с целями анализа уровня автономии.

- ◆ Разложенным подзадачам или навыкам следует присвоить относительные веса с точки зрения их критичности для выполнения родительских задач или миссий.

- ◆ Показатели должны быть пересмотрены, и относительные веса должны быть присвоены на основе конкретных фокусов или требований, установленных подающей заявку программой. Неприменимые показатели имеют нулевой вес.

- ◆ Задания и навыки оцениваются и получают баллы по каждому из показателей. Сводный балл для каждой задачи получается с помощью средневзвешенного значения (или другого метода интеграции, если пользователь предпочитает) всех индивидуальных показателей. В поле “сложность задачи/навыка” отображается результат. Дополнительные ограничения, такие как межметрическая зависимость, предположительно могут повлиять на оценки показателей. Этот вопрос требует отдельной проработки.

◆ Сводные баллы для задач или миссий более высокого уровня могут быть получены аналогичным образом с помощью средневзвешенных баллов по подзадачам.

◆ Уровни автономности беспилотного средства могут быть определены по общим показателям миссии транспортного средства.

Часть терминов, необходимых для описания автономности беспилотного средства, например, таких как: мобильность, планирование миссии, уровни восприятия, роботизированный наводчик, была опубликована в специальном издании [22].

Общепризнано, что уровень автономии является чрезвычайно сложным вопросом. Авторы вышеприведённой схемы, указывают на ряд проблем, которые требуют своего разрешения. Сюда относятся.

1. Уточнение количественных показателей и расстановка приоритетов. Выявление совпадений и конфликтов между ними по трем осям предлагаемого пространства.

2. Разработка стандартных измерительных шкалы для метрик.

3. Создание высокоуровневых определений уровней автономии для сводной или исполнительской модели.

4. Разработка методов и планов тестирования и подтверждения уровней автономности беспилотных средств.

5. Определение/ установка модели уровня автономии для конкретной предметной области для выбранных программ.

Предложения по преодолению некоторых из указанных проблем будут рассмотрены в следующем пункте.

Наш подход к определению, сравнению степени автономности РТК.

В Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН на основе собственного опыта в разработке робототехнических комплексов и анализа методов прикладной математики в различных областях предложены такие способы развития в целом весьма продуктивной и перспективной схемы группы ALFUS. Для избегания большой дискуссии, фиксируем понимание искусственного интеллекта, применительно к текущему состоянию разработок подвижных, наземных РТК с повышенной степенью автономности, как умение решать данный класс задач. Здесь и прикладываем основные усилия к оценке степени интеллектуальной автономности.

В части ответа на потребность в общем языке для определения возможностей (общий набор определений) беспилотных средств, что облегчает сравнение систем/возможностей и позволяет различным организациям разумно обсуждать вопросы, связанные с использованием возможностей беспилотных систем в рамках их операционных структур, предлагаем использовать аппарат онтологий предметных областей [23]. Как и онтологии, словарные статьи этого языка могут формироваться параллельно, различными коллективами, специализирующимися в соответствующих областях. Для примера, ИПМ им. М.В. Келдыша РАН готовит часть, связанную с использованием систем технического зрения в составе систем информационного обеспечения целенаправленных перемещений автономных средств.

Онтологии – необходимый этап для создания автономных РТК в части автоматизации перевода декларативного описания функций РТК и выдачи задания на текущую миссию в функциональное описание – последовательность действий исполнителя и его подсистем. И уже, как следствие, для сравнения РТК между собой по интеллектуальной составляющей автономности.

Здесь следует отметить ещё такой положительный эффект от использования онтологий в процессе создания автономных средств, как унификация формулировок (постановок задач) и решений (модулей) в задачах информационного обеспечения РТК, что, в свою очередь облегчает взаимодействие между пользователями, заказчиками и разработчиками. Разработчикам РТК систематизированный подход даёт возможность повторного использования удачных решений в различных комбинациях, что в конечном счёте повышает надежность и снижает стоимость разработки.

К сложному «пространству автономии», предложенному группой ALFUS добавляем скалярные поля:

- ◆ квалификация (обязательная программа – допуск к оценке/сравнению/соревнованию) беспилотника: чем обладает квалифицируемое средство?
- ◆ постановка задачи – разбиение на классы: какой класс задач может решать (с каким количеством априорной информации);
- ◆ качество решения задачи (потребляемые вычислительные ресурсы, время, точность, надежность (реакция на непредвиденную ситуацию)).

В части разработки методов и планов тестирования и подтверждения уровней автономности беспилотных средств – готовим примерную программу и методику испытаний систем технического зрения в задаче информационного обеспечения целенаправленных перемещений автономных средств.

Для задания миссии беспилотного средства с последующей декомпозицией и автоматическим переводом в функциональные задачи формируем перечни задач – базовых, типовых сценариев или прецедентов использования беспилотных средств. В наших работах мы сосредотачиваем внимание на наземных мобильных роботах. Пример прецедентов применения автономного мобильного робота:

- ◆ наблюдение за зоной/объектом;
- ◆ разведка заданной области;
- ◆ поиск определенных объектов интереса, их идентификации и точная локализация;
- ◆ работа с обнаруженными объектами интереса.

Базовый перечень технологических операций (ТОП) робота определяется вышеперечисленными прецедентами. ТОП включают в себя:

- ◆ ТОП системы обеспечения безопасности робота (предотвращение столкновений с препятствиями и опрокидывания робота);
- ◆ расчетные ТОП (построение траекторий, локализация объектов интереса, построение и коррекция карты);
- ◆ ТОП отработки команд или информационно-двигательных действий (обеспечения выполнения заданных режимов функционирования робота).

Одна из самых сложных проблем при оценке и проведения сравнений автономности беспилотных средств – это определение/установка модели уровня автономии для конкретной предметной области для выбранных программ. Не менее сложной проблемой является и проблема взвешенной оценки совокупности количественных оценок в пространстве «автономии».

Оценка сочетания сложности миссии и трудности условий характеризуются высокой степенью неопределенности и сложности, что существенно ограничивает возможности применения количественных методов для сравнительного анализа. Поэтому в этой части оценок автономности предлагается использование хорошо развитого аппарата когнитивного моделирования. Нечеткие когнитивные карты представляют собой способ отображения реальных динамических систем в форме, которая соответствует человеческому восприятию таких процессов. Это главная причина их широкого применения в различных сферах жизнедеятельности.

Анализ когнитивной карты позволяет:

- ◆ рассмотреть структуру системы;
- ◆ найти наиболее значимые и целевые факторы;
- ◆ оценить воздействие факторов друг на друга;
- ◆ выявить проблемные зоны;
- ◆ определить, на какой фактор необходимо воздействовать, с какой силой и в каком направлении, чтобы получить желаемое изменение целевых факторов;
- ◆ провести сценарное моделирование – исследовать и прогнозировать поведение системы в различных условиях и при тех или иных управляющих воздействиях.

Методология и инструментарий нечёткого когнитивного моделирования хорошо развиты и освоены отечественными исследователями [24–32]. Опыта приложения этих технологий к области сравнительной оценки интеллектуальной автономности ещё нет, но первые контакты со специалистами оснащают и приложенье сил в намеченном направлении представляется целесообразным.

Заключение. Степень автономности зависит от задач, которые необходимо выполнить. Качественно, область действия, определяемая набором параметров, в пределах которых система может принимать решения и действовать самостоятельно для достижения поставленных целей, может быть названа степенью автономии. Роботы с полной автономией предпочтительнее во многих областях применения, таких как исследование космоса, военное дело и другие. Как показывает проведённый анализ, объективное и конструктивное оценивание степени автономности РТК требует серьёзных коллективных усилий всего сообщества робототехников. На этом пути, в частности, лежит построение онтологий предметных областей – сфер применения РТК. Использование онтологий позволит заказчикам, пользователям унифицировать единицы измерения координат по осям "пространства автономии", объективно, количественно сравнивать степени интеллектуальной и информационной автономности РТК. Конструкторам РТК оперативно компоновать удачные решения между собой. Для преодоления слабой формализации и неполной информации в постановках задач при оценивании степени автономности целесообразно рассмотреть применение методов нечётких когнитивных карт. Эту технологию применительно к пространству автономии только предстоит освоить. Учитывая текущую ситуацию в отечественной робототехнике и насущные потребности военного ведомства, первоочередными шагами в формировании онтологий предметных областей автономных наземных РТК и БЛА и постановках задач рассмотреть транспортную задачу и задачу разведки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ Р 60.0.0.4–2019. Роботы и робототехнические устройства. Термины и определения. – https://allgosts.ru/25/040/gost_r_60.0.0.4-2019.
2. Кайсер Э., Раффо Д., Вунш-Винсент С. Робототехника: прорывные технологии, инновации, интеллектуальная собственность // Форсайт. – 2016. – № 2. – Т. 2.
3. Несмелов П.А. Этапы развития робототехники: критерии выделения и их характеристика // Молодой ученый. – 2022. – № 19 (414). – С. 26–28.
4. Ермолов И.Л. Расширение функциональных возможностей мобильных технологических роботов путем повышения уровня их автономности с использованием иерархической комплексной обработки бортовых данных: дисс. ... д-ра техн. наук. – 2012.
5. Murphy Robin. Introduction to AI robotics. (Intelligent robotics and autonomous agents. A Bradford Book). The MIT Press. Cambridge, Massachusetts, London, England ISBN 0-262-13383-0.
6. Официальный сайт Society of Automotive Engineers – американская Ассоциация Автомобильных Инженеров. – https://www.sae.org/standards/j3016_202104.
7. Сайт компании PROXIMA. – https://www.gisproxima.ru/avtonomnyye_bp1a.
8. Овчинский В., Ларина Е. Искусственный интеллект. Большие данные. Преступность. – Книжный мир, 2019. – 390 с. – ISBN: 978-5-6041495-7-7.
9. Ермолов И.Л. Автономность мобильных роботов, её меры и пути её повышения // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – № 6.
10. Ермолов И.Л. О факторах, влияющих на уровень автономности в пространстве транспортных шасси наземных мобильных роботов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 1. – С. 42–59. – DOI: 10.18522/2311-3103-2022-1-42-59.
11. Ермолов И.Л. Повышение автономности мобильных роботов, как важнейшее направление развития современной робототехники // Вестник МГТУ "СТАНКИН". – 2010. – № 2.
12. Васильев И.А., Коваль М.В., Горюнов В.В., Плавинский М.Н. Организация автономной работы мобильного робота в группе. – СПб.: ЦНИИ РТК.

13. Huang Hui-Min, Pavek Kerry, Novak Brian, Albus James, Messina Elena. A Framework For Autonomy Levels For Unmanned Systems (ALFUS) Proceedings of the AUVSI's Unmanned Systems North America 2005, June 2005, Baltimore, MD.
14. Сайт компании Jointrobotics. – http://www.jointrobotics.com/activities_new/FY2003%20Joint%20Robotics%20Master%20Plan.pdf.
15. Knichel David. Position Presentation for the Maneuver Support Center, Directorate of Combat Development, U.S. Army, the First Federal Agencies Ad Hoc Working Group Meeting for the Definition of the Autonomy Levels for Unmanned Systems, Gaithersburg, MD, July, 18, 2003.
16. James Albus. Position Presentation for National Institute of Standards and Technology, Intelligent Systems Division, the First Federal Agencies Ad Hoc Working Group Meeting for the Definition of the Autonomy Levels for Unmanned Systems, Gaithersburg, MD, July, 18, 2003.
17. Bruce T. Clough. Metrics, Schmetrics! How The Heck Do You Determine A UAV's Autonomy Anyway? // Proceedings of the Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop, Gaithersburg, Maryland, 2002. Army Science Board, Ad Hoc Study on Human Robot Interface Issues, Arlington, Virginia, 2002.
18. Hui-Min Huang et al. Autonomy Measures for Robots // Proceedings of the 2004 ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, Anaheim, California, November 2004.
19. Hui-Min Huang, Elena Messina, James Albus. Autonomy Level Specification for Intelligent Autonomous Vehicles: Interim Progress Report // 2003 PerMIS Workshop, Gaithersburg, MD.
20. Huang H.M. et al. Autonomy Levels for Unmanned Systems (ALFUS) Framework: An Update // the 2005 SPIE Defense and Security Symposium, Orlando, Florida, March 2005.
21. Barbera Anthony et al. Software Engineering for Intelligent Control Systems // KI Journal Special Issue on AI and Software Engineering, Germany, March 2004.
22. Autonomy Levels for Unmanned Systems Framework. Vol. I: Terminology, Version 1.1 / Huang, H. Ed., NIST Special Publication 1011, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, September 2004.
23. Соколов С.М. Онтологический подход в создании робототехнических комплексов с повышенной степенью автономности // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 1. – С. 42-59. – DOI: 10.18522/2311-3103-2022-1-42-59.
24. Barnard A. Why you cannot predict electronic product reliability. – ARS, Europe: Warsaw, Poland, 2012.
25. Горяинов А.А., Замышляев А.М., Платонов Е.Н. Анализ влияний факторов на ущерб от происшествий на транспорте с помощью регрессионных моделей // Надежность. – 2013. – № 2. – С. 126-144.
26. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений. – М.: Мир, 1976.
27. Kosko B. Fuzzy cognitive maps // International Journal of Man-Machine Studiens. – 1986. – Vol. 24. – P. 65-75.
28. Засрановская А.В. Системный анализ на основе нечетких когнитивных карт // Вестник Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова. – 2018. – № 4. – С. 152-160. – <https://doi.org/10.21686/2413-2829-2018-4-152-160>.
29. Ротштейн А.П. Нечеткие когнитивные карты в анализе надежности систем // Надежность. – 2019. – № 4. – С. 24-31. – <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2019-19-4-24-31>.
30. Вовк С.П., Гинис Л.А. Моделирование переходов между эталонными ситуациями в сложных системах в условиях неопределенности // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 2. – С. 116-122.
31. Горелова Г.В. О когнитивном моделировании сложных систем, инструментарий исследований // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 6. – С. 236-240.
32. Гинис Л.А. Развитие инструментария когнитивного моделирования для исследования сложных систем // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 3 (Т. 24). – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1806> (доступ свободный).

REFERENCES

1. GOST R 60.0.0.4–2019. Roboty i robototekhnicheskie ustroystva. Terminy i opredeleniya [GOST R 60.0.0.4–2019. Robots and robotic devices. Terms and definitions]. Available at: https://allgosts.ru/25/040/gost_r_60.0.0.4-2019.

2. Kaysner E., Raffo D., Vunsh-Vinsent S. Robototekhnika: proryvnye tekhnologii, innovatsii, intellektual'naya sobstvennost' [Robotics: breakthrough technologies, innovations, intellectual property], *Forsayt* [Foresight], 2016, No. 2, Vol. 2.
3. Nesmelov P.A. Etapy razvitiya robototekhniki: kriterii vydeleniya i ikh kharakteristika [Stages of robotics development: selection criteria and their characteristics], *Molodoy uchenyy* [Young scientist], 2022, No. 19 (414), pp. 26-28.
4. Ermolov I.L. Rasshirenie funktsional'nykh vozmozhnostey mobil'nykh tekhnologicheskikh robotov putem povysheniya urovnya ikh avtonomnosti s ispol'zovaniem ierarkhicheskoy kompleksnoy obrabotki bortovykh dannykh: diss. ... d-ra tekhn. nauk [Expanding the functionality of mobile technological robots by increasing their level of autonomy using hierarchical integrated processing of onboard data: cand. of eng. sc. diss.], 2012.
5. Murphy Robin. Introduction to AI robotics. (Intelligent robotics and autonomous agents. A Bradford Book). The MIT Press. Cambridge, Massachusetts, London, England ISBN 0-262-13383-0.
6. Ofitsial'nyy sayt Society of Automotive Engineers – amerikanskaya Assotsiatsiya Avtomobil'nykh Inzhenerov [Official website of the Society of Automotive Engineers - American Association of Automotive Engineers]. Available at: https://www.sae.org/standards/j3016_202104.
7. Sayt kompanii PROXIMA [The website of the company PROXIMA]. Available at: https://www.gisproxima.ru/avtonomnyye_bpla.
8. Ovchinskiy V., Larina E. Iskusstvennyy intellekt. Bol'shie dannye. Prestupnost' [Artificial intelligence. Big data. Crime]. Knizhnyy mir, 2019, 390 p. ISBN: 978-5-6041495-7-7.
9. Ermolov I.L. Avtonomnost' mobil'nykh robotov, ee mery i puti ee povysheniya [Autonomy of mobile robots, its measures and ways to improve it], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2008, No. 6.
10. Ermolov I.L. O faktorakh, vliyayushchikh na uroven' avtonomnosti v prostranstve transportnykh shassi nazemnykh mobil'nykh robotov [On the factors affecting the level of autonomy in the space of transport chassis of ground mobile robots], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskoe nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 1, pp. 42-59. DOI: 10.18522/2311-3103-2022-1-42-59.
11. Ermolov I.L. Povyshenie avtonomnosti mobil'nykh robotov, kak vazhneyshee napravlenie razvitiya sovremennoy robototekhniki [Increasing the autonomy of mobile robots as the most important direction of the development of modern robotics], *Vestnik MGTU "STANKIN"* [Bulletin of MSTU "STANKIN"], 2010, No. 2.
12. Vasil'ev I.A., Koval' M.V., Goryunov V.V., Plavinskiy M.N. Organizatsiya avtonomnoy raboty mobil'nogo robota v gruppe [Organization of autonomous operation of a mobile robot in a group]. Saint Petersburg: TSNII RTK.
13. Huang Hui-Min, Pavek Kerry, Novak Brian, Albus James, Messina Elena. A Framework For Autonomy Levels For Unmanned Systems (ALFUS) Proceedings of the AUUVSI's Unmanned Systems North America 2005, June 2005, Baltimore, MD.
14. Sayt kompanii Jointrobotics [Website of the company Joint robots]. Available at: http://www.jointrobotics.com/activities_new/FY2003%20Joint%20Robotics%20Master%20Plan.pdf.
15. Knichel David. Position Presentation for the Maneuver Support Center, Directorate of Combat Development, U.S. Army, the First Federal Agencies Ad Hoc Working Group Meeting for the Definition of the Autonomy Levels for Unmanned Systems, Gaithersburg, MD, July, 18, 2003.
16. James Albus. Position Presentation for National Institute of Standards and Technology, Intelligent Systems Division, the First Federal Agencies Ad Hoc Working Group Meeting for the Definition of the Autonomy Levels for Unmanned Systems, Gaithersburg, MD, July, 18, 2003.
17. Bruce T. Clough. Metrics, Schmetrics! How The Heck Do You Determine A UAV's Autonomy Anyway?, *Proceedings of the Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop, Gaithersburg, Maryland, 2002. Army Science Board, Ad Hoc Study on Human Robot Interface Issues, Arlington, Virginia, 2002.*
18. Hui-Min Huang et al. Autonomy Measures for Robots, *Proceedings of the 2004 ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, Anaheim, California, November 2004.*
19. Hui-Min Huang, Elena Messina, James Albus. Autonomy Level Specification for Intelligent Autonomous Vehicles: Interim Progress Report, 2003 *PerMIS Workshop, Gaithersburg, MD.*
20. Huang H.M. et al. Autonomy Levels for Unmanned Systems (ALFUS) Framework: An Update, *the 2005 SPIE Defense and Security Symposium, Orlando, Florida, March 2005.*

21. Barbera Anthony *et al.* Software Engineering for Intelligent Control Systems, *KI Journal Special Issue on AI and Software Engineering, Germany, March 2004*.
22. Autonomy Levels for Unmanned Systems Framework. Vol. I: Terminology, Version 1.1, Huang, H. Ed., NIST Special Publication 1011, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, September 2004.
23. Sokolov S.M. Ontologicheskii podkhod v sozdani robototekhnicheskikh kompleksov s povyshennoy stepen'yu avtonomnosti [Ontological approach in the creation of robotic complexes with an increased degree of autonomy], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 1, pp. 42-59. DOI: 10.18522/2311-3103-2022-1-42-59.
24. Barnard A. Why you cannot predict electronic product reliability. ARS, Europe: Warsaw, Poland, 2012.
25. Goryainov A.A., Zamyshlyaev A.M., Platonov E.N. Analiz vliyaniy faktorov na ushcherb ot proissheshtviy na transporte s pomoshch'yu regressionnykh modeley [Analysis of the effects of factors on damage from accidents in transport using regression models], *Nadezhnost'* [Reliability], 2013, No. 2, pp. 126-144.
26. Zade L. Ponyatie lingvisticheskoy peremennoy i ee primenenie k prinyatiyu priblizhennykh resheniy [The concept of a linguistic variable and its application to making approximate decisions]. Moscow: Mir, 1976.
27. Kosko B. Fuzzy cognitive maps, *International Journal of Man-Machine Studies*, 1986, Vol. 24, pp. 65-75.
28. Zagranovskaya A.V. Sistemnyy analiz na osnove nechetkikh kognitivnykh kart [System analysis based on fuzzy cognitive maps], *Vestnik Rossiyskogo ekonomicheskogo universiteta im. G.V. Plekhanova* [Bulletin of the Plekhanov Russian University of Economics], 2018, No. 4, pp. 152-160. Available at: <https://doi.org/10.21686/2413-2829-2018-4-152-160>.
29. Rotshteyn A.P. Nechetkie kognitivnye karty v analize nadezhnosti sistem [Fuzzy cognitive maps in the analysis of the reliability of systems], *Nadezhnost'* [Reliability], 2019, No. 4, pp. 24-31. Available at: <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2019-19-4-24-31>.
30. Vovk S.P., Ginis L.A. Modelirovanie perekhodov mezhdru etalonnymi situatsiyami v slozhnykh sistemakh v usloviyakh neopredelennosti [Modeling of transitions between reference situations in complex systems under uncertainty], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 2, pp. 116-122.
31. Gorelova G.V. O kognitivnom modelirovanii slozhnykh sistem, instrumentariy issledovaniy [On cognitive modeling of complex systems, research tools], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 6, pp. 236-240.
32. Ginis L.A. Razvitie instrumentariya kognitivnogo modelirovaniya dlya issledovaniya slozhnykh sistem [Electronic resource], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2013, No. 3 (Vol. 24). Available at: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1806> (free access).

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

Сokolov Сергей Михайлович – Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук»; e-mail: sokolsm@keldysh.ru; г. Москва, Россия; тел.: 84992207994; д.ф.-м.н.; профессор; г.н.с.; зав. сектором.

Sokolov Sergey Mikhailovich – Keldysh Institute of Applied Mathematics Russian Academy of Sciences; e-mail: sokolsm@keldysh.ru; Moscow, Russia; phone: +74992207994; dr. of math. and physics. sc.; professor; chief researcher; chief division.

А.Ю. Баранник, Е.В. Павлов, А.В. Лагутина, В.И. Ершов**ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ
К РОБОТОТЕХНИЧЕСКОМУ КОМПЛЕКСУ МНОГОРЕЖИМНОГО
ПОЖАРОТУШЕНИЯ**

Целью исследования является обоснование технических требований к робототехническому комплексу, предназначенному для ликвидации чрезвычайных ситуаций техногенного характера, связанных с необходимостью ликвидации возгораний. Данные ЧС могут возникать, прежде всего при радиационных и химических авариях, а также при авариях на взрывопожароопасных объектах. Ликвидация таких ЧС, как правило связана с повышенным риском для пожарных и спасателей и требует применения тяжелой техники. В статье предложен подход, который предполагает рассмотрение двух возможных вариантов применения комплекса: при тушении пожара по площади в режимах разового цикла возимым запасом воды и при тушении пожаров в режиме длительного пожаротушения. При этом в качестве основных показателей для оценки эффективности комплекса предлагается рассматривать площадной темп пожаротушения и расход воды. Под площадным темпом пожаротушения предлагается понимать, как отношение площади тушения пожара к времени. Расход воды при пожаротушении является единой величиной для всех звеньев последовательной цепочки, в виде которой может быть представлена схема подачи воды к очагу пожара. Для первого варианта последовательно рассчитывается величина расхода воды, которая зависит от напора, который создается перед водяным стволом. Данный показатель прежде всего зависит от таких факторов как напор воды, создаваемый насосом, потери напора в рукавной линии, превышения или понижения водяного ствола по отношению к насосу. По итогам расчетов для каждого звена полученные показатели суммируются. Для второго варианта, возможности робототехнического комплекса по длительному пожаротушению, предполагают использование в качестве источника пожаротушащего вещества, имеющийся водоем природного или искусственного происхождения. При этом количество факторов, влияющих на площадной темп пожаротушения и расход воды существенно возрастает. Для упрощения проведения расчетов разработана номограмма, которая позволяет рассчитывать не только вышеуказанные показатели, но определить прогнозные значения времени необходимого для тушения пожара. Получаемые в результате вышеуказанных расчетов данные позволяют в итоге реализовать основную задачу, рассматриваемых исследований, т.е. оценки возможностей перспективного комплекса робототехнического комплекса по тушению пожаров на радиационно-, химически- и взрывоопасных объектах. Данную проблему предлагается решать путем формирования технических обликов РТК, которые могут быть созданы для решения пожаров на вышеуказанных объектах, и затем сравнительной оценкой их качеств.

Робототехническое средство; робототехнический комплекс; пожаротушение; рукавная линия; номограмма.

A.Yu. Barannik, E.V. Pavlov, A.V. Lagutina, V.I. Ershov**SUBSTANTIATION OF TECHNICAL REQUIREMENTS FOR ROBOTIC
COMPLEX OF MULTI-MODE FIRE EXTINGUISHING**

The purpose of the study is to substantiate the technical requirements for a robotic complex designed to eliminate man-made emergencies associated with the need to eliminate fires. These emergencies can occur, first of all, in radiation and chemical accidents, as well as in accidents at fire and explosion hazardous facilities. The elimination of such emergencies, as a rule, is associated with an increased risk for firefighters and rescuers and requires the use of heavy equipment. The article proposes a campaign that involves considering two possible options for using the complex: when extinguishing a fire over an area in the modes of a single cycle with a transportable supply of water and when extinguishing fires in a long-term fire extinguishing mode. At the same time, it is proposed to consider the areal fire extinguishing rate and water consumption as the

main indicators for assessing the effectiveness of the complex. Under the areal rate of fire extinguishing, it is proposed to understand as the ratio of the fire extinguishing area to the time. Water consumption during fire extinguishing is a single value for all links in a serial chain, in the form of which a scheme for supplying water to a fire source can be represented. For the first option, the amount of water flow is sequentially calculated, which depends on the pressure that is created in front of the water shaft. This indicator primarily depends on such factors as the water pressure generated by the pump, the pressure loss in the hose line, the excess or decrease of the water barrel in relation to the pump. According to the results of calculations for each link, the obtained indicators are summarized. For the second option, the capabilities of the robotic complex for long-term fire extinguishing involve the use of an existing reservoir of natural or artificial origin as a source of fire extinguishing agent. At the same time, the number of factors affecting the areal rate of fire extinguishing and water consumption increases significantly. To simplify the calculations, a nomogram has been developed that allows you to calculate not only the above indicators, but also determine the predicted values of the time required to extinguish the fire. The data obtained as a result of the above calculations make it possible to finally realize the main task of the studies under consideration, that is assessment of the capabilities of a promising complex of a robotic complex for extinguishing fires at radiation-, chemical- and explosive objects. This problem is proposed to be solved by forming the technical forms of the RTK, which can be created to solve fires at the above objects, and then by a comparative assessment of their qualities.

Robotic tool; robotic complex; firefighting; hose line; nomogram.

Введение. Угроза возникновения техногенных крупномасштабных чрезвычайных ситуаций (ЧС), ликвидация последствий которых, как правило, связана с наличием условий особого риска, при которых существует реальная угроза для жизни человека, продолжает оставаться весьма актуальным фактором [1–5]. К таким ЧС относятся радиационные аварии, химические аварии, аварии на взрывопожароопасных объектах, при тушении пожаров, на которых потребуется применение робототехнических средств (РТС) и особых технологий, в основе которых лежит использование защищенной передвижной пожарной техники.

Из проведенного анализа созданной в МЧС России группировки РТС наземного применения и условий эффективного пожаротушения при крупномасштабных авариях не может быть сформирована эффективная многоэлементная система мобильных средств, действующих как единый взаимосвязанный пожарный комплекс [6]. Таким образом, становится очевидной необходимость создания нового специального пожарного робототехнического комплекса [7].

Предлагается разработать и использовать робототехнический комплекс многорежимного пожаротушения (РТК-ПМ) в следующем составе [8]:

- ♦ шесть специализированных РТС с возможностью экипажного и дистанционного управления: разграждения (РТС-РЗ), пожарное (РТС-П), высотное (РТС-ВС), рукавное (РТС-РК), насосное (РТС-НС) и заправки (РТС-ЗВ).
- ♦ подвижный пункт управления группового применения РТС, включающий беспилотное авиационное средство (ретранслятор);
- ♦ машины обеспечения: техобслуживания и ремонта, вспомогательный автомобиль, тягачи с трейлерами [9, 10].

Специализированное РТС должно иметь следующее конструктивное построение: базовое шасси танка Т-72; рабочее оборудование модульного или встроенного типа; специальные системы защиты и жизнеобеспечения; систему управления, включающую бортовую аппаратуру управления и индивидуальный пульт управления.

Формальная постановка задачи. Режимы тушения пожаров, которые предусматривается реализовать в РТК-ПМ, условно объединяются в две группы: режимы разового цикла пожаротушения возимым запасом воды и режимы длительного пожаротушения с использованием водоемов [11–13].

Эффективность применения РТК-ПМ предлагается оценивать его возможностями по площадному темпу пожаротушения объекта при обеспечении нормируемой интенсивности подачи воды на цели пожаротушения [14, 15]. С помощью этой величины, в свою очередь, определяются и возможности по продолжительности тушения пожара. Кроме того, важной величиной, определяющей возможности комплекса при реализации режимов разового цикла, является площадь пожаротушения.

Площадь тушения пожара S_T (m^2) – площадь участка пожара, к которой обеспечивается подача требуемого объема воды робототехническим средством пожаротушения (РТС-П) и робототехническим средством высотного пожаротушения (РТС-ВС) с использованием возимого запаса воды или комплексом РТК-ПМ с использованием водоема за установленное время [16].

Площадной темп пожаротушения S_T' (m^2/c) – величина, измеряемая площадью участка пожара, к которой обеспечивается подача необходимого количества воды за единицу времени.

Площадь тушения пожара в соответствии с моделью гидродинамики, принятой в теоретических разработках научных и учебных организаций МЧС России [17–19], определяется по формулам:

а) при автономном применении РТС-П (РТС-ВС) с использованием возимого запаса воды:

$$S_T = \frac{V_{\text{ц}} - V_{\text{ст}}}{J_T \tau_T}, m^2, \quad (1)$$

где $V_{\text{ц}}$ – объем воды в цистерне РТС-П, л;

J_T – требуемая интенсивность подачи воды, л/(m^2 с). Значения данной характеристики нормируются для различных объектов пожаротушения;

$\tau_T = 600$ с – нормативное время подачи воды на элемент объекта тушения;

$V_{\text{ст}}$ – объем воды в линии водяного ствола, л;

б) при применении комплекса РТК-ПМ с использованием водоема:

$$S_T = \frac{60 Q}{J_T \tau_T} t, m^2, \quad (2)$$

где Q – расход воды при пожаротушении, измеряемый объемом воды, подача которого к очагу пожара обеспечивается средством, за единицу времени, л/с;

t – время тушения пожара, мин.

Площадной темп пожаротушения определяется как отношение площади тушения пожара к времени:

$$S_T' = \frac{S_T}{t} = \frac{Q}{J_T \tau_T}, \frac{m^2}{c}. \quad (3)$$

Расход воды при пожаротушении является единой величиной для всех звеньев последовательной цепочки, в виде которой может быть представлена схема подачи воды к очагу пожара, определяемая одним из режимов пожаротушения с применением РТК-МП. При этом каждое звено этой цепочки включает (рис. 1):

♦ водяной насос, создающий напор воды P_1 , МПа. Регулируемая величина этого напора ограничивается некоторым максимальным значением, установленным для этого насоса. Кроме того, существует максимальное значение расхода воды, которое может обеспечить насос;

♦ рукавную линию длиной L , м, конечная часть которой имеет относительно насоса некоторое превышение или понижение H_p , м. Рукавная линия может быть создана как с использованием рукавов робототехнического средства насосной станции (РТС-НС), так и робототехнического средства рукавного комплекса (РТС-РК). Ввиду того, что установка насосов на РТС-РК не предусмотрена, то соединение РТС-НС и РТС-РК рассматривается как одно звено схемы;

♦ сливной патрубков, являющийся источником воды для следующего элемента, или оконечный водяной ствол. Перед ними имеет место напор воды P_2 , МПа.

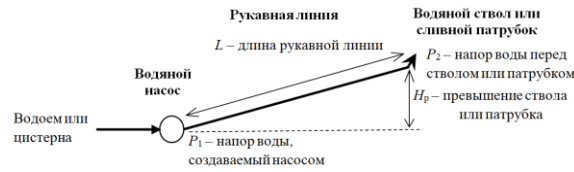


Рис. 1. Элемент схемы подачи воды к очагу пожара

Величина расхода, обеспечиваемая каждым звеном схемы подачи воды к очагу пожара, определяется математическим выражением [7]

$$Q = \sqrt{\frac{P_1 - 0,01 H_2}{\sigma L + s}}, \quad (4)$$

где σ — удельные потери напора в рукавной линии, $\frac{\text{МПа} \cdot \text{с}^2}{\text{л}^2 \cdot \text{м}}$. Значения этой величины зависят от диаметра d рукавов и определяются в соответствии с результатами исследований, представленными в [14];

L — длина рукавной линии или линии водяного ствола, м;

s — сопротивление насадки лафетного ствола (патрубка), $\frac{\text{МПа} \cdot \text{с}^2}{\text{л}^2}$. Эта величина зависит от диаметра ствола или патрубка и рассчитывается в соответствии с материалами, представленными в [7].

Если $P_1 < 0,01 H_p$, то $Q = 0$.

Выражение (4) получено следующим образом. Величина расхода, обеспечиваемая каждым звеном схемы, зависит от напора, который создается перед сливным патрубком или водяным стволом $Q = Q(P_2)$.

В свою очередь, на напор воды P_2 влияют [12, 13]:

- ♦ напор воды P_1 , создаваемый насосом;
- ♦ потери напора воды $\Delta P_p(Q)$ в рукавной линии или линии водяного ствола за счет сопротивления ее движению, в свою очередь зависящие от самого расхода, МПа;
- ♦ изменение напора воды $\Delta P_H(H_p)$ в рукавной линии или линии водяного ствола за счет превышения или понижения H_p водяного ствола или сливного патрубка по отношению к насосу РТС-НС или РТС-П (РТС-ВС), МПа.

С учетом указанных факторов максимальный расход воды в каждом звене схемы определяется как решение следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} Q = Q(P_2); \\ P_2 = P_1 - \Delta P_p(Q) - \Delta P_H(H_p). \end{cases} \quad (5)$$

Содержащиеся в данной системе зависимости имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} 1) \Delta P_p &= \sigma L Q^2 \\ 2) \Delta P_H &= 0,01 \cdot H_p \\ 3) \Delta P_2 &= s Q^2 \end{aligned} \quad (6)$$

С учетом (6) решением системы уравнений (5) и является выражение (4).

Подзадача оценки эффективности тушения пожара по площади в режимах разового цикла возимым запасом воды. Схема подачи воды к очагу пожара в данном случае включает только одно звено, включающее РТС-П или РТС-ВС. В этом случае возможности комплекса оцениваются с использованием выражений (1), (3) и (4).

Расчеты выполнены с учетом следующих факторов: максимальный напор, создаваемый существующим насосом — 1,0 МПа; максимальная производительность насоса — 200 л/с; диаметр водовода внутри лафетного ствола — 100 мм; диаметр насадка лафетного ствола — 84 мм; превышении насадка над уровнем насоса, равным 70 м (высота сооружения реактора электростанции).

Результаты расчетов представлены в табл. 1 и на рис. 2.

Таблица 1

Площадь тушения пожара возимым запасом воды

$J_t, \text{л}/(\text{м}^2\text{с})$	0,06	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
$S_t, \text{м}^2$	555,6	333,3	166,7	111,1	83,3	66,7

Анализ представленных результатов показывает, что при тушении, к примеру, реактора электростанции ($J_t = 0.1 \text{ л}/(\text{м}^2\text{с})$) с автономным применением РТС-ВС обеспечивается площадь пожаротушения – $333,3 \text{ м}^2$ ($\sim 18 \times 18 \text{ м}$) при площадном темпе пожаротушения, равном $1,67 \text{ м}^2/\text{с}$. Время тушения пожара указанной площади составит 3 минуты 20 секунд ($t = S_t/S_t'$).

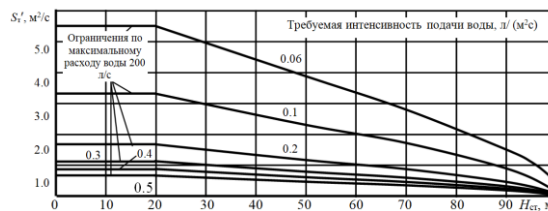


Рис. 2. Зависимость площадного темпа тушения пожара возимым запасом воды от высоты ствола РТС-ВС (РТС-П) и требуемой интенсивности подачи воды

Подзадача по оценке возможностей комплекса по площади тушения пожаров в режиме длительного пожаротушения. При данном режиме пожаротушения схема подачи воды к очагу пожара включает два звена (рис. 3):

- 1) РТС-НС с расположенной на ней гибкой рукавной линией, длина которой может быть увеличена за счет использования РТС РК;
- 2) РТС-П или РТС-ВС.

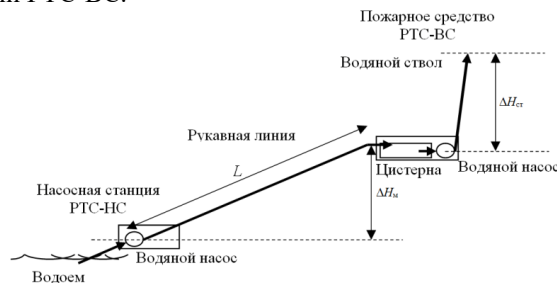


Рис. 3. Схема подачи воды к очагу пожара

В этом случае возможности комплекса оцениваются с использованием выражений (2), (3) и (4).

Выражение (4) применяется для расчета максимального расхода воды (при максимальном напоре, создаваемом насосом) отдельно для каждого звена. Результирующим расходом воды является меньший из двух полученных значений. Насос звена, обеспечивающего больший расход воды, регулирующим устройством будет переведен на меньшую производительность, достигая этим единый расход. Полученный результат используется в выражениях (2) и (3) для получения величин S_t и S_t' .

Возможности РТК-ПМ по длительному пожаротушению с использованием водоема зависят от многих факторов (параметров), поэтому результаты выполненных расчетов в целях обеспечения большей их обзримости целесообразно представить в виде номограммы, один из вариантов которой показан на рис. 4 [9].

Расчеты выполнены для следующих планируемых условий: диаметр рукавной линии – 300 мм, диаметр патрубков – 80 мм, напор воды, создаваемый насосом РТС-НС – 1.4 МПа.

Такую номограмму можно использовать в качестве инструмента для графоаналитической оценки возможностей РТК-ПМ по площадному пожаротушению.

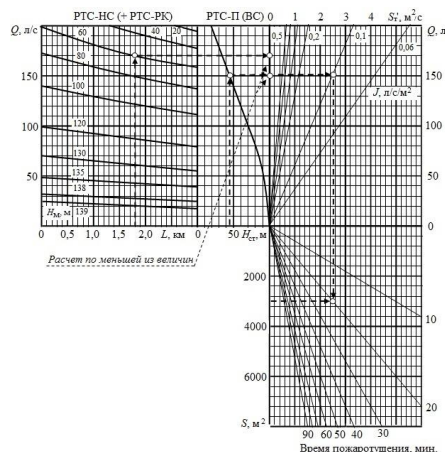


Рис. 4. Номограмма оценки возможностей комплекса РТК-ПМ

Пунктирными линиями на номограмме показана оценка времени тушения объекта реактора электростанции ($J_T = 0.1 \text{ л/(м}^2 \cdot \text{с)}$) площадью 3000 м^2 для следующих условий:

- ♦ пожаротушение производится с помощью лафетного ствола РТС-ВС высотой 45 м при подаче воды из водоема с помощью рукавной линии РТС-НС;
- ♦ расстояние между РТС-НС и РТС-ВС составляет 1800 м;
- ♦ превышение патрубка РТС-ВС над насосом РТС-НС равно 60 м.

В ходе оценки выявлено, что РТС-НС обеспечивает расход воды 170 л/с, в то время как РТС-ВС – 150 л/с. Дальнейший расчет ведется по меньшему расходу 150 л/с, который создается РТС-ВС, а насос РТС-НС регулирующим устройством будет переведен на пониженный режим работы. Далее визирная точка горизонтально перемещается по номограмме до линии со значением $J_T = 0.1$ (точка пересечения соответствует площадной интенсивности пожаротушения $2.5 \text{ м}^2/\text{с}$), после чего – вертикально вниз до уровня, соответствующего площади 3000 м^2 . По изолиниям времени определяется время тушения объекта, которое для рассматриваемых условий равно 20 минутам.

Анализ информации, содержащейся в номограмме, показывает, что на производство расчета возможностей РТК-ПМ по площадному пожаротушению может влиять учет характеристик РТС-ВС (РТС-П) и РТС-НС в случаях, если: превышение РТС-ВС (РТС-П) над РТС-НС в пределах длины рукавной линии 2000 м (при большей длине подача воды обычно осуществляется посредством применения заправщиков РТС-ЗВ) составляет более 30 м; высота лафетного ствола более 20 м.

Если ни одно из этих условий не выполняется, то обеспечивается расход воды, равный 200 л/с, и дальнейший расчет ведется по этому значению.

Для выполнения расчетов по формированию тактико-технических требований к РТК при различных вариантах его применения разработан «Программный модуль расчета подачи огнетушащих веществ в очаг пожара» (рис. 5) в соответствии с методами, теоретическое обоснование которых представлено в данной статье.

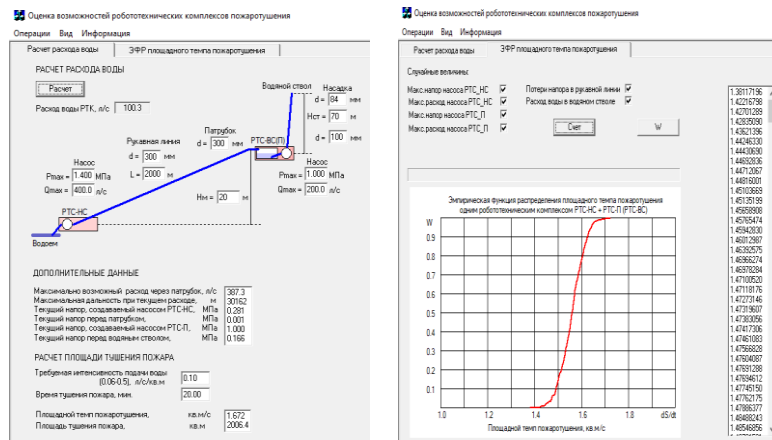


Рис. 5. Информационные окна программного модуля с диалоговой страницей, предназначенной для оценки возможностей РТК-ППМ по расходу огнетушащих веществ и площади пожаротушению

Подзадача оценки возможностей робототехнического комплекса по тушению пожаров на радиационно-, химически- и взрывоопасных объектах. Данную проблему предлагается решать путем формирования технических обликов РТК, которые могут быть созданы для решения пожаров на вышеуказанных объектах, и затем сравнительной оценкой их качеств.

Под оценкой качества технического облика РТК по техническим характеристикам понимаются способы установления значимости вариантов РТК, составляющих некоторое множество альтернатив, на основе сравнения их тактико-технических характеристик. При этом варианты РТК должны различаться соотношением значений технических показателей, каждое из которых должно пройти проверку на непротиворечивость с использованием доступных математических методов.

В качестве оценки качества технического облика РТК предусматривается операция выбора из некоторого множества тех вариантов комплексов, которые являются рациональными для применения в процессе пожаротушения. В качестве результата данной оценки принимается получение ранжировок вариантов соотношений значений технических характеристик РТК, на которые накладываются тактико-технические требования [20].

Рациональный подход к созданию РТК-ППМ предлагается представить последовательностью ниже приведенных процедур и функционалом аппарата поддержки их выполнения (рис. 6):

- 1) формирование основ технического облика РТК, включающее:
 - ♦ формирование вариантов пожаротушения (анализ набора процессов, составляющих варианты пожаротушения);
 - ♦ определение состава, типа и компоновки элементов РТК;
 - ♦ представление элементов РТК наиболее существенными характеристиками, показывающими место и роль элементов в системе (формирование системы основных характеристик РТК);
- 2) выбор методов получения значений существенных характеристик;
- 3) формирование системы оценки качества технического облика РТК:
 - ♦ разработка системы критериев;
 - ♦ выбор методов расчета каждого частного критерия;
 - ♦ выбор методов многокритериальной оценки технического облика РТК;

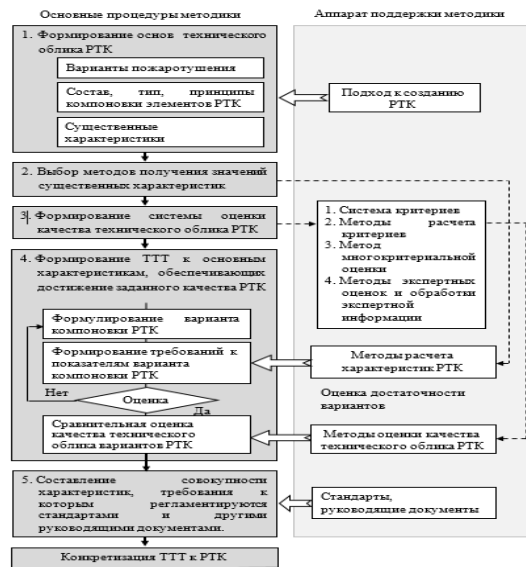


Рис. 6. Система процедур обоснования тактико-технических требований к РТК-ПМ

4) формирование ТТТ к основным характеристикам, обеспечивающих достижение заданного качества РТК путем комплексного применения методов получения значений показателей и системы оценки качества технического облика РТК;

5) составление совокупности характеристик, требования к которым регламентируются стандартами и другими руководящими документами. Конкретизация ТТТ к ним [21, 22].

В аппарат поддержки выполнения процедур предлагается включить методы (рис. 7):

- ◆ формирования основ технического облика РТК;
- ◆ получения значений характеристик;
- ◆ оценки качества технического облика РТК.

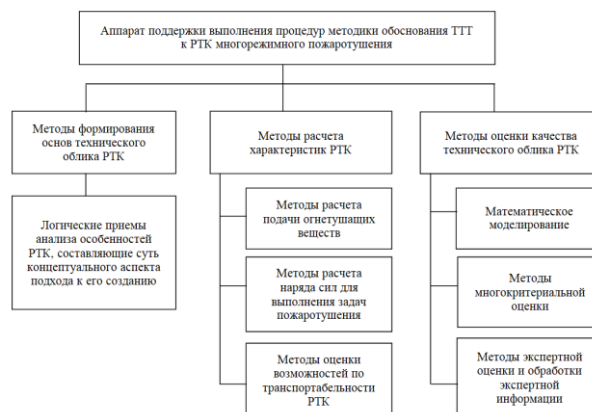


Рис. 7. Схема аппарата поддержки выполнения процедур обоснования ТТТ к РТК-ПМ

Рассматриваемая задача представляет собой инструмент поддержки трудоемкой процедуры сравнительной оценки качества технического облика РТК для различных вариантов его компоновки и выбора из них наилучшего, характеристики которого предполагается положить в основу тактико-технических требований к РТК. Эта процедура связана с многокритериальной оценкой указанных вариантов, при осуществлении которой учитывается мнение лиц, принимающих решение, посредством экспертного оценивания и обработки экспертной информации.

Представленный подход позволил произвести сравнительную многокритериальную оценку эффективности различных вариантов компоновки РТК многорежимного пожаротушения, с возможностью сформировать следующие основные тактико-технические требования к разрабатываемому комплексу:

- ◆ полная масса специализированных РТС – до 40 т;
- ◆ объём ёмкости для воды на пожарном РТС-П и заправщике РТС-ЗВ – не менее 18 000 л;
- ◆ длина рукавной линии РТС-РК – не менее 2000 м. (2000 × 2);
- ◆ производительность водяного насоса РТС-НС – не менее 300 л/с;
- ◆ производительность пожарного насоса на РТС-П – не менее 200 л/с;
- ◆ высота подъёма лафетного ствола на РТС-ВС – не менее 70 м;
- ◆ дальность управления РТС:
- ◆ в приземном режиме на среднепересечённой местности – не менее 2 км;
- ◆ в режиме ретрансляции в условиях ЧС – не менее 30 км;
- ◆ вид сопряжения РТС – автоматизированное сцепное устройство.

Заключение. Представленный в статье методический подход к формированию технических требований к робототехническому комплексу пожаротушения и аппаратно-программный комплекс выбора рационального варианта робототехнического комплекса, а также технология его применения при ликвидации чрезвычайных ситуаций прошли апробацию в научно-исследовательских и образовательных организациях МЧС России и в настоящее время рассматривается в качестве инструментария обоснования требований к РТК при разработки технических заданий на создание перспективных образцов средств технического обеспечения реагирующих подразделений МЧС России.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Мошков В.Б., Баранник А.Ю. Перспективы развития системы робототехники МЧС России в интересах повышения эффективности ведения аварийно-спасательных работ // Технологии гражданской безопасности. Спецвыпуск. – 2021. – С 124-126
2. A Roadmap for US Robotics – From Internet to Robotics. – 2020 ed. <https://www.semanticscholar.org>.
3. Unmanned Systems Roadmap: 2007-2032. – <https://www.globalsecurity.org>.
4. Firefighting Robots Go Autonomous. – <https://www.cientificamerican.com>.
5. Global Robot Firefighter Market 2021 Analysis by Sales, Industry Assessment, Industry, Trends and Forecast 2027. – <https://www.bignewsnetwork.com>.
6. Асхадеев А.И., Павлов Е.В., Баранник А.Ю., Лагутина А.В., Козлов В.И., Пеньков И.А., Чирко О.В. Система робототехники МЧС России. Состояние и перспективы развития // Технологии гражданской безопасности. – 2022. – № 2 (72). – С. 41-47.
7. Иванов Е.Н. Расчет и проектирование систем пожарной защиты. – М.: Химия, 1977. – 376 с.
8. Павлов Е.В. Технический состав робототехнического комплекса тяжелого класса многорежимного тушения пожара // Пожарная безопасность. – 2015. – № 1. – С. 109-110.
9. Баранник А.Ю., Лагутина А.В. Робототехнические комплексы МЧС России // Школа молодых ученых и специалистов МЧС России: Матер. юбилейного X форума. Санкт-Петербург, 15 октября 2020 г. – С. 207-212.
10. Павлов Е.В. Робототехнический комплекс тяжелого класса многорежимного пожаротушения // Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации: Сб. тезисов докладов международной научно-практической конференции: в 2 ч. Ч. 2. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2015. – С. 221-226.

11. Павлов Е.В. Разработка робототехнического комплекса многорежимного пожаротушения тяжёлого класса // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций: Сб. статей по материалам всерос. науч.-практ. конф. с междунар. уч. – Воронеж: ФГБОУ ВПО Воронежский институт ГПС МЧС России, 2014. – С. 244-247.
12. Павлов Е.В. Условия эффективного пожаротушения и возможности группировки робототехнических комплексов по его выполнению при крупномасштабных авариях // Пожарная безопасность. – 2020. – № 4. – С. 130-136.
13. Павлов Е.В., Лукацкий И.М., Осипов Ю.Н., Ершов В.И. Технологические особенности применения робототехнического комплекса многорежимного пожаротушения в условиях крупномасштабных чрезвычайных ситуаций // Пожарная безопасность. – 2022. – № 3 (108). – С. 86-93.
14. Павлов Е.В., Ершов В.И., Осипов Ю.Н. Оценка эффективности применения робототехнического комплекса многорежимного пожаротушения в чрезвычайных ситуациях // Пожарная безопасность. – 2018. – № 4. – С. 22-27. – eLIBRARY ID: 36615627.
15. Павлов Е.В. Разработка методики обоснования тактико-технических требований к робототехническому комплексу многорежимного пожаротушения // Технологии гражданской безопасности. – 2020. – Т. 17, № 2 (64). – С. 61-67.
16. Чистяков Н.Н., Коган Ю.Ш., Кирюханцев Е.Е. Противопожарное водоснабжение зданий. – М.: Стройиздат, 1990. – 176 с.
17. Повзик Я.С. Справочник. – М.: ЗАО “Спецтехника”, 2004. – 416 с.
18. Филин Д.Г. Методика проведения пожарно-тактических расчетов. Тактика тушения пожаров: учеб.-метод. пособие. – Н. Новгород: Нижегородский учебный центр ФПС, 2008.
19. Воротынцев Ю.П., Качалов А.А., Абросимов Ю.Г. и др. Гидравлика и противопожарное водоснабжение. – М.: ВПИТШ МВД СССР, 1985. – 383 с.
20. Павлов Е.В. Требования к робототехническому комплексу многорежимного пожаротушения на базовом шасси // Актуальные проблемы пожарной безопасности: Матер. XXVII Междунар. научн.-практ. конф., посвящённой 25-летию МЧС России: В 3 ч. Ч. 2. – М.: ВНИИПО МЧС России, 2015. – С. 336-345.
21. Носков С.С., Байков А.В., Найденов Д.С. Пути расширения возможностей робототехнических средств при ликвидации ЧС // Применение робототехнических комплексов специального назначения: Сб. трудов секции № 5 XXIX Международной научно-практической конференции «Предотвращение. Спасение. Помощь», 21 марта 2019 г. ФГБВОУ ВО АГЗ МЧС России. – 2019. – С. 103-111.
22. Формуляр 006-TIPSA-2010. Рукава пожарные напорные OROFLEX20. – Балашиха: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2010. – 11 с.

REFERENCES

1. Moshkov V.B., Barannik A.Yu. Perspektivy razvitiya sistemy robototekhniki MChS Rossii v interesakh povysheniya effektivnosti vedeniya avariynno-spatel'nykh rabot [Prospects for the development of the robotics system of the Ministry of Emergency Situations of Russia in the interests of improving the efficiency of emergency rescue operations], *Tekhnologii grazhdanskoy bezopasnosti. Spetsvypusk* [Civil Security Technologies. Special issue], 2021, pp 124-126.
2. A Roadmap for US Robotics – From Internet to Robotics, 2020 ed. Available at: <https://www.semanticscholar.org>.
3. Unmanned Systems Roadmap: 2007-2032. Available at: <https://www.globalsecurity.org>.
4. Firefighting Robots Go Autonomous. Available at: <https://www.cientificamerican.com>.
5. Global Robot Firefighter Market 2021 Analysis by Sales, Industry Assessment, Industry, Trends and Forecast 2027. Available at: <https://www.bignewsnetwork.com>.
6. Askhadeev A.I., Pavlov E.V., Barannik A.Yu., Lagutina A.V., Kozlov V.I., Pen'kov I.A., Chirko O.V. Sistema robototekhniki MChS Rossii. Sostoyanie i perspektivy razvitiya [The robotics system of the Ministry of Emergency Situations of Russia. State and development prospects], *Tekhnologii grazhdanskoy bezopasnosti* [Civil Security Technologies], 2022, No. 2 (72), pp. 41-47.
7. Ivanov E.N. Raschet i proektirovanie sistem pozharoy zashchity [Calculation and design of fire protection systems]. Moscow: Khimiya, 1977, 376 p.
8. Pavlov E.V. Tekhnicheskiy sostav robototekhnicheskogo kompleksa tyazhelogo klassa mnogorezhimnogo tusheniya pozhara [The technical composition of the heavy class robotic complex for multi-mode fire extinguishing], *Pozharnaya bezopasnost'* [Fire Safety], 2015, No. 1, pp. 109-110.

9. Barannik A.Yu., Lagutina A.V. Robototekhnicheskie komplekсы MChS Rossii [Robotic complexes of the Ministry of Emergency Situations of Russia], *Shkola molodykh uchenykh i spetsialistov MChS Rossii: Mater. yubileynogo X foruma. Sankt-Peterburg, 15 oktyabrya 2020 g.* [School of Young Scientists and specialists of the Ministry of Emergency Situations of Russia: Materials of the jubilee X Forum. St. Petersburg, October 15, 2020], pp. 207-212.
10. Pavlov E.V. Robototekhnicheskiy kompleks tyazhelogo klassa mnogorezhimnogo pozharotusheniya [Robotic complex of a heavy class of multi-mode fire extinguishing], *Pozharotushenie: problemy, tekhnologii, innovatsii: Sb. tezisev dokladov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Fire fighting: problems, technologies, innovations: collection of abstracts of the international scientific and practical conference]: In 2 part. Part 2. Moscow: Akademiya GPS MChS Rossii, 2015, pp. 221-226.
11. Pavlov E.V. Razrabotka robototekhnicheskogo kompleksa mnogorezhimnogo pozharotusheniya tyazhelogo klassa [Development of a heavy class multi-mode fire extinguishing robotic complex], *Problemy obespecheniya bezopasnosti pri likvidatsii posledstviy chrezvychaynykh situatsiy: Sb. statey po materialam vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uch.* [Problems of ensuring safety in the aftermath of emergencies: A collection of articles based on the materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation]. Voronezh: FGBOU VPO Voronezhskiy institut GPS MChS Rossii, 2014, pp. 244-247.
12. Pavlov E.V. Usloviya effektivnogo pozharotusheniya i vozmozhnosti gruppirovki robototekhnicheskikh kompleksov po ego vypolneniyu pri krupnomasshtabnykh avariakh [Conditions for effective fire extinguishing and the possibility of grouping robotic systems for its implementation in large-scale accidents], *Pozharnaya bezopasnost'* [Fire Safety], 2020, No. 4, pp. 130-136.
13. Pavlov E.V., Lukatskiy I.M., Osipov Yu.N., Ershov V.I. Tekhnologicheskie osobennosti primeneniya robototekhnicheskogo kompleksa mnogorezhimnogo pozharotusheniya v usloviyakh krupnomasshtabnykh chrezvychaynykh situatsiy [Technological features of the use of a robotic complex for multi-mode fire extinguishing in large-scale emergency situations], *Pozharnaya bezopasnost'* [Fire Safety], 2022, No. 3 (108), pp. 86-93.
14. Pavlov E.V., Ershov V.I., Osipov Yu.N. Otsenka effektivnosti primeneniya robototekhnicheskogo kompleksa mnogorezhimnogo pozharotusheniya v chrezvychaynykh situatsiyakh [Evaluation of the effectiveness of the use of a robotic complex for multi-mode fire extinguishing in emergency situations], *Pozharnaya bezopasnost'* [Fire Safety], 2018, No. 4, pp. 22-27. eLIBRARY ID: 36615627.
15. Pavlov E.V. Razrabotka metodiki obosnovaniya taktiko-tekhnicheskikh trebovaniy k robototekhnicheskomu kompleksu mnogorezhimnogo pozharotusheniya [Development of a methodology for substantiating tactical and technical requirements for a robotic complex for multi-mode fire extinguishing], *Tekhnologii grazhdanskoy bezopasnosti* [Civil Security Technologies], 2020, Vol. 17, No. 2 (64), pp. 61-67.
16. Chistyakov N.N., Kogan Yu.Sh., Kiryukhantsev E.E. Protivopozharnoe vodosnabzhenie zdaniy [Fire water supply of buildings]. Moscow: Stroyizdat, 1990, 176 p.
17. Povzik Ya.S. Spravochnik [Reference book]. Moscow: ZAO "Spetsstekhnika", 2004, 416 p.
18. Filin D.G. Metodika provedeniya pozharo-takticheskikh raschetov. Taktika tusheniya pozharov: ucheb.-metod. posobie [The methodology of fire-tactical calculations. Fire extinguishing tactics: educational and methodical manual]. Nizhny Novgorod: Nizhegorodskiy uchebnyy tsentr FPS, 2008.
19. Vorotyntsev Yu.P., Kachalov A.A., Abrosimov Yu.G. i dr. Gidravlika i protivopozharnoe vodosnabzhenie [Hydraulics and fire water supply]. Moscow: VIPTSh MVD SSSR, 1985, 383 p.
20. Pavlov E.V. Trebovaniya k robototekhnicheskomu kompleksu mnogorezhimnogo pozharotusheniya na bazovom shassi [Requirements for the robotic complex of multi-mode fire extinguishing on the base chassis], *Aktual'nye problemy pozharoy bezopasnosti: Mater. XXVII Mezhdunar. nauchn.-prakt. konf., posvyashchennoy 25-letiyu MChS Rossii* [Actual problems of fire safety: materials of the XXVII International Scientific and Practical. Conf. dedicated to the 25th anniversary of the EMERCOM of Russia]: In 3 part. Part 2. Moscow: VNIPO MChS Rossii, 2015, pp. 336-345.
21. Noskov S.S., Baykov A.V., Naydenov D.S. Puti rasshireniya vozmozhnostey robototekhnicheskikh sredstv pri likvidatsii ChS [Ways to expand the capabilities of robotic means in the elimination of emergencies], *Primenenie robototekhnicheskikh kompleksov spetsial'nogo naznacheniya: Sb. trudov seksii № 5 XXIX Mezhdunarodnoy nauchno-*

- prakticheskoy konferentsii «Predotvrashchenie. Spasenie. Pomoshch'», 21 marta 2019 g. [The use of robotic systems for special purposes: Proceedings of section No. 5 of the XXIX International scientific and practical conference "Prevention. The rescue. Help", March 21, 2019]. FGBVOU VO AGZ EMERCOM of Russia, 2019, pp. 103-111.
22. Formulyar 006-TIPSA-2010. Rukava pozhamye napornye OROFLEX20 [Form 006-TIPSA-2010. Pressure fire hoses OROFLEX20]. Balashikha: FGU VNIPO MCHS Rossii, 2010, 11 p.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. С.С. Носков.

Баранник Александр Юрьевич – Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, федеральный центр науки и высоких технологий; e-mail: auba@yandex.ru; г. Москва, Россия; тел.: 89166951214; к.т.н.; с.н.с.; ведущий научный сотрудник 6 научно-исследовательского центра «Развития технических средств и технологий».

Лагутина Анна Викторовна – e-mail: anya-lagutina@yandex.ru; тел.: 89057118834; старший научный сотрудник 6 научно-исследовательского центра «Развития технических средств и технологий».

Павлов Евгений Владимирович – ФГБУ «Всероссийский ордена «Знак Почёта» научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России»; e-mail: pavlov-vp@mail.ru; г. Балашиха, Россия; тел.: 89167850002; старший научный сотрудник научно-исследовательского центра пожарной техники и пожарной автоматики.

Ершов Владимир Иванович – e-mail: evi-monino@mail.ru; тел.: 89690301515; к.в.н.; профессор; ведущий научный сотрудник научно-исследовательского центра пожарной техники и пожарной автоматики.

Barannik Alexander Yuryevich – All-Russian Scientific Research Institute for Civil Defense and Emergency of the EMERCOM of Russia, Federal Science and High Technologies Center; e-mail: auba@yandex.ru; Moscow, Russia; phone: +79166951214; cand. of eng. sc.; senior researcher; leading researcher of the 6th Research Center Development of technical means and technologies.

Lagutina Anna Viktorovna – e-mail: anya-lagutina@yandex.ru; phone: +79057118834; senior researcher of the 6th Research Center Development of technical means and technologies.

Pavlov Evgeny Vladimirovich – Federal State Budgetary Institution "All-Russian Order" Badge of Honor "Research Institute of Fire Defense of the Ministry of Emergency Situations of Russia", e-mail: pavlov-vp@mail.ru; Balashikha, Russia; phone: +79167850002; senior researcher at the Research Center for Fire Engineering and Fire Automation.

Ershov Vladimir Ivanovich – e-mail: evi-monino@mail.ru; phone: +79690301515; cand. of mil. sc.; sprofessor; leading researcher of the Research Center for Fire Engineering and Fire Automation.

УДК 681.5

DOI 10.18522/2311-3103-2023-1-88-100

Е.Ю. Пушкарёва, И.В. Пискулин

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ РТК ВН В РЕЖИМЕ АВТОНОМНОГО НАВЕДЕНИЯ

Целью исследования является повышение точности системы управления движением наземных робототехнических комплексов военного назначения (РТК ВН) гусеничного типа на основе применения метода построения двухконтурных систем автоматического управления, эквивалентных комбинированным системам. Использование систем автоматического управления, эквивалентных комбинированным системам позволяет добиться повышения точности систем автоматического управления за счет уменьшения значения динамической ошибки, то есть достижение инвариантности ошибки, без нарушения устойчивости системы. Задачей исследования явля-

ется возможность достижения нулевой ошибки в одноконтурных и двухконтурных системах автоматического управления движением РТК. Для решения данной задачи необходимо определить структуру САУ и составить структурные схемы систем автоматического управления движением РТК ВН по углу курса. Данная задача может быть решена поэтапно. В ходе первого этапа рассматривается связь ошибок управления в одноконтурных системах автоматического управления с постоянным входным воздействием. Следующим этапом является обоснование построения двухконтурных систем с учетом линейного входного воздействия. Далее необходимо определить параметры второго контура двухконтурной САУ движением РТК. В задаче рассматривается связь динамической ошибки управления в двухконтурных САУ движением РТК по углу курса с линейным входным воздействием. Используемый в статье метод позволяет решать задачу достижения инвариантности ошибки в САУ движением РТК ВН по углу курса. В работе приведена методика определения параметров и структуры САУ в целях достижения нулевой ошибки, что, в свою очередь, приводит к повышению точности при соблюдении требования к устойчивости системы. Результаты расчетов подтверждают работоспособность предложенной методики и показывают, что при различных вариантах входных воздействий (постоянном и линейном) в одноконтурных и двухконтурных САУ движением РТК по курсу удается достичь независимости уменьшения динамической ошибки от устойчивости САУ (т.е. достижения инвариантности ошибки без потери устойчивости системы).

Робототехнический комплекс; система управления движением; угол курса; метод двухконтурных систем; инвариантность; структурная схема.

E.Y. Pushkareva, I.V. Piskulin

METHODOLOGY FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF THE TRACKING SYSTEM OF THE RTK VN MOTION CONTROL IN THE AUTONOMOUS GUIDANCE MODE

The aim of the study is to improve the accuracy of the motion control system of ground-based robotic systems for military purposes (RTK VN) of tracked type based on the application of the method of constructing two-circuit automatic control systems equivalent to combined systems. The use of automatic control systems equivalent to combined systems makes it possible to increase the accuracy of automatic control systems by reducing the value of the dynamic error, that is, achieving error invariance, without violating the stability of the system. The objective of the study is the possibility of achieving zero error in single-circuit and double-circuit automatic motion control systems RTK. To solve this problem, it is necessary to determine the structure of the ACS and draw up block diagrams of automatic traffic control systems of the RTK VN along the angle of the course. This task can be solved in stages. During the first stage, the connection of control errors in single-circuit automatic control systems with a constant input effect is considered. The next stage is the justification of the construction of two-circuit systems taking into account the linear input effect. Next, it is necessary to determine the parameters of the second circuit of the two-circuit ACS by the movement of the RTK. The problem considers the relationship of the dynamic control error in dual-circuit ACS by the movement of the RTK along the angle of the course with the linear input effect. The method used in the article allows us to solve the problem of achieving the invariance of the error in the ACS by the movement of the RTK VN along the angle of the course. The paper presents a methodology for determining the parameters and structure of the ACS in order to achieve zero error, which, in turn, leads to increased accuracy while meeting the requirements for the stability of the system. The calculation results confirm the operability of the proposed methodology and show that with various input effects (constant and linear) in single-circuit and double-circuit ACS, the RTK movement along the course can achieve independence of reducing the dynamic error from the stability of the ACS (i.e., achieving error invariance without loss of stability of the system).

Robotics complex; motion control system; course angle; method of two-circuit systems; invariance; block diagram.

Введение. Под робототехническими комплексами военного назначения (РТК ВН) будем понимать совокупность функционально взаимосвязанных элементов: базового носителя (изделия военной робототехники), специализированного навесного (встраиваемого) оборудования, представленного в виде набора съемных мо-

дулей полезной (целевой) нагрузки, а также средств обеспечения и обслуживания, используемых при подготовке к применению и дальнейшей технической эксплуатации комплекса [17–20].

Основными областями применения РТК ВН в интересах ракетных войск стратегического назначения (РВСН) являются:

- ◆ разведка и наблюдение позиционных районов (поиск, обнаружение и слежение за силами и средствами противника);
- ◆ патрулирование на заданных рубежах и боевое охранение;
- ◆ охрана пунктов управления, противовоздушная и противоракетная оборона;

На этапе несения боевого дежурства РТК ВН в составе ракетных комплексов стратегического назначения (РКСН) [17, 18] могут быть разделены на две группы:

- ◆ боевые – используемые, в основном, для проведения разведки позиционных районов и охраны пунктов управления ракетных соединений;
- ◆ обеспечивающие – специальные и транспортные РТК для решения задач поддержки.

Боевой РТК в ходе выполнения охранных функций элементов РВСН должен осуществлять обнаружение, а затем слежение за целью в режиме автономного наведения. Выполнение указанной задачи должно осуществляться в процессе сближения РТК с объектом наблюдения, т.е. уменьшения дальности до цели, что, в свою очередь, может улучшить качество наблюдения, усилить сигнал, увеличить линейное разрешение объекта. В связи с вышесказанным, задача управления движением РТК ВН и увеличения его подвижности становится все более востребованной [2–9].

Учитывая тот факт, что элементы РВСН могут находиться в труднодоступных для движения РТК рельефах местности (лесистая местность, неровности поверхности и др.) для исследования управляемого движения робота выбран РТК гусеничного типа, так как он способен преодолевать большие препятствия и имеет значительную площадь контакта с поверхностью перемещения [3, 4]. Использование РТК гусеничного типа приводит к необходимости применения метода управления углом курса РТК по разности скоростей [5, 7–9]. Исходя из изложенного, следует, что в данной работе объектом исследования является система автоматического управления (САУ) углом курса РТК, работающая по методу разности скоростей.

Задачам повышения точности без нарушения устойчивости систем автоматического управления посвящено значительное количество работ [9–16]. Лучше всего подобные задачи решаются в классе комбинированных систем автоматического управления, работающих по отклонению и задающему воздействию [10, 11].

В условиях, если внешние воздействия (задающие и возмущающие) не измеряемы, следует использовать теорию САУ, которые являются эквивалентными комбинированным автоматическим системам.

Для повышения точности автоматических систем управления, применяемых в системах управления движением РТК, необходимо обратиться к теории инвариантности [11–13]. Данная теория позволяет обосновать выбор структуры САУ, применяемых для управления движением РТК.

Формальная постановка задачи. В целях исследования точности систем автоматического управления движением РТК ВН по курсу необходимо выяснить связь ошибки воспроизведения угла курса от входного воздействия. В ходе исследования необходимо определить возможность достижения нулевой ошибки в одноконтурных и двухконтурных системах автоматического управления движением РТК.

Решение сформулированной выше задачи предлагается осуществлять в три этапа. На первом этапе необходимо определить структуру САУ и составить структурные схемы систем автоматического управления движением РТК ВН по углу курса.

На втором этапе необходимо определить связь ошибок управления в одно-контурных системах автоматического управления движением РТК с постоянным входным воздействием.

На третьем этапе необходимо определить параметры второго контура двухконтурной САУ движением РТК, определить связь динамической ошибки управления с линейным входным воздействием.

Исходя из того, что в системах, эквивалентных комбинированным, задающее воздействие непосредственно неизмеряемо, а само управление формируется в зависимости от сигнала идентификационного устройства, можно выделить два случая функционирования САУ движением РТК ВН:

- ♦ цель неподвижна, скорость ее перемещения равна нулю, рис. 1;
- ♦ цель подвижна, ее скорость не равна нулю, рис. 2.

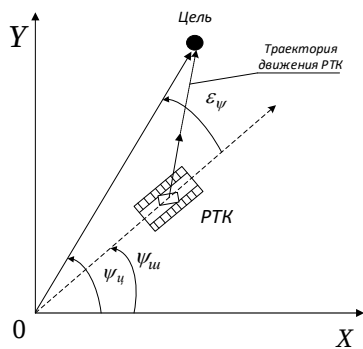


Рис. 1. К иллюстрации траектории движения РТК при постоянном входном воздействии на следящую систему по углу курса ψ_u ($\psi_u = \text{const}$)

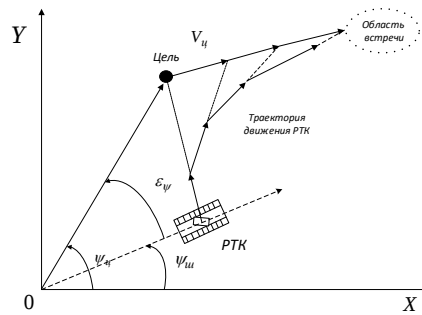


Рис. 2. К иллюстрации траектории движения РТК при линейном входном воздействии на следящую систему по углу курса ψ_u ($\psi_u \neq \text{const}$)

На рис. 1 и 2 линия ОХ является осью отсчета угловых величин.

Структурная схема одноконтурной САУ движением РТК ВН. РТК при выполнении охранных функций может выполнять задачи обнаружения и распознавания целей в автоматическом режиме [2, 3, 17, 18]. Более простым способом управления движением РТК является случай, при котором скорость перемещения цели равна нулю (цель неподвижна). В этом случае угол курса является величиной постоянной ($\psi_u = \text{const}$).

Структурная схема САУ движением РТК по углу курса в случае, при котором можно добиться нулевой ошибки, представлена в виде одноконтурной системы на рис. 3.

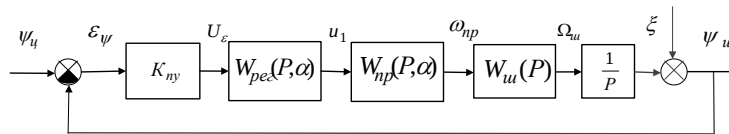


Рис. 3. Структурная схема одноконтурной САУ движением РТК по курсу

На указанной схеме ψ_u — угол курса цели относительно оси отсчета; ε_{ψ} — ошибка воспроизведения угла курса; U_{ε} — сигнал от измерительного устройства; u_1 — управление по ошибке; ω_{np} — угловая скорость вала привода;

$\Omega_{\text{ш}}$ – угловая скорость поворота шасси; ξ – воздействие от возмущения; $\psi_{\text{ш}}$ – угол курса движения РТК; $W_{\text{pezl}}(P, \alpha)$, $W_{\text{np}}(P, \alpha)$, $W_{\text{ш}}(P)$ – передаточные функции регулятора, привода, шасси РТК, α – коэффициент подвижности РТК при управлении по методу разности скоростей [5–8].

Передаточные функции регулятора, привода, шасси определяются в соответствии с [1] следующими выражениями:

$$W_{\text{pezl}}(P, \alpha) = K_{\text{pez}} K(\alpha); W_{\text{np}}(P, \alpha) = \frac{K_{\text{э}} K_{\text{д}} W(\alpha)}{(1 + T_{\text{э}} P)(1 + T_{\text{д}} P)}; W_{\text{ш}}(P) = \frac{K_{\text{ш}}}{1 + T_{\text{ш}} P}, \quad (1)$$

$$K(\alpha) = \frac{1}{\alpha - 1}, \alpha > 1, W(\alpha) = \alpha - 1, \alpha > 1,$$

где $K_{\text{э}}, K_{\text{д}}, K_{\text{ш}}$ – коэффициенты усиления электромашинного усилителя, электродвигателя и шасси соответственно; $T_{\text{э}}, T_{\text{д}}, T_{\text{ш}}$ – их постоянные времени.

Следует заметить, что определение коэффициента $K(\alpha)$ регулятора было синтезировано из условия минимума функции чувствительности как отношение относительного изменения передаточной функции замкнутой САУ к относительному изменению параметра α [5].

Передаточная функция разомкнутой системы с переменными параметрами будет определяться следующим образом:

$$W_p(P, \alpha) = \frac{K_{\text{ny}} K_{\text{pez}} K_{\text{э}} K_{\text{д}} K_{\text{ш}} K(\alpha) W(\alpha)}{(1 + T_{\text{э}} P)(1 + T_{\text{д}} P)(1 + T_{\text{ш}} P) P}, \quad (2)$$

$K_{\text{v}} = K_{\text{ny}} K_{\text{pez}} K_{\text{э}} K_{\text{д}} K_{\text{ш}}$ – коэффициент усиления по скорости.

Передаточная функция по ошибке одноконтурной САУ с учетом выражений (1), (2) и $K(\alpha)W(\alpha) = 1$ определяется следующим образом:

$$W_{\varepsilon}(P) = \frac{1}{1 + W_p(P)} = \frac{(1 + T_{\text{э}} P)(1 + T_{\text{д}} P)(1 + T_{\text{ш}} P) P}{(1 + T_{\text{э}} P)(1 + T_{\text{д}} P)(1 + T_{\text{ш}} P) P + K_{\text{v}}} =$$

$$= \frac{T_{\text{э}} T_{\text{д}} T_{\text{ш}} P^4 + T_{\text{э}} T_{\text{д}} P^3 + T_{\text{д}} T_{\text{ш}} P^3 + T_{\text{э}} T_{\text{ш}} P^3 + T_{\text{э}} P^2 + T_{\text{д}} P^2 + T_{\text{ш}} P^2 + P}{T_{\text{э}} T_{\text{д}} T_{\text{ш}} P^4 + T_{\text{э}} T_{\text{д}} P^3 + T_{\text{д}} T_{\text{ш}} P^3 + T_{\text{э}} T_{\text{ш}} P^3 + T_{\text{э}} P^2 + T_{\text{д}} P^2 + T_{\text{ш}} P^2 + P + K_{\text{v}}} \quad (3)$$

В соответствии с [1], а также с учетом заданных воздействий, выражение для установившихся ошибок (т.е. $t \rightarrow \infty, P \rightarrow 0$) примет вид:

$$\varepsilon_{\psi} = D_0 \psi_{\text{ш}} + D_1 \frac{d\psi_{\text{ш}}}{dt}, \quad (4)$$

где $D_0 = W_{\varepsilon}(P) \big|_{P=0}$ – коэффициент ошибки по положению;

$D_1 = \frac{dW_{\varepsilon}(P)}{dP} \big|_{P=0}$ – коэффициент ошибки по скорости.

Исходя из того, что угол курса является величиной постоянной ($\psi_{\text{ш}} = \text{const}$), установившаяся ошибка будет равна только ошибке по положению ε_0 . Выражение для определения ошибки примет вид:

$$\varepsilon_0 = D_0 \psi_{\text{ш}}. \quad (6)$$

В соответствии с схемой рис. 3 одноконтурная САУ имеет интегрирующее звено (порядок астатизма системы V равен единице). Поэтому в САУ с астатизмом первого порядка коэффициент ошибки по положению равен нулю ($D_0 = 0$). Следовательно, ошибка по положению будет равна нулю:

$$\varepsilon_0 = D_0 \psi_y = 0. \quad (7)$$

Исходя из вышесказанного и выражения (7), следует, что в одноконтурной САУ движением РТК ВН по курсу, структура которой представлена на рис. 3, можно добиться нулевой ошибки воспроизведения угла курса только при постоянном входном воздействии.

Структурная схема двухконтурной САУ движением РТК ВН, эквивалентная комбинированной системе. РТК в режиме слежения может выполнять задачу по обнаружению двигающейся цели [3, 4]. При указанных условиях скорость передвижения цели не равна нулю (цель перемещается), соответственно угол курса изменяется с течением времени $\psi_y(t) = \psi_0 + \dot{\psi}_y(t)$, что в свою очередь затрудняет задачу управления движением РТК ВН в соответствии с структурной схемой, представленной на рис. 3.

Добиться выполнения условия получения нулевой ошибки по скорости возможно повышением порядка астатизма системы до второго порядка ($\nu=2$), если поставить еще один интегратор в разомкнутый канал схемы рис. 3. В данном случае возникают проблемы с обеспечением устойчивости замкнутой системы, что следует из построения амплитудно-фазовой характеристики разомкнутой системы.

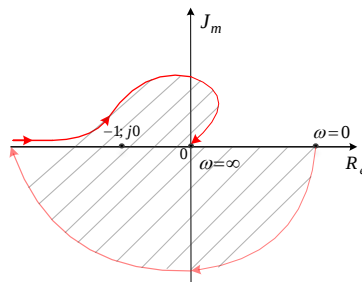


Рис. 4. К иллюстрации неустойчивости замкнутой САУ движением РТК по курсу при втором порядке астатизма

Увеличение астатизма на единицу в схеме системы управления (т.е. включение в разомкнутый канал еще одного интегрирующего звена) может привести к ее неустойчивости, выйти из которой путем изменения параметров $K_{ny}, K_{pez}, K_{\theta}, K_D, K_{uu}$ не представляется возможным.

Включение в разомкнутый канал управления форсирующих контуров не снимет проблему устойчивости в ситуациях наличия на входе следящей системы угловых случайных процессов (помех).

Повышение порядка астатизма, приводящего к выполнению требования нулевой скоростной ошибки без нарушения устойчивости замкнутого контура, можно добиться в регуляторе второго контура двухконтурной системы, эквивалентной комбинированной автоматической системе [9–11].

Таким образом, наличие во втором контуре регулятора приводит к повышению порядка астатизма на единицу без влияния на устойчивость одноконтурной САУ.

Структурная схема двухконтурной САУ, эквивалентной комбинированной системе, может быть построена двумя способами:

- ♦ без охвата регулятора второго контура обратной связью;
- ♦ с охватом регулятора положительной обратной связью.

Вариант 1. Построение двухконтурной САУ, эквивалентной комбинированной системе, применительно к САУ рис. 3.

Структурная схема примет вид, представленный на рис. 5.

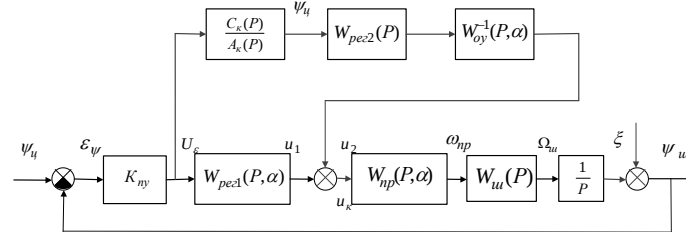


Рис. 5. Структурная схема двухконтурной САУ, эквивалентная комбинированной без охвата регулятора обратной связью

На данной схеме K_{ny} – коэффициент преобразования измерительного устройства; ξ – воздействие от возмущения.

Определение полиномов $\frac{C_k(P)}{A_k(P)}$ осуществляется в соответствии с [5] по следующим выражениям:

$$\begin{aligned} C_k(P) &= C_1(P)C_{pec2}(P), \\ A_k(P) &= A_1(P)[C_{pec2}(P) - B_{pec2}(P)P^{-1}] \end{aligned} \quad (8)$$

Остановимся более подробно на структурной схеме с охватом регулятора второго контура положительной обратной связью. Построение схемы является практически аналогичным, за исключением структуры первого блока второго контура.

Вариант 2. Построение двухконтурной САУ, эквивалентной комбинированной системе, в которой предусматривается охват регулятора 2 положительной обратной связью, соответствующая схема представлена на рис. 6.

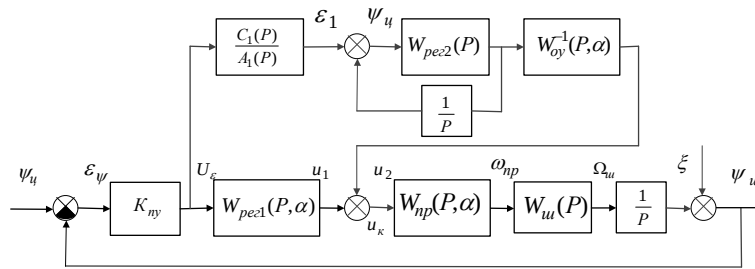


Рис. 6. Структурная схема двухконтурной САУ, эквивалентная комбинированной с замкнутым регулятором второго контура

На указанной схеме: ε_ψ – ошибка воспроизведения угла курса; U_ε – сигнал от измерительного устройства; u_1, u_2, u_k – управление от первого контура, управление от второго контура, комбинированное управление соответственно. Блок с ПФ $W_{oy}^{-1}(P, \alpha)$ осуществляет инверсию ПФ $W_{oy}(P)$.

Передаточные функции регулятора 1, привода, шасси определяются следующими выражениями:

$$W_{pez1}(P) = K_{pez}K(\alpha); W_{np}(P) = \frac{K_3K_\delta W(\alpha)}{(1+T_3P)(1+T_\delta P)}; W_{ш}(P) = \frac{K_{ш}}{1+T_{ш}P}, \quad (9)$$

где $K_3, K_\delta, K_{ш}$ – коэффициенты усиления электромашинного усилителя, электродвигателя и шасси соответственно; $T_3, T_\delta, T_{ш}$ – их постоянные времени.

Передаточная функция разомкнутой системы будет иметь вид:

$$W_p(P) = \frac{K_{ny}K_{pez}K_3K_\delta K_{ш}}{(1+T_3P)(1+T_\delta P)(1+T_{ш}P)P}. \quad (10)$$

$K_v = K_{ny}K_{pez}K_3K_\delta K_{ш}$ – коэффициент усиления.

Передаточная функция по ошибке первого контура САУ с учетом выражений определяется выражением:

$$W_\varepsilon^{(1)}(P) = \frac{(1+T_3P)(1+T_\delta P)(1+T_{ш}P)P}{(1+T_3P)(1+T_\delta P)(1+T_{ш}P)P + K_v} =$$

$$= \frac{T_3T_\delta T_{ш}P^4 + (T_3T_\delta + T_\delta T_{ш} + T_3T_{ш})P^3 + (T_3 + T_\delta + T_{ш})P^2 + P}{T_3T_\delta T_{ш}P^4 + (T_3T_\delta + T_\delta T_{ш} + T_3T_{ш})P^3 + (T_3 + T_\delta + T_{ш})P^2 + P + K_v} \quad (11)$$

Из схемы рис. 6 видно, что блок с передаточной функции $\frac{C_1(P)}{A_1(P)}$ является обратным по отношению к блоку с передаточной функцией $W_\varepsilon^{(1)}(P) = \frac{A_1(P)}{C_1(P)}$, где:

$$\left. \begin{aligned} C_1(P) &= T_3T_\delta T_{ш}P^4 + (T_3T_\delta + T_\delta T_{ш} + T_3T_{ш})P^3 + (T_3 + T_\delta + T_{ш})P^2 + P + K_v; \\ A_1(P) &= T_3T_\delta T_{ш}P^4 + (T_3T_\delta + T_\delta T_{ш} + T_3T_{ш})P^3 + (T_3 + T_\delta + T_{ш})P^2 + P. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Сравнение выражений (8) и (12) показывает, что в схеме САУ, где во втором контуре имеется регулятор 2, охваченный положительной обратной связью по интегратору, идентификатор задающего воздействия ψ_y является более простым, так как имеет меньший порядок. При этом инверторы (инерционная часть объекта управления) имеют одинаковую передаточную функцию $(1+T_3P)(1+T_\delta P)(1+T_{ш}P)$.

Передаточная функция двухконтурной системы по ошибке в соответствии с (8) определяется выражением:

$$W_\varepsilon^{(2)}(P) = \frac{A_1(P)[C_{pez2}(P) - B_{pez2}(P)P^{-\nu}]}{C_1(P)C_{pez2}(P)}. \quad (13)$$

где $C_{pez2}(P), B_{pez2}(P)$ – полиномы регулятора второго контура двухконтурной системы, эквивалентной комбинированной.

При синтезе регулятора необходимо его структуру и коэффициенты указанных полиномов. Из условий физической реализуемости зададим:

$$\left. \begin{aligned} B_{pez2}(P) &= b_0 + b_1P, \\ C_{pez2}(P) &= c_0 + c_1P. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Подставляя указанные полиномы в числитель выражения (13), получим следующее выражение в квадратных скобках:

$$C_0 + C_1 P - \frac{b_0}{P} - b_1. \quad (15)$$

Учитывая, что в данной разности не должно быть членов с отрицательными степенями P , необходимо положить $b_0 = 0$.

Кроме того, исходя из требования повышения порядка астатизма на один порядок, необходимо положить $b_1 = C_0$, что превратит эту разность в одночлен $C_1 P$.

В связи с этим, ПФ (13) примет вид:

$$W_{\varepsilon}^{(2)}(P) = \frac{A_1(P)}{C_1(P)} \cdot \frac{C_1 P}{C_0 + C_1 P}. \quad (16)$$

С учетом наличия в полиноме $A_1(P)$ свободного оператора P , а также аналогичного оператора при коэффициенте C_1 , получим в числителе ПФ по ошибке второго контура оператор P^2 . Следовательно, двухконтурная САУ имеет второй порядок астатизма.

При этом ПФ самого регулятора второго контура определяется в соответствии с выражением:

$$W_{\text{рег2}}(P) = \frac{B_{\text{рег2}}(P)}{C_{\text{рег2}}(P)} = \frac{b_1 P}{C_0 + C_1 P}. \quad (17)$$

Полином знаменателя регулятора второго контура входит в характеристический полином всей двухконтурной САУ:

$$C_k(P) = C_1(P)(C_0 + C_1 P). \quad (18)$$

Для устойчивости двухконтурной САУ (при условии, что полином $C_1(P)$ также устойчив), необходимо иметь

$$C_0 + C_1 P = 0 \Rightarrow P_1 = -\frac{C_0}{C_1} < 0. \quad (19)$$

Для того, чтобы корень P_1 находился на большем удалении от мнимой оси необходимо иметь условие $C_1 \ll C_0$.

С учетом выражений (12) и (16) можно записать более полное описание для ПФ по ошибке второго контура:

$$W_{\varepsilon}^{(2)}(P) = \frac{[(1 + T_{\text{э}}P)(1 + T_{\text{д}}P)(1 + T_{\text{ш}}P)P]C_1 P}{[(1 + T_{\text{э}}P)(1 + T_{\text{д}}P)(1 + T_{\text{ш}}P)P + K_v](C_0 + C_1 P)}. \quad (20)$$

Следует заметить, что выражение для функции чувствительности, определение которой было дано ранее, совпадает с выражением для передаточной функции по ошибке [1]. Поэтому выражения (13) и (16) можно рассматривать как функции чувствительности. Из данных выражений видно, что отношение полиномов $A_1(P)/C_1(P)$ – это функция чувствительности первого (основного) контура, а оставшееся выражение – это множитель, образованный вторым контуром (его регулятором) и влияний на функции чувствительности первого контура. Если, например, функция чувствительности первого контура не равна нулю, то ее можно уменьшить за счет множителя второго контура. В данном случае, это видно из выражения (16): если отношение полиномов $A_1(P)/C_1(P) \neq 0$, то при $P=0$ (установившийся режим) функция чувствительности двухконтурной системы управления углом курса РТК обращается в нуль.

Исходя из того, что необходимо найти ошибку в установившемся режиме при линейном законе входного воздействия $\psi_u = \psi_0 + \frac{d\psi}{dt}$, то, как показано в [1], коэффициенты ошибок $D_0 = 0$, $D_1 = \frac{1}{K_v}$. Следовательно, ошибка по положению ε_0 будет равна нулю и установившаяся ошибка будет равна только ошибке по скорости ε_v . Выражение для определения ошибки примет вид:

$$\varepsilon_v = D_1 \frac{d\psi}{dt} = \frac{\dot{\psi}_u}{K_v}. \quad (21)$$

Из вышесказанного и выражения (21) следует, что ошибка увеличивается с ростом скорости задающего воздействия $\dot{\psi}_u$.

С учетом того, что $C_1 \ll C_0$ и $T_1 \ll T_2$ получим следующий закон управления РТК:

$$u_k(t) = u_1(t) + u_2(t),$$

$$\begin{aligned} u_1(t) &= K_{ny}(1 + T_2 P) \varepsilon_{\psi}(t) = K_{ny} \varepsilon_{\psi}(t) + K_{ny} T_2 \frac{d\varepsilon_{\psi}(t)}{dt}, \quad p = \frac{d}{dt}, \\ u_2(t) &= \frac{B_{pec2}(P)}{C_{pec2}(P)} \left(\frac{1 + T_{oy} P}{K_v} \right) \psi_u(t) = \frac{b_1}{C_0 K_v} \frac{d}{dt} \psi_u(t) + \frac{b_1 T_{oy}}{C_0 K_v} \frac{d^2 \psi_u(t)}{dt^2}. \end{aligned} \quad (22)$$

Первое управление формируется по ошибке ε_{ψ} , а второе управление формируется по углу ψ_u .

Заключение. Предложенная в работе методика определения параметров структуры параметров регуляторов САУ движением РТК в автономном режиме показывает следующее:

САУ движением РТК по курсу является системой с переменными параметрами, т.к.:

- ♦ в двухканальном электроприводе появляются усилительное звено с коэффициентом « α » [$W(\alpha)$];

- ♦ в регуляторе такой САУ для уменьшения чувствительности к изменению « α » должно быть также усилительное звено с коэффициентом « α » [$K(\alpha)$].

В одноконтурных системах возможно повышение точности САУ за счет получения нулевой ошибки при постоянном входном воздействии.

В двухконтурных САУ движением РТК, эквивалентных комбинированным системам, при линейном законе входного воздействия возможно достижение инвариантности ошибки (уменьшения ее величины) за счет изменения (увеличения значения) коэффициента усиления системы K_v .

Показано, что при использовании двухконтурной системы при управлении углом курса РТК следящая система за целью по угловым координатам становится менее чувствительной к изменению параметров объекта управления (шасси и электропривода).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пушкарёв Ю.А., Пушкарева Е.Ю. Теория автоматического управления: учебник. – Серпухов: ФВА РВСН им. Петра Великого, 2020. – 476 с.
2. Свиридов В.В., Пушкарёв Ю.А. Модель оценки качества характеристик робототехнического комплекса для обнаружения нарушителей в лесистой местности // Математическое моделирование и численные методы. – 2021. – № 29. – С. 77-90.
3. Пушкарёв Ю.А., Свиридов В.В. Метод распознавания объектов на основе их сигнально-геометрических признаков средствами робототехнического комплекса охраны // Математическое моделирование и численные методы. – 2022. – Т. 34, № 9. – С. 88-106.

4. Вишняков Л.В., Ким В.Я. Моделирование поиска-обнаружения-распознавания по тепловизионному изображению с изменяющимся качеством // Известия РАН ТiСУ. – 2020. – № 6. – С. 96-108.
5. Пушкарёв Ю.А., Пушкарёва Е.Ю., Пискулин И.В. Управление робототехническим комплексом по углу курса на основе метода разности скоростей // Известия ИИФ. – 2022. – № 4. – С. 45-51.
6. Давыдов О.И., Платонов А.И. Метод определения параметров управления траекторией движения мобильного робота // Известия РАН ТiСУ. – 2017. – № 1. – С. 168-176.
7. Пушкарёв Ю.А., Пушкарёва Е.Ю., Пискулин И.В. Методика определения областей устойчивого движения робота по курсу при управлении по методу разностей скоростей. 4 ЦНИИ Минобороны России, г. Королев, 2022. – № 168. – Т. 1. – С. 45-54.
8. Richard C. Dorf, Robert H. Bishop. Modern Control Systems. – Fourth Edition. – Addison – Wesley, 1998. – 832 p.
9. Пушкарёв Ю.А., Пушкарёва Е.Ю. Системы автоматического управления в ракетно-космической технике. Задачи слежения и терминального управления: монография. – Серпухов, ФВА РВСН им. Петра Великого, 2020. – 379 с.
10. Пушкарёв Ю.А., Пушкарёва Е.Ю. Задачи и методы синтеза следящих и терминальных систем автоматического управления в ракетно-космической технике: монография. – Машиностроение – Полет, 2022. – 647 с.
11. Пушкарёв Ю.А., Пушкарёва Е.Ю. Методы синтеза следящих и терминальных автоматических систем высокой точности: монография. – Серпухов: ФВА РВСН им. Петра Великого, 2016. – 435 с.
12. Пушкарёв Ю.А., Родыгин В.А. Терминальный метод достижения инвариантности системы управления движением объекта // Известия РАН ТiСУ. – 2009. – № 6. – С. 12-18.
13. Пушкарёв Ю.А., Родыгин В.А. Критерий достижения инвариантности в детерминированных системах управления движением объектов // Известия РАН ТiСУ. – 2011. – № 4. – С. 37-47.
14. Крутько П.Д., Чхеидзе Г.А. Синтез алгоритмов управления следящих систем высокой динамической точности // Известия РАН. Техническая кибернетика. – 1992. – № 2. – С. 145-178.
15. Филаретов В.Ф., Южмеев Д.А. Метод формирования гладких траекторий движения мобильных роботов в неизвестном заранее окружении // Известия РАН ТiСУ. – 2017. – № 4. – С. 174-184.
16. Rao A.V. Survey of Numerical method for Optimal Control // Advances Astronautical Sciences. – 2010. – Vol. 135. – P. 497-528.
17. Корсунский В.А. Перспективы развития военных мобильных робототехнических комплексов наземного базирования в России. – М.: МГТУ им. Баумана, 2013. – 379 с.
18. Фазлетдинов И.Р. Перспективы применения робототехнических комплексов военного назначения в интересах Ракетных войск стратегического назначения // Военная мысль. – 2022. – № 5. – С. 105-111.
19. Скиба В.А. и др. Робототехнические комплексы военного назначения: учеб. пособие. – Балашиха: ВА РВСН им. Петра Великого, 2021. – 168 с.
20. Лопота А.В. Наземные робототехнические комплексы военного и специального назначения. – СПб.: ЦНИИ робототехники и технической кибернетики, 2016. – 29 с.

REFERENCES

1. Pushkarev Yu.A., Pushkareva E.Yu. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: uchebnik [Theory of automatic control: textbook]. Serpukhov: FVA RVSН im. Petra Velikogo, 2020, 476 p.
2. Sviridov V.V., Pushkarev Yu.A. Model' otsenki kachestva kharakteristik robototekhnicheskogo kompleksa dlya obnaruzheniya narushiteley v lesistoy mestnosti [A model for assessing the quality of characteristics of a robotic complex for detecting intruders in a wooded area], *Matematicheskoe modelirovaniye i chislennyye metody* [Mathematical modeling and numerical methods], 2021, No. 29, pp. 77-90.
3. Pushkarev Yu.A., Sviridov V.V. Metod raspoznavaniya ob"ektov na osnove ikh signal'no-geometricheskikh priznakov sredstvami robototekhnicheskogo kompleksa okhrany [Method of object recognition based on their signal-geometric features by means of a robotic security complex], *Matematicheskoe modelirovaniye i chislennyye metody* [Mathematical modeling and numerical methods], 2022, Vol. 34, No. 9, pp. 88-106.
4. Vishnyakov L.V., Kim V.Ya. Modelirovaniye poiska-obnaruzheniya-raspoznavaniya po teplovizionnomu izobrazheniyu s izmenyayushchimsya kachestvom [Modeling of search-detection-recognition based on a thermal image with varying quality], *Izvestiya RAN TiSU* [Izvestiya RAS TiSU], 2020, No. 6, pp. 96-108.

5. Pushkarev Yu.A., Pushkareva E.Yu., Piskulin I.V. Upravlenie robototekhnicheskimi kompleksami po uglu kursa na osnove metoda raznosti skorostey [Control of the robotic complex by the angle of the course based on the speed difference method], *Izvestiya IIF* [Izvestiya IIF], 2022, No. 4, pp. 45-51.
6. Davydov O.I., Platonov A.I. Metod opredeleniya parametrov upravleniya traektoriy dvizheniya mobil'nogo robota [Method of determining parameters of control of the trajectory of movement of a mobile robot], *Izvestiya RAN TiSU* [Izvestiya RAS TiSU], 2017, No. 1, pp. 168-176.
7. Pushkarev Yu.A., Pushkareva E.Yu., Piskulin I.V. Metodika opredeleniya oblastey ustoychivogo dvizheniya robota po kursu pri upravlenii po metodu raznostey skorostey [Methodology for determining the areas of stable movement of the robot along the course when controlled by the method of speed differences]. 4 TSNII Minoborony Rossii, g. Korolev, 2022, No. 168, Vol. 1, pp. 45-54.
8. Richard C. Dorf, Robert H. Bishop. Modern Control Systems. Fourth Edition. Addison – Wesley. 1998, 832 p.
9. Pushkarev Yu.A., Pushkareva E.Yu. Sistemy avtomaticheskogo upravleniya v raketno-kosmicheskoy tekhnike. Zadachi slezheniya i terminal'nogo upravleniya: monografiya [Automatic control systems in rocket and space technology. Tasks of tracking and terminal management: monograph]. Serpukhov, FVA RVSN im. Petra Velikogo, 2020, 379 p.
10. Pushkarev Yu.A., Pushkareva E.Yu. Zadachi i metody sinteza sledyashchikh i terminal'nykh sistem avtomaticheskogo upravleniya v raketno-kosmicheskoy tekhnike: monografiya [Tasks and methods of synthesis of tracking and terminal automatic control systems in rocket and space technology: monograph]. Mashinostroyeniye – Polet, 2022, 647 p.
11. Pushkarev Yu.A., Pushkareva E.Yu. Metody sinteza sledyashchikh i terminal'nykh avtomaticheskikh sistem vysokoy tochnosti: monografiya [Methods of synthesis of tracking and terminal automatic systems of high accuracy: monograph]. Serpukhov: FVA RVSN im. Petra Velikogo, 2016, 435 p.
12. Pushkarev Yu.A., Rodygin V.A. Terminal'nyy metod dostizheniya invariantnosti sistemy upravleniya dvizheniem ob"ekta [Terminal method of achieving invariance of the object motion control system], *Izvestiya RAN TiSU* [Izvestiya RAS TiSU], 2009, No. 6, pp. 12-18.
13. Pushkarev Yu.A., Rodygin V.A. Kriteriy dostizheniya invariantnosti v determinirovannykh sistemakh upravleniya dvizheniem ob"ektov [Criterion for achieving invariance in deterministic systems for controlling the movement of objects], *Izvestiya RAN TiSU* [Izvestiya RAS TiSU], 2011, No. 4, pp. 37-47.
14. Krud'ko P.D., Chkheidze G.A. Sintez algoritmov upravleniya sledyashchikh sistem vysokoy dinamicheskoy tochnosti [Synthesis of control algorithms for tracking systems of high dynamic accuracy], *Izvestiya RAN. Tekhnicheskaya kibernetika* [Izvestiya RAS. Technical cybernetics], 1992, No. 2, pp. 145-178.
15. Filaretov V.F., Yuzhimets D.A. Metod formirovaniya gladkikh traektoriy dvizheniya mobil'nykh robotov v neizvestnom zaranee okruzhении [Method of forming smooth trajectories of movement of mobile robots in an unknown environment in advance], *Izvestiya RAN TiSU* [Izvestiya RAS TiSU], 2017, No. 4, pp. 174-184.
16. Rao A.V. Survey of Numerical method for Optimal Control, *Advances Astronautical Sciences*, 2010, Vol. 135, pp. 497-528.
17. Korsunskiy V.A. Perspektivy razvitiya voennykh mobil'nykh robototekhnicheskikh kompleksov nazemnogo bazirovaniya v Rossii [Prospects for the development of military mobile robotic complexes of ground-based in Russia]. Moscow: MGTU im. Bauman, 2013, 379 p.
18. Fazletdinov I.R. Perspektivy primeneniya robototekhnicheskikh kompleksov voennogo naznacheniya v interesakh Raketnykh voysk strategicheskogo naznacheniya [Prospects for the use of military-purpose robotic complexes in the interests of Strategic Missile Forces], *Voennaya mysl'* [Military thought], 2022, No. 5, pp. 105-111.
19. Skiba V.A. i dr. Robototekhnicheskie komplekсы voennogo naznacheniya: ucheb. posobie [Robotic complexes for military purposes: a textbook]. Balashikha: VA RVSN im. Petra Velikogo, 2021, 168 p.
20. Lopota A.V. Nazemnye robototekhnicheskie komplekсы voennogo i spetsial'nogo naznacheniya [Ground-based robotic complexes for military and special purposes]. St. Petersburg: TSNII robototekhniki i tekhnicheskoy kibernetiki, 2016, 29 p.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. Е.А. Щедрин.

Пушкарёва Елена Юрьевна – Филиал Военной академии РВСН им. Петра Великого; e-mail: calgon100@yandex.ru; г. Серпухов, Россия; тел.: 89151927439; д.т.н.; профессор.

Пискулин Игорь Викторович – e-mail: pikselzte@gmail.com; тел.: 89257250636; преподаватель.

Pushkareva Elena Yuryevna – Branch of the Military Academy of the Peter the Great Strategic Missile Forces; e-mail: calgon100@yandex.ru; Serpukhov, Russia; phone: +79151927439; dr. of eng. sc.; professor.

Piskulin Igor Viktorovich – e-mail: pikselzte@gmail.com; phone: +79257250636; lecturer.

УДК 004.81: 004.75

DOI 10.18522/2311-3103-2023-1-100-109

К.Ч. Бжихатлов, И.А. Пшенокова, А.У. Заммоев, Л.Б. Кокова
АВТОНОМНЫЙ РОБОТ ДЛЯ МОНИТОРИНГА НАЗЕМНЫХ
АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ РАСКОПОК

Огромный интерес к культурному наследию отражает желание человека знать и понимать свое происхождение и достижения. Однако, археологические памятники, как и природная среда, являются конечными не возобновляемыми ресурсами. Среди всех видов наследия, находящихся под угрозой, археологические памятники и их богатство информации и артефактов находятся под наибольшей угрозой. В современной практике варианты сохранения археологических памятников включают реконструкцию, повторную сборку (анастилез), сохранение и заципту in situ, включая укрытия и/или консолидацию тканей, сохранение ex situ путем перемещения, а также перезахоронение с интерпретацией участка или без нее. Однако, очень важно при проведении археологических раскопок не перемещать и не терять артефакты. При утрате или перемещении теряется их информационный потенциал. С целью обеспечения постоянного контроля процесса археологических изысканий, фиксации найденных артефактов, построения трехмерной модели изучаемого объекта и обеспечения безопасности на участке разработана система мониторинга раскопок, развернутая на автономном роботе. Задача данного исследования – разработка аппаратного и программного обеспечения робота. Робот представляет собой подвесную платформу сбора данных, перемещение которой обеспечивается несколькими тросами, закрепленными на неподвижных опорах. Перемещение платформы (как в плоскости, так и по высоте) обеспечивается за счет изменения длины тросов. Подобная схема перемещения позволяет обеспечить возможность перемещения платформы во всей плоскости треугольника, образуемого неподвижными опорами, а также спускаться или подниматься до высоты, ограниченной высотой самих опор. Платформа сбора данных, представляет собой плоскую платформу с установленной на ней модулем связи, микроконтроллером и аккумулятором. Снизу прикреплен гиростабилизатор, с закрепленными на нем видеокамерой и дальномером, который позволяет погасить колебания при движении платформы и внешних возмущениях. Представлен мультиагентный алгоритм работы системы мониторинга робота в процессе раскопок. Разработана программа для управления и сбора данных с системы мониторинга археологических объектов. Для апробации системы мониторинга изготовлен прототип робота, который был протестирован во время раскопок комплекса археологических памятников в Баксанском районе Кабардино-Балкарской республики.

Автономный робот, археологические раскопки, система мониторинга, мультиагентные системы.

K.Ch. Bzhikhatlov, I.A. Pshenokova, A.U. Zammoev
AUTONOMOUS ROBOT FOR MONITORING GROUND
ARCHAEOLOGICAL SITES

The great interest in cultural heritage reflects a person's desire to know and understand their origins and achievements. However, archaeological sites, like the natural environment, are finite non-renewable resources. Of all the types of heritage under threat, archaeological sites and their wealth of information and artifacts are the most threatened. In current practice, options for the preservation of archaeological sites include reconstruction, reassembly (anastilosis), in situ

conservation and protection, including shelter and/or tissue consolidation, ex situ preservation by relocation, and reburial with or without site interpretation. her. However, it is very important not to move or lose artifacts during archaeological excavations. If they are lost or moved, their information potential is lost. In order to ensure constant control of the process of archaeological research, fixing the artifacts found, building a three-dimensional model of the object under study and ensuring safety at the site, an excavation monitoring system has been developed, deployed on an autonomous robot. The objective of this study is the development of hardware and software for the robot. The robot is a suspended platform for data collection, the movement of which is provided by several cables fixed on fixed supports. The movement of the platform (both in the plane and in height) is provided by changing the length of the cables. Such a movement scheme makes it possible to move the platform in the entire plane of the triangle formed by the fixed supports, as well as to descend or ascend to a height limited by the height of the supports themselves. The data acquisition platform is a flat platform with a communication module, a microcontroller and a battery installed on it. A gyro stabilizer is attached to the bottom, with a video camera and a rangefinder mounted on it, which allows you to dampen vibrations during the movement of the platform and external disturbances. A multi-agent algorithm for the operation of the robot monitoring system during excavation is presented. A program has been developed for managing and collecting data from the monitoring system of archaeological sites. To test the monitoring system, a robot prototype was made, which was tested during excavations of a complex of archaeological monuments in the Baksan region of the Kabardino-Balkarian Republic.

Autonomous robot; archaeological excavations; monitoring system; multi-agent systems.

Введение. Ежегодно во всем мире миллионы людей посещают музеи, исторические города и древние места, чтобы соприкоснуться с прошлым. Этот огромный интерес к нашему культурному наследию отражает желание людей знать и понимать происхождение человека и достижения. Однако, археологические памятники очень уязвимы и могут быть разрушены либо в результате строительства, стихийных бедствий, таких как наводнения, либо природных процессов, таких как эрозия. Поскольку археологические материалы являются не возобновляемым ресурсом, очень важно задокументировать любые места, находящиеся под угрозой уничтожения. В современной практике варианты сохранения археологических памятников включают реконструкцию, повторную сборку (анастилез), сохранение и защиту *in situ*, включая укрытия и/или консолидацию тканей, сохранение *ex situ* путем перемещения, а также перезахоронение с интерпретацией участка или без нее.

С развитием робототехники и систем искусственного интеллекта в археологических раскопках все чаще используются роботы различного назначения [1]. Роботы хороши для доступа к небольшим пространствам, таким как подземные туннели, вентиляционные шахты и скрытые отсеки. Они могут оснащаться различными датчиками с определенной степенью автономности для выполнения навигационных и исследовательских задач в полевых условиях [2–4] и под водой [5–9], а также для создания 3D-карт местности раскопок [10, 11].

Беспилотные летательные аппараты могут быть полезными инструментами для каталогизации и обследования археологических памятников. Дроны имеют возможность делать фотографии в любое время, в любом месте и под любым возможным углом, а также могут быть оснащены датчиками для получения хороших трехмерных пространственных координат и построения 3D карт [12, 13].

Применение тросовых приводов в робототехнике имеет достаточно большой потенциал в задачах, связанных с трехмерным перемещением робота в определенном ограниченном объеме. Мы предлагаем использовать автономного робота с тросовым приводом для обеспечения постоянного контроля процесса археологических изысканий, фиксации найденных артефактов, построения трехмерной модели изучаемого объекта и обеспечения безопасности на участке. Тросовый привод робота имеет ряд преимуществ: большая рабочая область, простота сборки и разборки, высокая мобильность, большая грузоподъемность и простота перена-

стройки [14]. Использование БПЛА связано с ограничением грузоподъемности и времени работы батареи. При использовании тросового привода емкость батареи не ограничивает время и рабочее пространство робота. Контролируя длины кабелей в широких пределах, можно получить доступ к очень большому рабочему пространству от нескольких десятков сантиметров до нескольких десятков метров и более. Также использование тросового привода имеет преимущества перед обычными манипуляторами. Использование тросов вместо жестких звеньев дополнительно уменьшает массу, так как приводы не меняют положение и крепятся к неподвижному основанию так, что единственными движущимися частями являются тросы и выходное звено. Такой робот отличается более высокой скоростью и маневренностью, а также увеличенной грузоподъемностью. Кроме того, затраты на производство подобных роботов значительно ниже, чем у манипуляторов.

Целью представленного исследования является разработка робототехнической системы, предназначенной для проведения постоянного мониторинга процесса археологических раскопок.

Задача исследования – разработка аппаратного и программного обеспечения робота.

Подобная система позволит, не нарушая процесса работы археологов, фиксировать найденный объект, его расположение и глубину залегания. Такая возможность своевременной фиксации и оцифровки результатов археологических исследований обеспечит высокую достоверность исторических изысканий и сохранность экспонатов, что является весьма актуальной задачей. И в отличие от распространенных в археологии БПЛА и стационарных 3D сканеров [15, 16] позволит работать в более сложных условиях без необходимости постоянной смены аккумуляторов.

Аппаратная реализация автономного робота для мониторинга археологических раскопок. С целью обеспечения постоянного контроля процесса археологических изысканий, фиксации найденных артефактов, построения трехмерной модели изучаемого объекта и обеспечения безопасности на участке разработана система мониторинга раскопок. Поскольку археологические раскопки проводятся на небольшом участке в течении нескольких недель [17, 18], наиболее удобной реализацией системы мониторинга представляется подвесная платформа, которая реализована по схеме роботизированной транспортной платформы с гибкими подвижными звеньями, перемещение подвеса в которой обеспечивается изменением длины натяжения закрепленных к нему нескольких тросов благодаря приводам накопительных барабанов, которые закреплены на неподвижных опорах, расставленных по углам археологического объекта. Схема реализации подобной системы показана на рис. 1 и 2 (вид сверху и сбоку, соответственно).

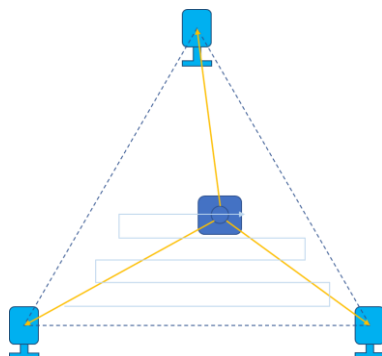


Рис. 1. Схема крепления робота для мониторинга археологических раскопок (вид сверху)

Как видно из рисунков, система мониторинга состоит из трех неподвижных опор, расположенных по краям области раскопок. К опорам на тросах закреплена платформа, на которой расположены все необходимые датчик. Перемещение платформы (как в плоскости, так и по высоте) обеспечивается за счет изменения длины тросов. Подобная схема перемещения позволяет обеспечить возможность перемещения платформы во всей плоскости треугольника, образуемого неподвижными опорами, а также спускаться или подниматься до высоты, ограниченной высотой самих опор.

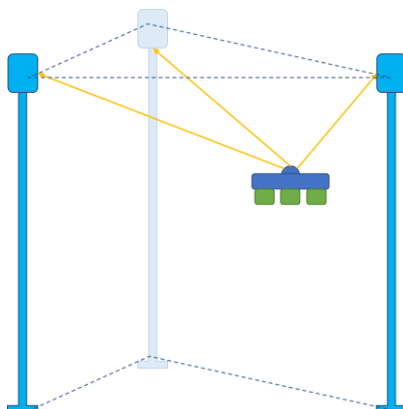


Рис. 2. Схема крепления робота для мониторинга археологических раскопок (вид сбоку)

За обеспечение перемещения платформы отвечают блоки натяжения тросов, установленные на вершинах трех опор. Структурная схема подобного блока показана на рис. 3. Данный блок состоит из микроконтроллера, отвечающего за управления всей системой, системы связи, отвечающей за согласованную работу всех опор и получение задания от пользователя и системы энергообеспечения. Намотка троса на катушку осуществляется электромотором, а за длины троса отвечает энкодер, подключённый к валу данного мотора.

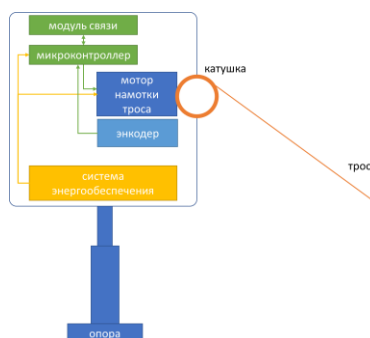


Рис. 3. Структурная схема блока натяжения троса

Три блока натяжения троса перемещают платформу сбора данных, схема которой приведена на рис. 4. Она представляет собой плоскую платформу с установленной на ней модулем связи, микроконтроллером и аккумулятором. Снизу к платформе прикреплен гиростабилизатор, позволяющих погасить колебания при движении платформы и внешних возмущениях. На нем, в свою очередь, закрепляются датчики для сбора данных, в частности: видеокамера и дальномер.

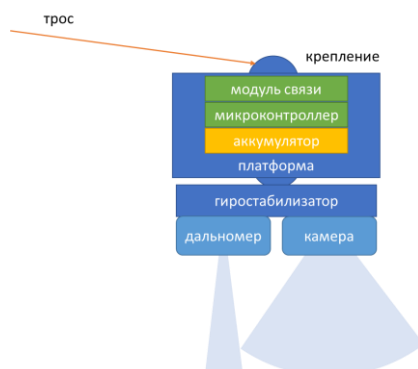


Рис. 4. Структурная схема платформы сбора данных

Установленные датчики позволяют не только визуально фиксировать обнаруженные экспонаты, но и за счет сканирования дальномером строить трехмерное облако точек. Использование стереографии и данных с дальномера позволит построить послойную трехмерную текстурированную модель всей области раскопок.

Для апробации системы изготовлена тестовая версия робота. Каждая опора представляет собой телескопические штанги, позволяющие установить блоки натяжения тросов на высоту до 9 метров. Запас длины троса позволяют расположить опоры и обеспечить область сканирования в виде равнобедренного треугольника со стороной 10 м. На рис. 5 показана фотография процесса тестирования работы системы во время раскопок комплекса археологических памятников в Баксанском районе Кабардино-Балкарской республики.



Рис. 5. Фотография процесса тестирования работы системы мониторинга археологических раскопок

Система мониторинга позволила собрать массив видеоматериала при раскопках могильника возле села Заюково КБР. При этом, за счет достаточной высоты опор, участники экспедиции не должны испытывать сложностей в процессе работы. Учитывая условия работы – все узлы на платформе и блоках натяжения тросов расположены в защищенных корпусах. Для управления системой использовались микроконтроллеры ESP-32. Передача данных между узлами системы обеспечивалась по протоколу UPIONET в коммуникационной сети RS-485. Для связи с пользователем предусмотрена возможность использования протокола TCP/IP и WiFi связи.

Система управления автономным роботом для мониторинга раскопок. Управление системой мониторинга раскопок осуществляется программами, расположенными на микроконтроллере платформы и микроконтроллерах блоков натяжения тросов. Общий алгоритм работы системы показан на рис. 6.

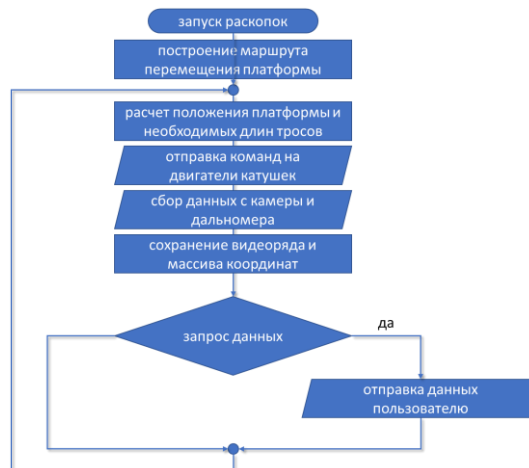


Рис. 5. Алгоритм работы системы мониторинга процесса раскопок

Программа, после развертывания и начала раскопок, строит маршрут перемещения платформы. Чаще всего – это сканирование некоторой области, соответствующей предполагаемому расположению объекта археологического интереса. Затем, в цикле идет расчет положения платформы (триангуляция за счет известных длин тросов) и расчет скорости работы катушек для перемещения платформы в нужную позицию. Полученная информация в виде команд для двигателей отправляется микроконтроллерам блоков управления тросами. Параллельно идет сбор данных с датчиков (собственное положение, кадр с камеры, измеренное расстояние с датчика расстояния). Эти данные хранятся на борту микроконтроллера до тех пор, пока не будет налажена связь с пользователем, которая позволит выгрузить накопленные данные на внешнее хранилище.

За интеллектуальную обработку собранных данных отвечает так называемый «интеллектуальный агент» [19], представляющий мультиагентную нейрокогнитивную архитектуру [20], моделирующую процесс рассуждения при анализе полученных моделей [21]. В данной архитектуре аккумулируются данные с камеры и дальномера в виде сообщений, отправляемых на соответствующие агенты-сенсоры (сенсор координат, сенсор областей, сенсор цветов и т.д.). На основе сообщений с данных сенсоров и системы распознавания [22] в мультиагентной архитектуре создаются агенты-объекты, отвечающие за репрезентацию объектов реального мира и связанные с ними мультиагентными контрактами агенты-свойства [23]. Данные с камеры и дальномера позволят строить представление о внешнем виде, положении, глубине залегания и форме найденного археологического объекта, а возможность обучения системы позволит в дальнейшем автоматически распознавать объекты и определять не только их назначение, но и эпоху и культуру, к которой можно отнести находку.

Установка задания и получение информации с системы мониторинга археологических раскопок обеспечивается отдельной программой, выполняющей функцию пульта управления для пользователя. Скриншот основного окна программы показан на рис. 6.

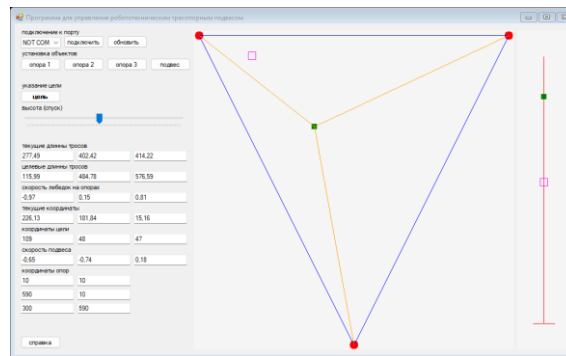


Рис. 6. Программа для управления и сбора данных с системы мониторинга археологических объектов

Программа разработана на языке программирования C# и позволяет как задать область сканирования, так и управлять каждым тросом в ручном режиме. Она же занимается периодическим сбором полученных данных, сохранением на локальном диске и их отправкой в виде сообщений «интеллектуальному агенту».

Заключение. В рамках исследования предложен автономный робот для мониторинга наземных археологических раскопок. Научная новизна работы обусловлена применением робота с тросовым приводом для обеспечения постоянного контроля процесса археологических изысканий, фиксации найденных артефактов и построения трехмерной модели изучаемого объекта. Такая конструкция позволяет увеличить скорость работы, стабильность и грузоподъемность робота. Он прост в транспортировке и установке. Кроме того, затраты на производство подобных роботов значительно ниже, чем для многозвенного манипулятора или БПЛА.

Разработана конструкция и алгоритм работы трехопорного автономного кабельного робота. Представлены структурные схемы основных узлов системы мониторинга, алгоритм работы управляющей программы и архитектура системы обработки данных, полученных описанным роботом. Приведено описание разработанной программы для управления трехопорной тросовой системой передвижения платформы для мониторинга состояния раскопок. Для апробации системы мониторинга изготовлен прототип робота, который был протестирован во время раскопок комплекса археологических памятников в Баксанском районе Кабардино-Балкарской республики.

Полученные результаты могут быть применены для разработки интеллектуальных систем мониторинга и контроля не только археологических изысканий, но и других стационарных процессов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bickler S.H. Machine learning arrives in archaeology // *Advances in Archaeological Practice*. – 2021. – Vol. 9, No. 2. – P. 186-191.
2. Coad M.M. et al. Vine Robots // *IEEE Robotics & Automation Magazine*. – 2019. – Vol. 27, No. 3. – P. 120-132.
3. Morgan C. Avatars, monsters, and machines: A cyborg archaeology // *European Journal of Archaeology*. – 2019. – Vol. 22, No. 3. – P. 324-337.
4. Mantovan L., Nanni L. The computerization of archaeology: survey on artificial intelligence techniques // *SN Computer Science*. – 2020. – Vol. 1. – P. 1-32.
5. Tsiogkas N. et al. Efficient multi-AUV cooperation using semantic knowledge representation for underwater archaeology missions // *2014 Oceans-St. John's. – IEEE*, 2014. – P. 1-6.

6. Allotta B. et al. The ARROWS project: adapting and developing robotics technologies for underwater archaeology // IFAC-PapersOnLine. – 2015. – Vol. 48, No. 2. – P. 194-199.
7. Johnson-Roberson M. et al. High-resolution underwater robotic vision-based mapping and three-dimensional reconstruction for archaeology // Journal of Field Robotics. – 2017. – Vol. 34, No. 4. – P. 625-643.
8. Hotta S., Mitsui Y., Suka M. et al. Lightweight underwater robot developed for archaeological surveys and excavations // Robomech. – 2023. – Vol. 10. – P. 2-12. <https://doi.org/10.1186/s40648-023-00240-4>.
9. Barceló J.A., Cameron S., Kenderdine F. Automatic archaeology // Theorizing digital cultural heritage. – 2007. – P. 437-56.
10. Fuller G. Towards an archaeology of 'know-how' // Cultural studies review. – 2013. – Vol. 19, No. 1. – P. 271-295.
11. Lieven V. ArchGeoRobot: Automated Archaeo-Geophysical Data Acquisition Using an Unmanned Ground Vehicle // ArcheoSciences. – 2021. – 45-1. – P. 219-221.
12. Zhang G. et al. SmartCaveDrone: 3D cave mapping using UAVs as robotic co-archaeologists // 2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). – IEEE, 2017. – P. 1052-1057.
13. Forte M., Pietroni E. 3D collaborative environments in archaeology: Experiencing the reconstruction of the past // International Journal of Architectural Computing. – 2009. – Vol. 7, No. 1. – P. 57-76.
14. Гапоненко Е.В., Рыбак Л.А., Холошевская Л.Р. Структурный анализ и классификация роботизированных систем с приводными механизмами на основе кабельных элементов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2019. – № 9. – С. 126-136. – DOI: 10.34031/article_5da4652c1400a3.95219452.
15. Прокопец С.Д., Белов Д.М. Современные способы фиксации археологических объектов в полевых условиях // Мультидисциплинарные исследования в археологии. – 2018. – № 2. – С. 94-102.
16. Шуберт Х. 3Д-фотограмметрия с применением БПЛА в процессе археологического исследования // Вестник Омского университета. Серия «Исторические науки». – 2016. – № 4. – С. 124-127.
17. Голованова Л.В., Дороничев В.Б., Дороничева Е.В. Новые данные по палеолиту Приэльбрусья // Российская археология. – 2019. – № 2. – С. 7-18.
18. Исследование памятников эпохи палеолита. Серия «Методика полевых археологических исследований». Вып. 7. – М.: ИА РАН, 2012. – 80 с.
19. Пшенокова И.А., Сундуков З.А. Разработка имитационной модели сценарного прогнозирования поведения интеллектуального агента на основе инварианта рекурсивной мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2020. – № 6 (98). – С. 80-90.
20. Нагоев З.В. Интеллектика, или мышление в живых и искусственных системах. – Нальчик: Изд-во КБНЦ РАН, 2013. – 211 с.
21. Nagoev Z. et al. Learning algorithm for an intelligent decision making system based on multi-agent neurocognitive architectures // Cognitive Systems Research. – 2021. – Vol. 66. – P. 82-88.
22. Nagoev Z. et al. Multi-agent neurocognitive architecture of an intelligent agent pattern recognition system // Procedia Computer Science. – 2022. – Vol. 213. – P. 504-509.
23. Нагоев З.В. и др. Автономный синтез пространственных онтологий в системе принятия решений мобильного робота на основе самоорганизации мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2020. – № 6 (98). – С. 68-79.

REFERENCES

1. Bickler S.H. Machine learning arrives in archaeology, *Advances in Archaeological Practice*, 2021, Vol. 9, No. 2, pp. 186-191.
2. Coad M.M. et al. Vine Robots, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2019, Vol. 27, No. 3, pp. 120-132.
3. Morgan C. Avatars, monsters, and machines: A cyborg archaeology, *European Journal of Archaeology*, 2019, Vol. 22, No. 3, pp. 324-337.

4. Mantovan L., Nanni L. The computerization of archaeology: survey on artificial intelligence techniques, *SN Computer Science*, 2020, Vol. 1, pp. 1-32.
5. Tsiogkas N. et al. Efficient multi-AUV cooperation using semantic knowledge representation for underwater archaeology missions, *2014 Oceans-St. John's*. IEEE, 2014, pp. 1-6.
6. Allotta B. et al. The ARROWS project: adapting and developing robotics technologies for underwater archaeology, *IFAC-PapersOnLine*, 2015, Vol. 48, No. 2, pp. 194-199.
7. Johnson-Roberson M. et al. High-resolution underwater robotic vision-based mapping and three-dimensional reconstruction for archaeology, *Journal of Field Robotics*, 2017, Vol. 34, No. 4, pp. 625-643.
8. Hotta S., Mitsui Y., Suka M. et al. Lightweight underwater robot developed for archaeological surveys and excavations, *Robomech*, 2023, Vol. 10, pp. 2-12. Available at: <https://doi.org/10.1186/s40648-023-00240-4>.
9. Barceló J.A., Cameron S., Kenderdine F. Automatic archaeology, *Theorizing digital cultural heritage*, 2007, pp. 437-56.
10. Fuller G. Towards an archaeology of 'know-how', *Cultural studies review*, 2013, Vol. 19, No. 1, pp. 271-295.
11. Lieven V. ArchGeoRobot: Automated Archaeo-Geophysical Data Acquisition Using an Unmanned Ground Vehicle, *ArcheoSciences*, 2021, 45-1, pp. 219-221.
12. Zhang G. et al. SmartCaveDrone: 3D cave mapping using UAVs as robotic co-archaeologists, *2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. IEEE, 2017, pp. 1052-1057.
13. Forte M., Pietroni E. 3D collaborative environments in archaeology: Experiencing the reconstruction of the past, *International Journal of Architectural Computing*, 2009, Vol. 7, No. 1, pp. 57-76.
14. Gaponenko E.V., Rybak L.A., KHoloshevskaya L.R. Strukturnyy analiz i klassifikatsiya robotizirovannykh sistem s privodnymi mekhanizmami na osnove kabel'nykh elementov [Structural analysis and classification of robotic systems with driving mechanisms on the basis of cable elements], *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova* [Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov], 2019, No. 9, pp. 126-136. DOI: 10.34031/article_5da4652c1400a3.95219452.
15. Prokopets S.D., Belov D.M. Sovremennyye sposoby fiksatsii arkhologicheskikh ob"ektov v polevykh usloviyakh [Modern methods of fixing archaeological objects in the field [Sovremennyye sposoby fiksatsii arkhologicheskikh ob"ektov v polevykh usloviyakh], *Mul'tidistsiplinarnyye issledovaniya v arkhologii* [Multidisciplinary research in archeology], 2018, No. 2, pp. 94-102.
16. Shubert Kh. 3D-fotogrammetriya s primeneniem BPLA v protsesse arkhologicheskogo issledovaniya [D-photogrammetry with the use of UAVs in the process of archaeological research], *Vestnik Omskogo universiteta. Seriya «Istoricheskie nauki»* [Bulletin of the Omsk University. Series «Historical Sciences»], 2016, No. 4, pp. 124-127.
17. Golovanova L.V., Doronichev V.B., Doronicheva E.V. Novyye dannyye po paleolitu Priel'brus'ya [New data on the Paleolithic of the Elbrus region], *Rossiyskaya arkhologiya* [Russian archeology], 2019, No. 2, pp. 7-18.
18. Issledovanie pamyatnikov epokhi paleolita. Seriya «Metodika polevykh arkhologicheskikh issledovaniy» [Study of the monuments of the Paleolithic era. Series "Methods of field archaeological research"]. Issue 7. Moscow: IA RAN, 2012, 80 p.
19. Pshenokova I.A., Sundukov Z.A. Razrabotka imitatsionnoy modeli stsenarnogo prognozirovaniya povedeniya intellektual'nogo agenta na osnove invarianta rekursivnoy mul'tiagentnoy neyrokognitivnoy arkhitektury [Development of a simulation model for scenario prediction of the behavior of an intelligent agent based on the invariant of a recursive multi-agent neurocognitive architecture], *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN* [News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2020, No. 6 (98), pp. 80-90.
20. Nagoev Z.V. Intellektika, ili myshlenie v zhivyykh i iskusstvennykh sistemakh [Intelligence, or thinking in living and artificial systems]. Nal'chik: Izd-vo KBNTS RAN, 2013, 211 p.
21. Nagoev Z. et al. Learning algorithm for an intelligent decision making system based on multi-agent neurocognitive architectures, *Cognitive Systems Research*, 2021, Vol. 66, pp. 82-88.
22. Nagoev Z. et al. Multi-agent neurocognitive architecture of an intelligent agent pattern recognition system, *Procedia Computer Science*, 2022, Vol. 213, pp. 504-509.

23. *Nagoev Z.V. i dr. Avtonomnyy sintez prostranstvennykh ontologiy v sisteme prinyatiya resheniy mobil'nogo robota na osnove samoorganizatsii mul'tiagentnoy neyrokognitivnoy arkhitektury* [Autonomous synthesis of spatial ontologies in the decision-making system of a mobile robot based on self-organization of a multi-agent neurocognitive architecture], *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN* [News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2020, No. 6 (98), pp. 68-79.

Статью рекомендовала к опубликованию д.т.н. Т.Ю. Хаширова.

Бжихатлов Кантемир Чамалович – ФГБНУ «Федеральный научный центр «Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук»; e-mail: haosit13@mail.ru; г. Нальчик, Россия; тел.: +79631663448; к.ф.-м.н.; зав. лабораторией «Нейрокогнитивные автономные интеллектуальные системы».

Заммоев Аслан Узейрович – e-mail: zammoev@mail.ru; к.т.н.; старший научный сотрудник лаборатории «Нейрокогнитивные автономные интеллектуальные системы».

Коккова Ляна Башировна – e-mail: lianka_89@list.ru; младший научный сотрудник лаборатории «Нейрокогнитивные автономные интеллектуальные системы».

Пшенокова Инна Аuesовна – Институт информатики и проблем регионального управления – филиал ФГБНУ «Федеральный научный центр «Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук»; e-mail: pshenokova_inna@mail.ru; г. Нальчик, Россия; к.ф.-м.н.; зав. лабораторией «Интеллектуальные среды обитания».

Bzhikhatlov Kantemir Chamalovich – Federal public budgetary scientific establishment «Federal scientific center «Kabardin-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences»; e-mail: haosit13@mail.ru; Nalchik, Russia; phone: +79631663448; cand. of phys. and math. sc.; head of the laboratory «Neurocognitive autonomous intelligent systems».

Zammoev Aslan Uzeyrovich – e-mail: zammoev@mail.ru;; cand. of eng. sc.; senior researcher of the laboratory «Neurocognitive autonomous intelligent systems».

Kokova Liana Bashirovna – e-mail: lianka_89@list.ru;; research assistant of the laboratory «Neurocognitive autonomous intelligent systems».

Pshenokova Inna Auesovna – Institute of Computer Science and Problems of Regional Management, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences; e-mail: pshenokova_inna@mail.ru; Nalchik, Russia; cand. of phys. and math. sc.; head of the laboratory «Intellectual'nyye sredy obitaniya».

Раздел II. Системы управления и моделирования

УДК 007.52:629.3.05

DOI 10.18522/2311-3103-2023-1-110-123

А.Р. Гайдук, В.Х. Пшихопов, М.Ю. Медведев, В.Г. Гисцов, А.Э.А. Кабала

СИНТЕЗ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НЕАФФИННЫМИ ОБЪЕКТАМИ*

В теории автоматического управления актуальной проблемой является разработка методов синтеза неаффинных по управлению систем. В таких системах управление воздействует на вход объекта нелинейно, поэтому оно влияет на переменные состояния не аддитивно. Целью данной статьи является разработка метода синтеза, который обеспечивает устойчивость нулевого положения равновесия замкнутой неаффинной системы управления в некоторой области. Рассматриваются объекты, описываемые нелинейными системами дифференциальных уравнений, с одним управлением и одним выходом. Введено ограничение, заключающееся в дифференцируемости правых частей дифференциальных уравнений по всем переменным состояниям. Поставлена задача синтеза управления в виде функции задающего воздействия, вектора переменных состояния и значений управления в предыдущие моменты времени. Данная задача решается с использованием квазилинейной модели объекта управления. Как известно, такая модель позволяет сохранить все особенности нелинейных уравнений объектов без их упрощения. В квазилинейном представлении матрицы и векторы являются функциями переменных состояния объекта управления. Управление находится с применением алгебраического полиномиально-матричного метода. Данный метод позволяет найти управление при выполнении условия управляемости объекта в виде неравенства. В данной статье приводятся расчетные соотношения для вычисления управления в соответствии с полиномиально-матричным методом. На основе заданных коэффициентов желаемого полинома в результате решения алгебраической системы уравнений находятся коэффициенты управления, являющиеся функцией управления и переменных состояния. При этом выполнение условия управляемости гарантирует существование решения указанной алгебраической системы. Найдено выражение, позволяющее вычислить управление по найденным коэффициентам. В статье также найдено условие возможности обеспечения ненулевого значения выходной управляемой величины нелинейной гурвицевой системы в установившемся режиме. При этом условии может быть обеспечено и нулевое значение статической ошибки по задающему воздействию. Далее предлагается преобразование полученного непрерывного управления в дискретное, которое реализуется в цифровом вычислителе. В статье также приводится численный пример синтеза системы управления неаффинным объектом второго порядка, а также результаты моделирования замкнутой системы. Приведенный пример подтверждает полученные теоретические результаты. Таким образом, предложенный подход позволяет синтезировать устойчивые гурвицевы системы управления неаффинными объектами с применением алгебраического полиномиально-матричного метода при достаточно малых периодах дискретизации переменных объекта управления и малых модулях корней характеристического полинома матрицы замкнутой системы в её квазилинейной модели.

Нелинейная система; неаффинный по управлению объект; квазилинейная модель; полиномиально-матричный метод; условие управляемости; статическая ошибка.

* Работа выполнена при поддержке программы «Приоритет 2030», реализуемой в Южном федеральном университете, проект СП02/S4_0708Приоритет_06.

A.R. Gaiduk, V.Kh. Pshikhopov, M.Yu. Medvedev, V.G. Gistsov, A.E.A. Kalaban

DESIGN OF HYBRID CONTROL SYSTEM FOR NONAFFINE OBJECTS

In the theory of automatic control, an urgent problem is the development of design methods by nonaffine control systems. In such systems, the control affects the input of the plant nonlinearly, so it affects the state variables non-additively. The purpose of this article is to develop a design method that ensures the stability of the zero equilibrium position of a closed control system in a certain area. The object described by a nonlinear system of differential equations with one control is considered. A restriction is introduced, consisting in the differentiability of the right part of the differential equations for all state variables. The task of designing control in the form of a function of the reference signal, a vector of state variables and control values at previous points in time is set. This problem is solved using a quasilinear model of the control plant. This model of description allows you to preserve all the features of a nonlinear plant without simplifying them. In the quasilinear model, matrices and vectors are functions of the variables of the state of the control plant. The control is performed using an algebraic polynomial matrix method. This method allows you to find control when the control condition of the plant are met in the form of inequalities. This article presents the expressions for calculating the control according to the polynomial matrix method. Based on the given coefficients of the desired polynomial, as a result of solving an algebraic system of equations, coefficients are found that are a function of control and state variables. At the same time, the fulfillment of the controllability condition guarantees the existence of a solution of the specified algebraic system. An expression has been found that allows calculating the control by the coefficients found. The article also finds a condition for the possibility of providing a non-zero value of the output controlled quantity of a nonlinear Hurwitz system in a steady-state mode. Under this condition, a zero value of the static error for the setting effect can also be provided. Further, the transformation of the obtained continuous control into a discrete one is proposed, which is implemented in a digital computer. The article also provides a numerical example of the control design of a second-order nonlinear control and the results of modeling a closed nonaffine system. The given example confirms the theoretical results obtained. Thus, the proposed approach makes it possible to design stable Hurwitz control systems for nonaffine objects using the algebraic polynomial matrix method with sufficiently small sampling periods of variables of the control object and small modules of the roots of the characteristic polynomial of the matrix of a closed system in its quasilinear model.

Nonlinear system; nonaffine control plant; quasilinear model; polynomial matrix method; controllability condition; static error.

Введение. Нелинейные объекты управления характеризуются большим разнообразием нелинейных характеристик, в частности, это приводит к одной из трудных задач теории управления – синтезу систем управления неаффинными по управлению объектами [1–4]. В уравнениях таких объектов управление входит нелинейно, причем влияние управляющего воздействия на производные переменных состояния объекта не является аддитивным. К таким объектам относятся подводные аппараты, надводные суда, летательные аппараты, мобильные роботы и др. [2, 4, 5].

Для синтеза систем управления неаффинными объектами используются различные подходы. Чаще всего применяются блочный подход с использованием разрывных управлений [2], системы со скользящими режимами [3], принцип максимума, приводящий к программному кусочно-постоянному или же к оптимальному по быстродействию управлению [6, 7].

В работе [2] рассматривается проблема синтеза управления неаффинными объектами в условиях неопределенности описывающих их математических моделей. Отмечается, что решение указанной задачи методами структурного синтеза [8] или бэкстеппинга [9] приводит к сложным выражениям для получаемых управлений. В этой связи в работе [2] предлагается метод, основанный на скользящих режимах [10–12] и позволяющий получить управление более простой структуры. В статье [12] получены расчетные выражения для управления, вычисляемого по выходу, и показана ограниченность ошибки и переменных состояния. Существенным недостатком систем с переменной структурой является необходимость высокочастотных переключений при-

водов в режимах насыщения. Такие режимы требуют применения специальных приводов и могут быть трудны в реализации, т.к. частота переключения в таких системах ограничена инерционными свойствами приводов.

В работах [6, 7] предлагается метод управления объектами с блочной структурой [11], для которых на основе принципа максимума [13, 14] получено кусочно-постоянное управление, которое затем аппроксимируется близкой к нему непрерывной функцией. Это позволяет сохранить робастность системы и не использовать скользкие режимы. В работах [6, 7] также получены условия управляемости и устойчивости в виде неравенств, соответствующих [15]. Однако в работах [6, 7] не исследуется вопрос влияния аппроксимации функции «сигнум» непрерывной функцией на степень оптимальности получаемой системы. Управление получено в непрерывном виде и его реализация в цифровой форме не рассмотрена.

В данной работе для решения проблемы синтеза систем управления неаффинными объектами предлагается применить алгебраический полиномиально-матричный (АПМ) метод синтеза на основе квазилинейных моделей [16]. Эти модели легко строятся аналитическим или численным методом [17], если нелинейности объекта являются дифференцируемыми, и позволяют найти управление, обеспечивающее устойчивость, требуемое быстродействие и другие показатели качества процесса управления. Ниже будет показано, что это управление легко реализуется при использовании цифровых средств автоматизации, практически, без потери точности и качества нелинейной системы управления. В результате образуется гибридная система управления, включающая непрерывный неаффинный объект управления и дискретное устройство управления.

I. Постановка задачи. Пусть нелинейный неаффинный объект с одним управлением и одной управляемой переменной описывается дифференциальным уравнением вида:

$$\dot{x} = \zeta(x, u, f), \quad y = \psi(x), \quad (1)$$

где $x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]$ – n -вектор переменных состояния; $\zeta(x, u, f)$ – нелинейная n -вектор-функция, дифференцируемая по всем переменным x_i , $i = \overline{1, n}$, а также по u и f , причем $\zeta(0, 0, 0) = 0$; u – управление; f – внешнее возмущение; y – управляемая переменная; $\psi(x)$ – скалярная функция, также дифференцируемая по всем переменным x_i ; вектор состояния x предполагается измеряемым; 0 – нулевой n -вектор.

Задача заключается в определении управления, как функции задающего воздействия $g = g(t)$, вектора состояния x и возможно управления. Это управление должно обеспечивать устойчивость системы; нулевое значение статической ошибки $\varepsilon(t) = g(t) - y(t)$ при $t \rightarrow \infty$. Длительность переходного процесса $t_{\text{пп}}$ по задающему воздействию $g(t) = g_0 1(t)$ при нулевых начальных условиях должна быть не более заданного значения $t_{\text{пп}}^*$. Здесь g_0 такое значение, при котором модуль управления $u = u(x)$ не превышает допустимых значений.

Отметим, что поскольку объект управления нелинейный, то возможность обеспечения устойчивости положения $x = 0$ системы управления в целом или в некоторой области её пространства состояний, заранее указать невозможно, так как это существенно зависит от свойств нелинейностей из уравнения (1) каждого конкретного объекта [16, 17].

II. Решение задачи. Так как вектор-функция $\zeta(x, u, f)$ является дифференцируемой, причем $\zeta(0, 0, 0) = 0$, то уравнения (1) можно представить следующей квазилинейной моделью:

$$\dot{x} = A(x)x + b(x, u)u + b_f(x, u, f)f, \quad y = c^T(x)x, \quad (2)$$

где

$$A(x) = \begin{bmatrix} a_{11}(x) & a_{12}(x) & \dots & a_{1n}(x) \\ a_{21}(x) & a_{22}(x) & \dots & a_{2n}(x) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1}(x) & a_{n2}(x) & \dots & a_{nn}(x) \end{bmatrix}, \quad b(x, u) = \begin{bmatrix} b_1(x, u) \\ b_2(x, u) \\ \vdots \\ b_n(x, u) \end{bmatrix}, \quad b_f(x, u, f) = \begin{bmatrix} b_{1f}(x, u, f) \\ b_{2f}(x, u, f) \\ \vdots \\ b_{nf}(x, u, f) \end{bmatrix},$$

$$c^T(x) = [c_1(x) \ c_2(x) \ \dots \ c_n(x)]. \quad (3)$$

Функциональные коэффициенты в (2) и (3) при получении их аналитическим методом [17, 18] определяются выражениями:

$$a_{ij}(x) = \int_0^1 \zeta'_{ij}(x_1, \dots, x_{j-1}, \theta x_j, \mathbf{0}_{n-j}; 0, 0) d\theta, \quad b_i(x, u) = \int_0^1 \zeta'_{iu}(x; \theta u, 0) d\theta,$$

$$b_{if}(x, u, f) = \int_0^1 \zeta'_{if}(x; u, \theta f) d\theta, \quad c_j(x) = \int_0^1 \psi'_j(x_1, \dots, x_{j-1}, \theta x_j, \mathbf{0}_{n-j}) d\theta, \quad (4)$$

где $\zeta'_{ij}(x; u, f) = \partial \zeta_{ij}(x; u, f) / \partial x$; $\zeta'_{iu}(x; u, f) = \partial \zeta_i(x; u, f) / \partial u$; $\zeta'_{if}(x; u, f) = \partial \zeta_i(x; u, f) / \partial f$; $\psi'_j(x) = \partial \psi_j(x) / \partial x$; $\mathbf{0}_{n-j}$ – последовательность $0, \dots, 0$, содержащая $n - j$ нулей.

Подчеркнём, что квазилинейная модель (2) – (4) описывает нелинейный объект (1) совершенно точно, т.е. с сохранением всех его нелинейных особенностей. Выражения для определения коэффициентов из выражений (2) и (3) численным методом можно найти в [17]; однако в этом случае модель (2) – (3) становится дискретно-непрерывной и описывает нелинейный объект (1) приближённо. В выражениях (2) – (3) неаффинность по управлению рассматриваемого объекта (1) проявляется в том, что вектор входа $b(x, u)$ зависит от управления u .

Как видно, уравнения (2) по форме аналогичны уравнениям одномерных нелинейных объектов управления [19] за исключением того, что матрица и векторы в этих уравнениях являются нелинейными функциями переменных объекта, именно поэтому они были названы квазилинейной моделью [20, 21].

Отметим, что при $f = f(t) \equiv 0$ и $\partial^2 \zeta_{iu}(x; u) / \partial u^2 = 0$ вектор $b(x)$, как и матрица $A(x)$, зависят только от вектора состояния. Такие модели (2) в западной литературе называются «state-dependent coefficient (SDC)» [22, 23], при этом метод построения матрицы $A(x)$ и вектора $b(x)$ в этих работах, как правило, не освещается.

Как и в линейном случае, задача синтеза здесь имеет решение, если квазилинейная модель (2) удовлетворяет условию управляемости, которое имеет вид

$$|\det U(x, u)| \geq \varsigma_1 > 0, \quad x \in \Omega_U, \quad u \in I_u, \quad (5)$$

где $\varsigma_1 > 0$ – некоторое, не слишком малое число; Ω_U – некоторая область пространства состояний R^n , включающая точку $x = \mathbf{0}$, и в которой выполняется условие (5); I_u – интервал допустимых значений управления u ; функциональная матрица управляемости $U(x, u)$ определяется выражением

$$U(x, u) = [b(x, u) \ A(x)b(x, u) \ \dots \ A^{n-1}(x)b(x, u)]. \quad (6)$$

Синтез системы управления неаффинным объектом (1) на основе квазилинейной модели (2) – (4) при выполнении условия (5) удобно осуществить алгебраическим полиномиально-матричным (АПМ) методом [16], при котором закон управления ищется в виде

$$u = u(x) = h_0 g - h^T(x)x = h_0 g - [h_1(x)x_1 + h_2(x)x_2 + \dots + h_n(x)x_n], \quad (7)$$

т.е. в виде управления по воздействию и состоянию [24].

Для вывода расчетных соотношений в данном случае, подставим управление (7) в первое уравнение (2) с учетом второго уравнения (2) и приведем подобные члены; в результате получим

$$\dot{x} = D(x)x + b(x,u)h_0g + b_f(x,u,f)f, \quad y = c^T(x)x, \quad (8)$$

где

$$D(x) = A(x) - b(x,u)h^T(x). \quad (9)$$

Характеристический полином $D(p,x) = \det[pE - D(x)]$ матрицы $D(x)$ (9) по формуле (П.25) из [25, с. 233] можно представить в виде

$$D(p,x) = A(p,x) + \sum_{i=1}^n h_i(x)V_i(p,x,u), \quad A(p,x) = \det[pE - A(x)], \quad (10)$$

где

$$V_i(p,x,u) = e_i(\text{adj}[pE - A(x)])b(x,u) = \sum_{j=0}^{n-1} v_{ij}(x,u)p^j, \quad i = \overline{1, n}, \quad (11)$$

e_i – i -я строка единичной $n \times n$ -матрицы E . Зависимость коэффициентов $v_{ij}(x,u)$ полиномов (11) от управления u также является следствием неаффинности по управлению объекта (1).

Замечание. Матрица $D(x)$ (9) входит в уравнение квазилинейной модели (8) замкнутой системы (1), (7), но для краткости будем называть её системной матрицей.

В соответствии с методом АПМ функциональный полином $D(p,x)$ в первом выражении (10) заменяется гурвицевым полиномом $D^*(p)$, который имеет постоянные, вещественные и различные корни λ_j^* , т.е.

$$D^*(p) = \prod_{j=1}^n (p - \lambda_j^*) = p^n + \delta_{n-1}^* p^{n-1} + \dots + \delta_1^* p + \delta_0^*, \quad (12)$$

где $\lambda_j^* < -\varsigma_2 < 0$; $|\lambda_j^* - \lambda_l^*| > \varsigma_3$, $j \neq l$, $j, l = \overline{1, n}$, $\varsigma_2 > 0$, $\varsigma_3 > 0$ [18, 20].

Выполнив в равенстве (10) указанную замену и перенеся полином $A(p,x)$ в его левую часть, получим полиномиальное уравнение относительно коэффициентов $h_i(x)$ из выражения (7):

$$\sum_{i=1}^n h_i(x)V_i(p,x,u) = R(p,x), \quad (13)$$

где

$$R(p,x) = D^*(p) - A(p,x) = \sum_{j=0}^{n-1} \rho_j(x)p^j. \quad (14)$$

Решение полиномиального уравнения (13) целесообразно получить путем перехода к эквивалентной ему системы алгебраических уравнений [16, 20], которая в данном случае имеет вид

$$\begin{bmatrix} v_{1,0} & v_{2,0} & \dots & v_{n,0} \\ v_{1,1} & v_{2,1} & \dots & v_{n,1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ v_{1,n-1} & v_{2,n-1} & \dots & v_{n,n-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_0 \\ \rho_1 \\ \vdots \\ \rho_{n-1} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Отметим, что многие коэффициенты в системе (15) в данном случае являются функциями вектора x и управления u , но для краткости записи аргументы этих коэффициентов в (15) опущены. Подчеркнём также, что существование решения системы (15) гарантируется выполнением условия управляемости (5).

Решение системы (15) определяет вектор коэффициентов из (7):

$$h(x,u) = [h_1(x,u) \ h_2(x,u) \ \dots \ h_n(x,u)], \quad (16)$$

которые в случае неаффинного объекта могут быть функциями не только вектора x , но и управления u . Поэтому системная матрица также может зависеть от управления, т.е. в общем случае она имеет вид $D(p, x, u)$. Тем не менее, её характеристический полином $D(p, x, u)$ равен полиному $D^*(p)$ (12), т.е. корни полинома $D(p, x, u)$ являются постоянными, различными, вещественными и отрицательными. Поэтому из теоремы, доказанной в [21], следует, что существует некоторая окрестность $\Omega_0 \in \Omega_u$ положения равновесия системы (8) в которой выполняется условие

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x(t, x_0) = 0, \quad \forall x_0 \in \Omega_0; \quad x \in \Omega_u. \quad (17)$$

Здесь $x(t, x_0)$ – решение свободной системы (8), т.е. при $g(t) = f(t) \equiv 0$; x_0 – вектор начальных условий этого решения.

Из условия (17) и уравнения (8) следует, что в установившемся режиме при $f(t) \equiv 0$ и $g(t) = g_0 1(t)$ имеет место равенство

$$0 = D(x^\circ, u_g^\circ) x^\circ + b(x^\circ, u_g^\circ) h_0 g_0. \quad (18)$$

Отсюда, с учетом второго равенства (8) и определением отклонения системы $\varepsilon = g - y$, выводим следующие выражения:

$$\begin{aligned} x^\circ &= -D^{-1}(x^\circ, u_g^\circ) b(x^\circ, u_g^\circ) h_0 g_0, \quad y^\circ = -c^T(x^\circ) D^{-1}(x^\circ, u_g^\circ) b(x^\circ, u_g^\circ) h_0 g_0, \\ \varepsilon^\circ &= [1 + c^T(x^\circ) D^{-1}(x^\circ, u_g^\circ) b(x^\circ, u_g^\circ) h_0] g_0. \end{aligned} \quad (19)$$

В равенствах (18), (19) $x^\circ, y^\circ, \varepsilon^\circ$ – это установившиеся значения соответствующих переменных. Из (19) следует, что установившееся значение управляемой переменной нелинейной системы (8) может иметь не нулевое значение, и её ошибка ε° может быть обеспечена равной нулю, если только выполняется следующее условие:

$$c^T(x) D^{-1}(x) b(x, u) \neq 0. \quad (20)$$

При выполнении условия (20) для обеспечения нулевого значения статической ошибки по задающему воздействию $g(t) = g_0 1(t)$, коэффициент h_0 из выражения (7) должен быть равен

$$h_0 = h_0(x, u) = -1 / c^T(x) D^{-1}(x, u) b(x, u). \quad (21)$$

Выполнение условия $\varepsilon^\circ = 0$ при определении коэффициента $h_0(x, u)$ равенством (21) обусловлено, прежде всего тем, что при всех x и u матрица $D(x, u)$ (9) имеет обратную, а во вторых, в силу условия (16) в установившемся режиме $x(t) \rightarrow x^\circ$, а $u(t) \rightarrow u^\circ$, соответственно.

Условие (20) и равенство (21) можно упростить, если учесть, что $D^{-1}(x, u) = [\text{adj } D(x, u)] / \det D(x, u)$. При синтезе нелинейных гурвицевых систем методом АПМ при всех значениях вектора $x = x(t)$ и управления $u(t)$ выполняется условие $D(p, x, u) = \det[pE - D(x, u)] = D^*(p)$. Следовательно, с учетом равенства (12) и свойств определителя имеет место равенство $\det D(x, u) = D(p, x, u)_{p=0} = (-1)^n \delta_0^*$. Поэтому знаменатель в равенстве (21) можно представить в виде $(-1)^n c^T(x) [\text{adj } D(x, u)] b(x, u) / \delta_0^*$. С другой стороны, по (9) $D(x, u) = A(x) - b(x, u) h^T(x, u)$, поэтому в соответствии с выражением (П.26) из [25, с. 233]

$$[\text{adj } D(x, u)]b(x, u) = \{\text{adj}[A(x) - b(x, u)h^T(x, u)]\}b(x, u) = [\text{adj } A(x)]b(x, u). \quad (22)$$

Здесь adj обозначает сопряженную матрицу [26].

Из изложенного и соотношений (21), (22) следует, что равенство $\varepsilon^\circ = 0$ при $g(t) = g_0 1(t)$ может быть обеспечено, если только:

$$h_0(x, u) = (-1)^{n+1} \delta_0^* / \gamma(x, u), \quad \gamma(x, u) \neq 0, \quad x \in \Omega_x; \quad u \in I_u, \quad (23)$$

где

$$\gamma(x, u) = c^T(x) [\text{adj } A(x)] b(x, u). \quad (24)$$

В случае линейных объектов, описываемых системой уравнений $\dot{x} = Ax + bu$; $y = c^T x$, величина $\gamma = (-1)^{n-1} K_{об} \det A$, где $K_{об}$ – коэффициент передачи канала $u \rightarrow y$. Очевидно в нелинейном случае $\gamma(x, u)$ имеет тот же смысл, но в этом случае она является нелинейной функцией.

Полагая условие $\gamma(x, u) \neq 0$ выполненным и подставляя полученные коэффициенты (16) и (23) в выражение (7) получим непрерывное управление

$$u = \frac{(-1)^{n+1} \delta_0^*}{\gamma(x, u)} g - h^T(x, u) x, \quad \gamma(x, u) \neq 0, \quad x \in \Omega_x; \quad u \in I_u. \quad (25)$$

Как непрерывное управление (25), естественно, является физически нереализуемым. Однако, если в левой части этого выражения управление $u = u(x(t))$ заменить управлением u_k , $k = 1, 2, 3, \dots$, то при достаточном малом T , практически без потери качества, вектор $x(t)$ и управление $u(x)$ в правых частях приведенных выше выражений можно заменить на x_k и u_{k-1} , соответственно, полагая $u_0 = u(0) = 0$. В частности, выражение (25) при этом будет иметь вид:

$$u_k = \frac{(-1)^{n+1} \delta_0^*}{\gamma(x_k, u_{k-1})} g_{k-1} - h^T(x_k, u_{k-1}) x_k, \quad \gamma(x_{k-1}, u_{k-1}) \neq 0, \quad x_k \in \Omega_x; \quad u_k \in I_u. \quad (26)$$

где в соответствии с (24)

$$\gamma(x_k, u_{k-1}) = c^T(x_k) [\text{adj } A(x_k)] b(x_k, u_{k-1}), \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (27)$$

Дискретное управление, определяемое выражениями (26), (27), очевидно, является физически реализуемым некоторым цифровым устройством управления. При этом результирующая нелинейная система управления (1), (26), (27), практически, является непрерывной, так как обычно требуется довольно малые значения периода дискретизации T , характерные для решений нежестких дифференциальных уравнений на ЦВМ стандартными программами.

Из приведенных выражений следует, что основной особенностью синтезированных АПМ методом на основе предложенного здесь подхода неаффинных систем (8) является постоянство коэффициентов гурвицевого характеристического полинома $D(p, x, u)$ системной матрицы $D(x, u)$ (9). Как отмечалось выше, для устойчивости положения равновесия таких нелинейных систем при $x(t, x_0) \in \Omega_u$, $u \in I_u$, $x_0 \in \Omega_0 \in \Omega_u \in \mathbb{R}^n$ достаточно, чтобы все корни указанного гурвицевого полинома были вещественными и различными.

Покажем эффективность предложенного подхода на численном примере.

III. Пример синтеза управления и результаты моделирования. Синтезировать систему управления направлением движения (курсом) надводного аппарата, движущегося с постоянной продольной скоростью. Для изменения курса аппарата используется гидродинамический рулевой элемент [2]. Процесс управления направлением движения аппарата описывается уравнениями

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad \dot{x}_2 = u + u^3, \quad y = x_1 + 0,5x_2^3, \quad (28)$$

где x_1, x_2 – переменные состояния, u – управление, y – управляемая переменная (курс аппарата). При этом, если $g = g_0 1(t)$, то должно выполняться условие $\varepsilon^\circ = g_0 - y^\circ = 0$, а длительность переходных процессов при изменении курса не должна превышать 2 с.

Решение. Данный объект является неаффинным, так как управление входит в его уравнения нелинейным образом, поэтому воспользуемся предложенным методом. Прежде всего, находится квазилинейная модель (2), (3) объекта (28):

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 1+u^2 \end{bmatrix} u, \quad y = [1 \quad 0,5x_2^2]x, \quad (29)$$

где $x = [x_1 \quad x_2]^T$ и проверяется управляемость системы (29) по условиям (5), (6):

$$\det U = \det \begin{bmatrix} 0 & 1+u^2 \\ 1+u^2 & 0 \end{bmatrix} = -(1+u^2)^2.$$

Отсюда следует, что условие управляемости (5), очевидно, выполняется во всем пространстве $\mathbb{R}^n$, т.е. область $\Omega_U = \mathbb{R}^2$. Отсюда следует, что синтезируемая нелинейная система будет иметь одно положение равновесия $x = 0$, т.е. вместо слов «положение равновесия системы устойчиво или неустойчиво» можно говорить просто «система устойчива или неустойчива». По (10), (11) и (29) определяются полиномы

$$\begin{aligned} A(p) &= \det \begin{bmatrix} p & -1 \\ 0 & p \end{bmatrix} = p^2, \\ [\text{adj}(pE - A)]b(u) &= \begin{bmatrix} p & 1 \\ 0 & p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1+u^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1+u^2 \\ (1+u^2)p \end{bmatrix}, \\ V_1(u) &= [1 \quad 0] \begin{bmatrix} 1+u^2 \\ (1+u^2)p \end{bmatrix} = 1+u^2, \quad V_2(u) = [0 \quad 1] \begin{bmatrix} 1+u^2 \\ (1+u^2)p \end{bmatrix} = (1+u^2)p, \end{aligned} \quad (30)$$

и величина:

$$\gamma(x, u) = c^T(x) [\text{adj} A(x)] b(x, u) = [1 \quad 0,5x_2^2] \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1+u^2 \end{bmatrix} = -(1+u^2). \quad (31)$$

Как видно, величина $\gamma(x, u) \neq 0$ при всех x и u . Следовательно, задача синтеза имеет решение. В данном случае $n = 2$, поэтому в соответствии с (7) непрерывное управление имеет вид

$$u(x) = h_0 g - [h_1 x_1 + h_2 x_2]. \quad (32)$$

Для определения его коэффициентов, формируется гурвицев полином второго порядка $D^*(p) = p^2 + \delta_1^* p + \delta_0^*$, корни которого удовлетворяют условиям (12), и по (14) находится разность $R(p) = p^2 + \delta_1 p + \delta_0 - p^2 = \delta_1 p + \delta_0$. По коэффициентам полиномов (30) и $R(p)$ формируется система (15):

$$\begin{bmatrix} 1+u^2 & 0 \\ 0 & 1+u^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_0^* \\ \delta_1^* \end{bmatrix}.$$

Решение этой системы приводит к выражениям: $h_1(u) = \delta_0^* / (1+u^2)$, $h_2(u) = \delta_1^* / (1+u^2)$. По выражению (23) определяется коэффициент $h_0(x, u) = \delta_0^* / (1+u^2)$, что позволяет по (32) записать непрерывное управление $u(x) = (\delta_0^* g - \delta_0^* x_1 - \delta_1^* x_2) / (1+u^2)$. Это выражение с учетом определения $\varepsilon = g - y$ и второго равенства (28) $y = x_1 + 0,5x_2^3$ можно представить следующим образом:

$$u(x, u) = [\delta_0^* \varepsilon + (0,5\delta_0^* x_2^2 - \delta_1^*) x_2] / (1+u^2).$$

При этом реализуемое дискретное управление описывается выражением:

$$u_k = [\delta_0^* \varepsilon_k + (0,5\delta_0^* x_{2,k}^2 - \delta_1^*) x_{2,k}] / (1+u_{k-1}^2), \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (33)$$

где $\varepsilon_k = g_k - y_k$. Обратим внимание на то, что синтез системы проведён при символьных коэффициентах δ_j^* . Это позволяет изучить зависимость свойств систем управления, синтезированных АПМ методом, в том числе и неаффинными объектами, как от периода дискретизации T , так и от значений корней характеристического полинома $D(p, x, u)$ системной матрицы $D(x, u)$ путем моделирования.

В данном случае для определения коэффициентов δ_j^* воспользуемся соотношением, связывающим модули вещественных корней λ_j^* гурвицевого характеристического полинома $D(p, x, u)$ системной матрицы с желаемой длительностью переходных процессов $t_{\text{пн}}^*$ синтезируемой системы:

$$\min |\lambda_j^*| \geq (5 \div 7) / t_{\text{пн}}^*, \quad (34)$$

и часто применяемым при синтезе линейных систем управления. При заданном $t_{\text{пн}}^* = 2 \text{ с}$ из (34) следует: $\min |\lambda_j^*| \geq (5 \div 7) / 2 = 2,5 \div 3,5$. Принятые для моделирования значения корней и соответствующие им коэффициенты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Варианты	λ_1^*	λ_2^*	δ_0^*	δ_1^*
1	-0,6	-2	1,2	2,6
2	-1,5	-3	4,5	4,5
3	-3	-6	18	9

Моделирование проводилось в Matlab при различных начальных условиях $x_0 = [0 \ 0]^T$; $x_0 = [2 \ -1]^T$; $x_0 = [-2 \ 3]^T$, задающем ступенчатом воздействии $g(t) = g_0 1(t)$ при $g_0 = 0, 1, 5$ и периоде дискретизации $T \in [0,001; 0,02; 0,05] \text{ с}$. Некоторые результаты моделирования представлены на рис. 1–4.

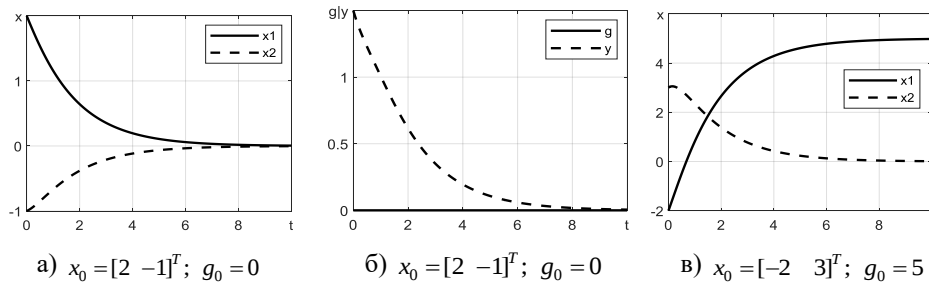


Рис. 1. Переходные процессы при малых модулях корней.

На рис. 1 приведены переходные процессы при первом варианте корней полинома $D(p, x, u)$ и $T = 0.05$ с. Затухающий характер имеют переменные состояния системы и при других значениях вектора начальных условий x_0 и периода T .

Как видно, в этом случае неаффинная система является устойчивой при всех значениях T , вплоть до $T = 0.05$ с. Установившееся значение управляемой переменной y в точности равняется задающему значению. Это следует из рис. 1, в, так как при $x_2 = 0$, эта переменная в соответствии со вторым уравнением (28) $y = x_1$.

С увеличением модулей корней полинома $D(p, x, u)$ запас устойчивости синтезированной системы уменьшается. На рис. 2. показаны переходные процессы при втором варианте значений корней полинома $D(p, x, u)$, приведенных в табл. 1, а также при различных значениях вектора x_0 и периода T .

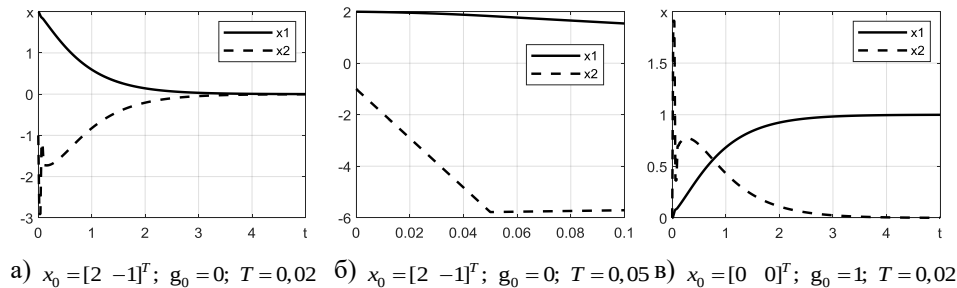


Рис. 2. Переходные процессы: а), б) – свободная система; в) – с внешним воздействием

Как видно на рис. 2, в этом случае синтезированная система сохраняет устойчивость только при $T \leq 0.02$. В устойчивой системе ошибка системы ε° при $g(t) = g_0 1(t)$ также равняется нулю, т.е. $\varepsilon^\circ = 0$. На основе графиков, приведенных на рис. 1 и 2, можно заключить, что длительность переходных процессов $t_{\text{уп}}$ устойчивых неаффинных систем, синтезированных на основе предложенного подхода, в первом приближении соответствует зависимости (34). Действительно, по этому соотношению при первом варианте корней $t_{\text{уп}} = 3/0.6 = 5$ с, а во втором – $t_{\text{уп}} = 3/1.5 = 2$ с. Этим значениям, очевидно, соответствуют длительности переходных процессов, графики которых приведены на всех рис. 1 и на рис. 2, а и рис. 2, в.

Вывод о том, что с увеличением модулей корней полинома $D(p, x, u)$ запас устойчивости системы уменьшается подтверждается переходными процессами полученными и при третьем варианте корней полинома $D(p, x, u)$, приведенном в табл. 1. Соответствующие графики при $x_{10} = -2$, $x_{20} = 1$, $g_0 = 0$ и $T = 0.001$ с приведены на рис. 3.

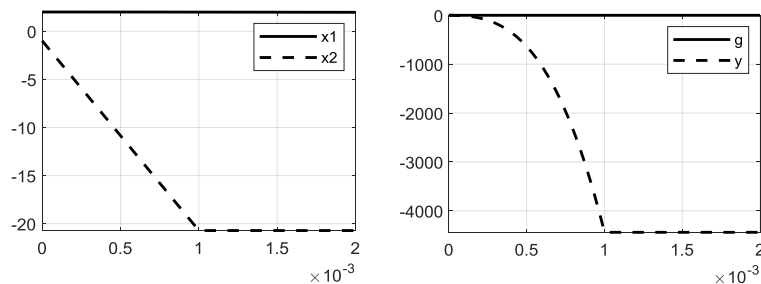


Рис. 3. Переходные процессы при «больших модулях» корней полинома $D(p, x)$

На основании полученных результатов моделирования можно сделать следующие выводы. Наибольшее влияние на устойчивость синтезированной неаффинной системы оказывают корни характеристического полинома системной матрицы. Чем меньше модули корней этого полинома, тем больше допустимый период дискретизации.

Заключение. Предложенный подход позволяет получать устойчивые гурвицевы системы управления неаффинными объектами с применением алгебраического полиномиально-матричного (АПМ) метода при достаточно малых периодах дискретизации переменных объекта управления и малых модулях корней характеристического полинома матрицы замкнутой системы в её квазилинейной модели. Область притяжения положения равновесия замкнутой системы определяется областью пространства состояния объекта, в которой выполняется условие управляемости квазилинейной модели объекта. При этом управление формируется вычислительным устройством на основе предыдущих значений управления, а также дискретных значений измеряемых переменных объекта и задающего воздействия.

Предложенный подход может применяться для синтеза систем управления неаффинными объектами различного назначения. В дальнейшем предполагается расширить полученные результаты на случай неполной информации о переменных состояния объектов управления и объектов с внешними возмущениями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zhang J., Zhu Q., Wu X., Li Y. A generalized indirect adaptive neural networks backstepping control procedure for a class of non-affine nonlinear systems with pure-feedback prototype // *Neurocomputing*. – 2013. – Vol. 121, No. 9. – P. 131-139.
2. Пишихов В.Х., Медведев М.Ю. Синтез систем управления подводными аппаратами с нелинейными характеристиками исполнительных органов // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2011. – № 3. – С. 147-154.
3. Zhou J., Li X. Finite-Time Mode Control Design for Unknown Nonaffine Pure-Feedback Systems // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2015. – Vol. 2015, Article ID 653739. – 9 p. – <http://dx.doi.org/10.1155/2015/653739>.
4. Liu Y.-J., Wang W. Adaptive fuzzy control for a class of uncertain nonaffine nonlinear systems // *Information Sciences*. – 2007. – Vol. 177, No. 18. – P. 3901-3917.
5. Pshikhov V., Krukhmalev V., Medvedev M., and Neydorf R. Estimation of Energy Potential for Control of Feeder of Novel Cruiser/Feeder MAAT System // *SAE Technical Paper*. – 2012. – DOI: 10.4271/2012-01-2099.
6. Пишихов В.Х., Медведев М.Ю. Синтез адаптивных систем управления летательными аппаратами // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2010. – № 3 (104). – С. 187-196.
7. Медведев М.Ю. Синтез субоптимальных управлений нелинейными многосвязными динамическими системами // *Мехатроника, автоматизация и управление*. – 2009. – № 12. – С. 2-8.

8. Бойчук Л.М. Метод структурного синтеза нелинейных систем автоматического управления. – М.: Энергия, 1971.
9. Kristic M., Kanellakopoulos, and Kokotovic P.V. Nonlinear and Adaptive Control Design. – Wiley, New York, NY, USA I., 1995.
10. Петров Б.Н., Емельянов С.В., Уткин В.И. Принцип построения инвариантных систем автоматического регулирования с переменной структурой // ДАН СССР. – 1964. – Вып. 154, № 6.
11. Краснова С.А., Уткин В.А., Уткин А.В. Блочный синтез управления механическими системами в условиях неопределенности // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2009. – № 6. – С. 41-54.
12. Дружинина М.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Методы адаптивного управления нелинейными объектами по выходу // Автоматика и телемеханика. – 1996. – № 1. – С. 3-33.
13. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. – М.: Физматгиз, 1961.
14. Болтянский В.Г. Математические методы оптимального управления. – М.: Наука. 1969.
15. Пятницкий С.И. Управляемость классов лагранжевых систем с ограниченными управлениями // Автоматика и телемеханика. – 1996. – № 12. – С. 29-37.
16. Гайдук А.Р., Плаксиенко В.С., Кабалан А.Е.А. Алгебраический полиномиально-матричный метод синтеза нелинейных астатических систем // Математические методы в технологиях и технике. – 2022. – № 1. – С. 41-45. – DOI: 10.52348/2712-8873_MMTT_2022_1_41.
17. Гайдук А.Р. Численный метод синтеза квазилинейных моделей нелинейных объектов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2021. – Т. 22, № 6. – С. 283-290.
18. Гайдук А.Р. Алгебраический синтез нелинейных стабилизирующих управлений // Синтез алгоритмов сложных систем. Вып. 7. – Таганрог: ТРТИ, 1989. – С. 15-19.
19. Бабаков Н.А., Воронов А.А., Воронова А.А. и др. Теория автоматического управления: уч. для вузов. Ч. I. Теория линейных систем автоматического управления / под ред. А.А. Воронова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1986. – 367 с.
20. Гайдук А.Р. Полиномиальный синтез нелинейных систем управления // Автоматика и телемеханика. – 2003. – № 10. – С. 144-148.
21. Гайдук А.Р. Аналитический синтез управления нелинейными объектами одного класса // Автоматика и телемеханика. – 1993. – № 2. – С. 64-76.
22. Çimen T. State-Dependent Riccati Equation (SDRE) Control: A Survey // In Proceedings of the 17th World Congress of the International Federation of Automatic Control, July 2008. – P. 3761-3775.
23. Li-Gang Lin, J. Vandewalle, Yew-Wen Liang. Analytical representation of the state-dependent coefficients in the SDRE/SDDRE scheme for multivariable systems // Automatica. – 2015. – Vol. 59. – P. 106-111. – <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2015.06.015>.
24. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1972. – 768 с.
25. Гайдук А.Р. Непрерывные и дискретные динамические системы. – М.: УМ и ИЦ «Учебная литература», 2004. – 252 с.
26. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. – 5-е изд. – М.: Физматлит, 2004. – 560 с.

REFERENCES

1. Zhang J., Zhu Q., Wu X., Li Y. A generalized indirect adaptive neural networks backstepping control procedure for a class of non-affine nonlinear systems with pure-feedback prototype, *Neurocomputing*, 2013, Vol. 121, No. 9, pp. 131-139.
2. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. Sintez sistem upravleniya podvodnymi apparatami s nelineynymi kharakteristikami ispolnitel'nykh organov [Synthesis of control systems for underwater vehicles with nonlinear characteristics of actuators], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 3, pp 147-154.
3. Zhou J., Li X. Finite-Time Mode Control Design for Unknown Nonaffine Pure-Feedback Systems, *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, Vol. 2015, Article ID 653739, 9 p. Available at: <http://dx.doi.org/10.1155/2015/653739>.
4. Liu Y.-J., Wang W. Adaptive fuzzy control for a class of uncertain nonaffine nonlinear systems, *Information Sciences*, 2007, Vol. 177, No. 18, pp. 3901-3917.

5. Pshikhopov V., Krukhmalev V., Medvedev M., and Neydorf R. Estimation of Energy Potential for Control of Feeder of Novel Cruiser/Feeder MAAT System, *SAE Technical Paper*, 2012. DOI: 10.4271/2012-01-2099.
6. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. Sintez adaptivnykh sistem upravleniya letatel'nyimi apparatami [Synthesis of adaptive aircraft control systems], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2010, No. 3 (104), pp. 187-196.
7. Medvedev M.Yu. Sintez suboptimal'nykh upravleniy nelineynymi mnogosvyaznymi dinamicheskimi sistemami [Synthesis of suboptimal controls by nonlinear multiconnected dynamic systems], *Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2009, No. 12, pp. 2-8.
8. Boychuk L.M. Metod strukturnogo sinteza nelineynykh sistem avtomaticheskogo upravleniya [Method of structural synthesis of nonlinear automatic control systems]. Moscow: Energiya, 1971.
9. Kristic M., Kanellakopoulos, and Kokotovic P.V. Nonlinear and Adaptive Control Design. Wiley, New York, NY, USA I., 1995.
10. Petrov B.N., Emel'yanov S.V., Utkin V.I. Printsip postroeniya invariantnykh sistem avtomaticheskogo regulirovaniya s peremennoy strukturoy [The principle of construction of invariant automatic control systems with variable structure], *DAN SSSR* [Reports of the Academy of Sciences of USSR], 1964, Issue 154, No. 6.
11. Krasnova S.A., Utkin V.A., Utkin A.V. Blochnyy sintez upravleniya mekhanicheskimi sistemami v usloviyakh neopredelennosti [Block synthesis of control of mechanical systems under conditions of uncertainty], *Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2009, No. 6, pp. 41-54.
12. Druzhinina M.V., Nikiforov V.O., Fradkov A.L. Metody adaptivnogo upravleniya nelineynymi ob'ektami po vykhodu [Methods of adaptive control of nonlinear objects by output], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Telemechanics], 1996, No. 1, pp. 3-33.
13. Pontryagin L.S., Boltyanskiy V.G., Gamkrelidze R.V., Mishchenko E.F. Matematicheskaya teoriya optimal'nykh protsessov [Mathematical theory of the optimal processes]. Moscow: Fizmatgiz, 1961.
14. Boltyanskiy V.G. Matematicheskie metody optimal'nogo upravleniya [Mathematical methods of optimal control]. Moscow: Nauka. 1969.
15. Pyatnitskiy S.I. Upravlyaemost' klassov lagranzhevyykh sistem s ogranichennymi upravleniyami [Controllability of Lagrange systems with limited controls], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Telemechanics], 1996, No. 12, pp. 29-37.
16. Gayduk A.R., Plaksienko V.S., Kabalan A.E.A. Algebraicheskiy polinomial'no-matrichnyy metod sinteza nelineynykh astaticheskikh sistem [Algebraic polynomial matrix method for design of nonlinear astatic systems], *Matematicheskie metody v tekhnologiyakh i tekhnike* [Mathematical methods in technology and engineering], 2022, No. 1, pp. 41-45. DOI: 10.52348/2712-8873_MMTT_2022_1_41.
17. Gayduk A.R. Chislennyi metod sinteza kvazilineynykh modeley nelineynykh ob'ektov [Numerical design method of quasilinear models of nonlinear objects], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2021, Vol. 22, No. 6, pp. 283-290.
18. Gayduk A.R. Algebraicheskiy sintez nelineynykh stabiliziruyushchikh upravleniy [Algebraic synthesis of nonlinear stabilizing controls], *Sintez algoritmov slozhnykh sistem* [Algorithms design of complex systems]. Issue 7. Taganrog: TRTI, 1989, pp. 15-19.
19. Babakov N.A., Voronov A.A., Voronova A.A. i dr. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: uch. dlya vuzov. Ch. I. Teoriya lineynykh sistem avtomaticheskogo upravleniya [Theory of automatic control: uch. for universities. Part I. Theory of linear automatic control systems], ed. by A.A. Voronova. 2nd ed. Moscow: Vysshaya shkola, 1986, 367 p.
20. Gayduk A.R. Polinomial'nyy sintez nelineynykh sistem upravleniya [Polynomial design of nonlinear control systems], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Telemechanics], 2003, No. 10, pp. 144-148.
21. Gayduk A.R. Analiticheskiy sintez upravleniya nelineynymi ob'ektami odnogo klassa [Analytical synthesis of control for nonlinear objects in one class], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Telemechanics], 1993, No. 2, pp. 64-76.
22. Çimen T. State-Dependent Riccati Equation (SDRE) Control: A Survey, *In Proceedings of the 17th World Congress of the International Federation of Automatic Control, July 2008*, pp. 3761-3775.
23. Li-Gang Lin, J. Vandewalle, Yew-Wen Liang. Analytical representation of the state-dependent coefficients in the SDRE/SDDRE scheme for multivariable systems, *Automatica*, 2015, Vol. 59, pp. 106-111. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2015.06.015>.

24. *Besekerskiy V.A., Popov E.P.* Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya [Theory of automatic control systems]. Moscow: Nauka, Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, 1972, 768 p.
25. *Gayduk A.R.* Nepreryvnye i diskretnye dinamicheskie sistemy [Nepreryvnye i diskretnye dinamicheskie sistemy]. Moscow: UM i ITS «Uchebnaya literatura», 2004, 252 p.
26. *Gantmakher F.R.* Teoriya matrits [Matrix theory]. 5th ed. Moscow: Fizmatlit, 2004, 560 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., в.н.с. С.Г. Капустян.

Гайдук Анатолий Романович – Южный федеральный университет; e-mail: gaiduk_2003@mail.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра систем автоматического управления; д.т.н.; профессор.

Кабалан Али Эль Акбар – e-mail: ali.kabalan.92@gmail.com; кафедра систем автоматического управления; аспирант.

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

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

Гисцов Владислав Геннадьевич – e-mail: gistsov@sfedu.ru; инженер.

Gaiduk Anatoly Romanovich – Southern Federal University; e-mail: gaiduk_2003@mail.ru; Taganrog, Russia; the department of automatic control systems; dr. of eng. sc.; professor.

Kabalan Ali El Akbar – e-mail: ali.kabalan.92@gmail.com; the department of automatic control systems; graduate student.

Pshikhov Viacheslav Khasanovich – R&D Institute of Robotics and Control Systems; e-mail: pshichop@rambler.ru; Taganrog, Russia; phone: 88634371694; dr. of eng. sc.; professor; director.

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

Gissov Vladislav Gennadievich – e-mail: gistsov@sfedu.ru; engineer.

УДК 004.272.3

DOI 10.18522/2311-3103-2023-1-123-133

А.А. Зеленский

КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ КОНКУРЕНТОСПОСОБНЫХ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СТАНКОВ И ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ В УСЛОВИЯХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ РОССИИ

Целью исследования является рассмотрение возможности построения конкурентоспособных быстродействующих систем управления движением на основе имеющейся в России электронной компонентной базы. Предлагается авторская методика количественной оценки доверия к системе управления, согласно которой доверие определяется в соответствии с доверием ко всем ее элементам на всех технологических уровнях применительно к обеспечению функциональной надежности и информационной безопасности исходя из оценки доверия к результатам разработки и тестирования этих элементов. Рассматривается комплексная проблема обеспечения доверия к системам управления движением, обусловленная зависимостью страны от импорта оборудования с иностранными системами управления, малыми объемами и технологическим отставанием производства полупроводниковой продукции и оборудования для этого производства, а также невозможностью обеспечения доверия к интеллектуальным системам управления без полного доступа к их разработке. Для данной проблемы предлагается решение, не требующее доведения в России до мирового уровня всего спектра технологий, используемых для создания систем управления. Это решение основано на использовании предлагаемой автором комплексной методологии синтеза систем управления, в основе которой лежит известный подход построения системы управления в виде последовательного многоуровневого преобразования от постановки

задачи до уровня электронного устройства, дополненный заданием промежуточного уровня – уровня архитектуры системы управления и конкретным выбором память-центрической архитектуры. С учетом определения выбранного промежуточного уровня системы управления движением комплексная методология системы управления позволяет, отталкиваясь от возможностей памяти-центрической архитектуры, в соответствии с поставленной задачей управления формировать методологию программирования системы управления, а в соответствии с имеющейся в наличии электронной компонентной базой – определять методы синтеза подсистем управления движением. Предлагаемая комплексная методология также предполагает систематизацию подсистем интеллектуального блока, блока чувствления и исполнительного блока системы управления движением в виде ограниченных наборов подсистем, достаточных для построения всего разнообразия систем управления движением.

Система управления движением; доверие; быстродействие; комплексная методология синтеза; память-центрическая архитектура; электронная компонентная база.

A.A. Zelensky

THE CONCEPT OF BUILDING COMPETITIVE HIGH-SPEED CONTROL SYSTEMS FOR MACHINE TOOLS AND INDUSTRIAL ROBOTS UNDER THE TECHNOLOGICAL LIMITATIONS OF THE RUSSIA ELECTRONIC COMPONENT BASE

The aim of the study is to consider the possibility of building competitive fast-track traffic control systems on the basis of the electronic component base available in Russia. The author's methodology for quantitative assessment of confidence in the control system, according to which confidence is determined in accordance with the confidence in all its elements at all technological levels in relation to ensuring functional reliability and information security based on the assessment of confidence in the results of development and testing of these elements, is offered. The complex problem of providing confidence to the traffic control systems, caused by the country dependence on import of equipment with foreign control systems, small volumes and technological lag of semiconductor production and equipment for this production, and also impossibility of providing confidence to the intelligent control systems without full access to their development is considered. For this problem, a solution is proposed that does not require bringing the full range of technologies used to create control systems to the world level in Russia. This solution is based on the use of the complex methodology of synthesis of control systems, proposed by the author, which is based on the known approach of building a control system in the form of a sequential multi-level transformation from the problem statement to the electronic device level, supplemented by the definition of the intermediate level (the level of control system architecture) and a specific choice of memory-centric architecture. Taking into account the definition of the selected intermediate level of the motion control system, the complex methodology of the control system allows, starting from the possibilities of the memory-centric architecture, to form the methodology of the control system programming in accordance with the set control task, and in accordance with the available electronic component base - to determine the methods of synthesis of the motion control subsystems. The proposed integrated methodology also involves the systematization of subsystems of the intelligent block, sensing block and the executive block of the motion control system in the form of limited sets of subsystems, sufficient for the construction of the entire variety of motion control systems.

Motion control system; trust; performance; complex synthesis methodology; memory-centric architecture; electronic component base.

Введение. Необходимым атрибутом глобальной конкурентоспособности и технологической независимости в настоящее время является наличие в стране собственного производства средств производства. К числу базовых отраслей – производителей средств производства относятся станкостроение, производство роботов и другого технологического оборудования.

Современное высокотехнологическое оборудование оснащается системами управления движением, конкурентоспособность которых определяется рядом факторов, наиболее значимыми из которых являются доверие и быстродействие.

Постановка задачи. Доверие к системе управления движением складывается из двух составляющих: функциональной надежности и информационной безопасности. Проведенные автором исследования позволили разработать методологию

количественного определения доверия D к системе управления движением. Согласно этой методологии, доверие к системе управления движением определяется в соответствии с доверием ко всем ее элементам на всех технологических уровнях (уровне электронной компонентной базы, приборов, системного и прикладного программного обеспечения) применительно к обеспечению функциональной надежности и информационной безопасности исходя из оценки доверия к результатам разработки и тестирования этих элементов:

$$D = \prod_{i=1}^4 \prod_{j=1}^2 \left(\sum_{p=1}^{P_{\max}} (D_{ijp}^P W_{ijp}^P) + \left(1 - \sum_{p=1}^{P_{\max}} (D_{ijp}^P W_{ijp}^P) \right) \sum_{p=1}^{P_{\max}} (D_{ijp}^T W_{ijp}^T) \right), \quad (1)$$

где D_{ijp}^P, D_{ijp}^T – показатели доверия к результатам разработки и к результатам тестирования p -го элемента на i -ом технологическом уровне по j -му требованию (функциональной надежности или информационной безопасности); W_{ijp}^P, W_{ijp}^T – статистические веса p -го элемента на i -ом технологическом уровне при оценке показателя доверия по j -му требованию к результатам разработки и к результатам тестирования.

Быстродействие системы управления движением — величина, обратно пропорциональная длительности цикла управления. Необходимо разграничивать быстродействие и производительность. Быстродействие определяет способность системы выполнить все необходимые для управления оборудованием операции за заданный промежуток времени (за цикл управления), а производительность определяется количеством операций управления за единицу времени. Для управления движением в реальном времени наиболее жесткие требования предъявляются к быстродействию, поскольку погрешность воспроизведения движений управляемых рабочих органов ограничивает максимальную длительность цикла управления.

Проблема обеспечения доверия к системам управления движением в случае России обусловлена зависимостью страны от импорта оборудования с иностранными системами управления [1], малыми объемами и технологическим отставанием производства полупроводниковой продукции и оборудования для этого производства [2], а также невозможностью обеспечения доверия к интеллектуальным системам управления без полного доступа к их разработке [3]. Полное решение проблемы обеспечения доверия возможно только при освоении в России всего спектра технологий, используемых для создания систем управления. В среднесрочной перспективе это невозможно, поэтому необходимо искать альтернативные пути обеспечения доверия, основанные на более эффективном использовании имеющихся в России ограниченных технологических возможностей. Одним из наиболее перспективных направлений поиска указанных альтернативных путей обеспечения доверия является совершенствование архитектуры системы управления. Это направление хорошо коррелирует с направлением развития микроэлектронных технологий «Больше, чем Мур», в рамках которого повышение эффективности (в том числе быстродействия) обеспечивается не столько за счет совершенствования электронной компонентной базы (что является основой направления Больше Мура), а на уровне системы, в том числе на аппаратном уровне.

Методология синтеза систем управления. Одновременное решение проблемы доверия к системе управления и проблемы повышения быстродействия, ограниченное использованием имеющейся электронной компонентной базы с ограниченными функциональными возможностями (в частности, не самыми «тонкими» проектными нормами) представляется целесообразным искать с использованием предложенной автором комплексной методологии синтеза систем управления.

В основе данной методологии лежит известный подход построения системы управления в виде последовательного многоуровневого преобразования от постановки задачи до уровня электронного устройства [4].

Примером практического построения системы управления на основе данного подхода являются многопроцессорные вычислительные комплексы «Эльбрус» и «Эльбрус-2», разработанные под руководством В.С. Бурцева. В табл. 1 представлено описание реализации модели решения проблемы синтеза для указанных вычислительных комплексов.

Таблица 1

Реализация модели решения проблемы синтеза для вычислительных комплексов «Эльбрус» и «Эльбрус-2»

Уровень преобразования	Описание реализации
Проблема	Решаемая проблема формулировалась как создание эффективной системы ПРО (противоракетной обороны) с производительностью не менее 100 млн операций в секунду.
Алгоритм	Используемый для решения поставленной проблемы алгоритм основан на создании многопроцессорного вычислительного комплекса.
Программа/Язык	Для реализации заданного алгоритма был сформирован специальный язык – система команд [5, с. 59]
Программная среда	Специально созданная операционная система МВК «Эльбрус» [5, с. 120]
Микроархитектура	Типовая ячейка МВК «Эльбрус-2», состоящая из сборок мультичипов и микросхем ИС-100
Логика/Схемы	Система управления (вычислительный комплекс) на задачах быстрого преобразования Фурье обеспечивала производительность порядка 600 млн. операций в секунду, а на задачах уравнений математической физики – производительность близкую к миллиарду операций в секунду. Для этого были разработаны спецпроцессоры, воспроизводящие команды БЭСМ-6 (процессор СВС), процессор быстрого преобразования Фурье (БПФ) и векторный процессор МВК «Эльбрус-2».

Более эффективно указанное многоуровневое преобразование реализуется в случае, когда наряду с уровнем постановки задачи (определяющем цель построения системы управления) и уровнем электронной компонентной базы (определяющим средства построения системы управления), также задается промежуточный уровень. При этом необходимо выбрать такой промежуточный уровень, определение которого минимизирует вариативность синтеза системы управления, а также на котором можно задать базовую установку на реализацию параллельности вычислений. Таким промежуточным уровнем является уровень архитектуры системы управления, а конкретным выбором архитектуры является память-центрическая архитектура [6], при которой данные в процессе вычислений не перемещаются между процессором и памятью (что требует затрат времени, энергии и ограничено пропускной способностью каналов связи), а остаются в памяти, в которую интегрируется процессор. Данные, перемещаемые между различными вычислительными устройствами системы управления, представляют собой результаты вычислений, имеющие незначительный объем.

Разработанная автором память-центрическая система управления движением промышленного робота включает в себя (рис. 1): ядро системы управления движением, имеющее техническую реализацию в виде микроконтроллера или компьютера; блок оцувствления, включающий систему технического зрения и модуль обработки аналоговых и дискретных входов, по которым в систему управления поступают данные с датчиков и информация от сенсоров; исполнительный блок, включающий в себя модули для кинематических, динамических и других вычислений, необходимых для управления движением в промышленном роботе, а также регуляторы исполнительных устройств; интеллектуальный блок, включающий в себя два модуля: человеко-машинный интерфейс, а также искусственный интеллект или систему машинного обучения, реализованные в виде искусственной нейронной сети; оперативную память системы управления (динамическую память с произвольным доступом, статическую память с произвольным доступом, а также дополнительную виртуальную память в виде RAM-диска); коммуникационную сеть, представляющую собой систему цифровых и аналоговых каналов связи, коммутационного оборудования и устройств для преобразования сигналов (цифро-аналоговых, аналогово-цифровых и др.).

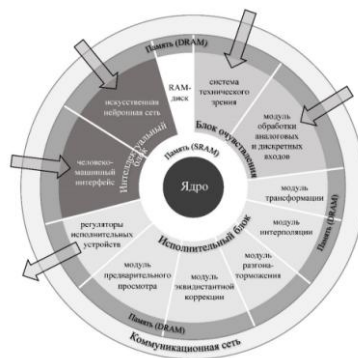


Рис. 1. Концептуальная модель системы управления движением с память-центрической архитектурой

С учетом определения выбранного промежуточного уровня системы управления движением комплексная методология системы управления приобретает специфическую последовательность (рис. 2). Отталкиваясь от возможностей память-центрической архитектуры в соответствии с поставленной задачей управления формируется методология программирования системы управления, а в соответствии с имеющейся в наличии электронной компонентной базы определяются методы синтеза подсистем управления движением.

Подсистемы интеллектуального блока доверенной системы управления реального времени являются инструментарием решения комплексной проблемы интеллектуализации управления.

К числу основных групп задач интеллектуализации управления, которые необходимо решать для повышения качества управления, относятся:

1. Повышение производительности объектов управления (промышленных роботов, станков и других мехатронных систем) за счет интеллектуализации подготовки производства. Это может быть достигнуто путем включения в состав интеллектуального блока автономных быстродействующих подсистем, управляющих позиционированием, установкой, межоперационными перемещениями и др. операциями подготовки производства. Важной частной задачей, относящейся к данной группе, является задача привязки базисных систем координат на основе технического зрения [6, 7].



Рис. 2. Комплексная методология синтеза быстродействующих доверенных систем управления движением

2. Реализация управления на основе обработки больших объемов данных и измерений состояния управляемого объекта. Частными задачами, относящимися к данной группе, являются задача мультиспектральной обработки и анализа характеристик одномерных данных с датчиков и сенсоров, задача комплексирования/слияния разнородных данных и др. [8, 9].

3. Повышение качества человеко-машинного взаимодействия, в частности, повышение скорости работы человека-оператора, снижение количества ошибок, повышение скорости обучения и улучшение условий работы оператора. Одной из частных задач, относящихся к данной группе, является управление коллаборативными робототехническими комплексами на основе методов бесконтактного распознавания действий человека [10, 11].

4. Реализация адаптивности в процессе управления движением исходя из текущего положения и скорости рабочего органа или при решении транспортной задачи при перемещении промышленного робота или мехатронной системы в вариативном окружении цеха, закрытого помещения или на открытых пространствах. Частной задачей, относящейся к данной группе, является задача интеллектуального планирования траектории движения исполнительных механизмов робототехнических и мехатронных систем в результате восстановления трехмерных сцен [12].

5. Расширение функциональности и качества бесконтактных измерений и других технологий неразрушающего контроля физических объектов на основе интеллектуализации измерений. Частной задачей, имеющей существенную практическую значимость, является задача контроля качества сварных швов и соединений методами неразрушающего контроля на основе глубинного обучения [13, 14].

Анализ реализации различных задач интеллектуализации управления движением выявил повторяемость использования ограниченной номенклатуры подсистем, обеспечивающих заданную функциональность системы управления. В результате схема синтеза подсистем интеллектуального блока и блока очувствления получает детализацию в виде используемых подсистем (рис. 3).

Указанная номенклатура включает подсистемы блока очувствления, необходимые для решения задач интеллектуализации управления (восстановление данных; уменьшение размерности данных; преобразование данных в другие пространства; объединение данных; реконструкция данных), и подсистемы интеллектуального блока (оценка качества данных, сегментация данных, выделение объектов, оценка параметров объектов (особые точки/дескрипторы), оценка траектории, сопровождение объектов, распознавание объектов).

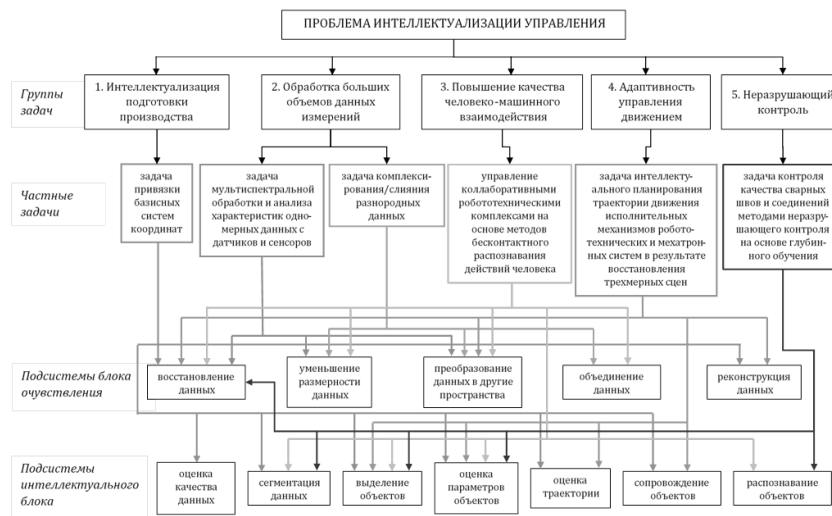


Рис. 3. Схема синтеза подсистем интеллектуального блока и блока чувствления

Рассмотрим теперь подсистемы исполнительного блока.

Исследования существующих систем управления промышленных роботов и мехатронных систем [15–21], показывают, что в исполнительном блоке системы управления обычно присутствуют следующие подсистемы (функциональные модули): интерполятор, модуль разгона-торможения, модуль эквидистантной коррекции, модуль предварительного просмотра, модуль трансформации, а также регуляторы исполнительных устройств.

Метод синтеза подсистем исполнительного блока доверенной системы управления реального времени соответствует структурно-параметрическому или параметрическому синтезу. Структурно-параметрический синтез – это процесс, в результате которого определяется структура объекта и находятся значения параметров составляющих ее элементов таким образом, чтобы были удовлетворены условия задания на синтез (технического задания) [22]. Отличие параметрического синтеза от структурно-параметрического заключается в том, что для него структура модели фиксирована и не изменяется в процессе синтеза, а размерность вектора параметров фиксирована. В результате изменяются только параметры и поиск в процессе синтеза осуществляется в пространстве параметров.

Применительно к синтезу исполнительного блока в составе системы управления структурно-параметрический синтез означает, что осуществляется уточнение структуры (набора подсистем – функциональных модулей из числа доступных для использования), а также определяются параметры подсистем, необходимые для реализации заданных функциональных свойств. Для решения типовых задач синтеза, когда совокупность подсистем уже известна, задача синтеза упрощается и может использоваться параметрический синтез, заключающийся в определении параметров подсистем (номенклатура параметров, диапазоны изменений, задержки, протоколы обмена данными и т.д.).

Ключевой составляющей структурно-параметрического и параметрического синтеза является определение необходимого и достаточного комплекса подсистем, из которых будет формироваться («собираться») исполнительный блок.

Для формирования указанного комплекса подсистем следует использовать подход, включающий в себя две взаимодополняющих составляющие:

1. Структурный анализ существующих промышленных роботов, станков с ЧПУ и других производственных мехатронных комплексов с целью выявления ограниченного комплекса подсистем (функциональных модулей), из которых формируются исполнительные блоки их систем управления. Анализ существующих промышленных роботов, станков с ЧПУ и других производственных мехатронных комплексов показывает, что в исполнительном блоке системы управления обычно присутствуют такие подсистемы (функциональные модули) как интерполятор, модуль разгона-торможения, модуль эквидистантной коррекции, модуль предварительного просмотра, модуль трансформации, регуляторы исполнительных устройств, а также модуль безопасности.

2. Определение совокупности функций и задач управления, реализуемых подсистемами (функциональными модулями), обеспечивающий требуемые функциональные свойства исполнительного блока систем управления для максимально широкой номенклатуры задач синтеза. Стандартный набор задач подготовки данных, решаемых системой управления, включает: приведение координат узловых точек траектории из текущей локальной системы координат в систему координат осей оборудования (робота, станка и др.), преобразование единиц измерения, пересчёт относительных размеров в абсолютные; расчёт параметров линейной, круговой (винтовой) интерполяции или интерполяции сплайнами; построение эквидистантных траекторий для коррекции длины и радиуса обрабатываемого инструмента; предпросмотр траектории для поиска изломов и расчёта допустимой скорости движения; расчёт участков разгона-торможения. Наряду с задачами подготовки данных функциональное назначение исполнительного блока также включает управление внешними устройствами (в частности, приводами).

Приведенный выше комплекс задач обеспечения точности и быстродействия исполнения движения рабочего органа (задач управления для исполнительного блока) может быть реализован соответствующими подсистемами. К числу подсистем исполнительного блока, обеспечивающих необходимый набор функций управления, в частности относятся (рис. 4): модуль задания траектории в декартовых координатах, геометрический модуль сглаживания, динамический модуль АСДС (реализующий двунаправленный алгоритм сканирования, объединяющий функцию управления разгоном/торможением и функцию предварительного просмотра), интерполяционный модуль, а также блоки кинематических преобразований.

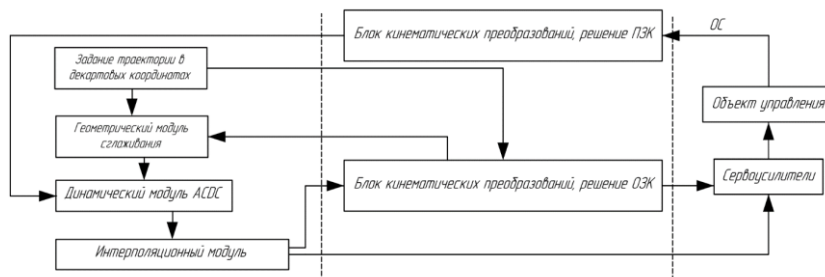


Рис. 4. Биективная сквозная система формирования оптимального движения

Все указанные подсистемы, за исключением блоков кинематических преобразований, образуют объединенную сквозную системы формирования оптимального движения. После ее дополнения блоком кинематических преобразований получается биективная сквозная система формирования оптимального движения, реализующая однозначное решение полного комплекса задач обеспечения точности и быстродействия исполнения движения рабочего органа.

Заключение. На основе проведенный в данной статье исследований можно сделать следующие основные выводы:

1. Проведенные автором исследования позволили разработать методологию количественного определения доверия к системе управления движением. В рамках данной методологии доверие к системе управления движением определяется в соответствии с доверием ко всем ее элементам на всех технологических уровнях применительно к обеспечению функциональной надежности и информационной безопасности исходя из оценки доверия к результатам разработки и тестирования этих элементов.

2. Проблема обеспечения доверия к системам управления движением в случае России имеет комплексный характер. Полное решение этой проблемы возможно только при освоении в России всего спектра технологий, используемых для создания систем управления. В среднесрочной перспективе это невозможно, поэтому необходимо искать альтернативные пути обеспечения доверия, основанные на более эффективном использовании имеющихся в России ограниченных технологических возможностей.

3. Одновременное решение проблемы доверия к системе управления и проблемы повышения быстродействия, ограниченное использованием имеющейся электронной компонентной базы с ограниченными функциональными возможностями представляется целесообразным искать с использованием предложенной автором комплексной методологии синтеза систем управления, в основе которой лежит известный подход построения системы управления в виде последовательного многоуровневого преобразования от постановки задачи до уровня электронного устройства, дополненный заданием промежуточного уровня – уровня архитектуры системы управления и конкретным выбором память-центрической архитектуры.

4. С учетом определения выбранного промежуточного уровня системы управления движением комплексная методология системы управления приобретает специфическую последовательность: отталкиваясь от возможностей память-центрической архитектуры в соответствии с поставленной задачей управления формируется методология программирования системы управления, а в соответствии с имеющейся в наличии электронной компонентной базы определяются методы синтеза подсистем управления движением.

5. Подсистемы интеллектуального блока доверенной системы управления реально-го времени являются инструментарием решения комплексной проблемы интеллектуализации управления. Анализ реализации различных задач интеллектуализации управления движением выявил повторяемость использования ограниченной номенклатуры подсистем, обеспечивающих заданную функциональность системы управления.

6. Метод синтеза подсистем исполнительного блока доверенной системы управления реального времени соответствует структурно-параметрическому или параметрическому синтезу. Весь комплекс задач управления для исполнительного блока может быть реализован ограниченным набором подсистем. Все указанные подсистемы, за исключением блоков кинематических преобразований, образуют объединенную сквозную системы формирования оптимального движения. После ее дополнения блоком кинематических преобразований получается биактивная сквозная система формирования оптимального движения, реализующая однозначное решение полного комплекса задач обеспечения точности и быстродействия исполнения движения рабочего органа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПСОК

1. Зеленский А.А., Морозкин М.С., Панфилов А.Н., Купцов В.Р., Грибков А.А. Проблема зависимости оборонно-промышленного комплекса России от импорта технологического оборудования // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 9. – С. 203-207.
2. Зеленский А.А., Морозкин М.С., Грибков А.А. Обзор полупроводниковой промышленности в мире и России: производство и оборудование // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2021. – Т. 26, № 6. – С. 468-480.

3. Зеленский А.А., Абдуллин Т.Х., Жданова М.М., Воронин В.В., Грибков А.А. Проблема обеспечения производительности доверенных систем управления с глубинным обучением // *Advanced Engineering Research*. – 2022. – Т. 22, № 1. – С. 57-66.
4. Patt Y. Requirements, Bottlenecks, and Good Fortune: Agents for Microprocessor Evolution / *Proceedings of the IEEE*. – 2001. – Vol. 89, No. 11. – P. 1553-1559.
5. Бурцев В.С. Параллелизм вычислительных процессов и развитие архитектуры супер-ЭВМ. МВК "Эльбрус". – М.: ИВВС РАН, 1998.
6. Зеленский А.А., Илюхин Ю.В., Грибков А.А. Память-центрические модели систем управления движением промышленных роботов // *Вестник Московского авиационного института*. – 2021. – Т. 28, № 4 – С. 245-256.
7. Bouzgou K., Ahmed-Foitih Z. Workspace analysis and geometric modeling of 6 dof fanuc 200ic robot // *Procedia-Social and Behavioral Sciences*. – 2015. – Vol. 182. – P. 703-709.
8. Zhang Z. Microsoft kinect sensor and its effect // *IEEE multimedia*. – 2012. – Vol. 19, No. 2. – P. 4-10.
9. Walts E.L. Data fusion for C3I: a tutorial, in: *Command, Control, Communications Intelligence (C3I) Handbook*, EW Communications Inc., Palo Alto, CA. – 1986. – P. 217-226.
10. Hall D.L., Linas J.L. An introduction to multisensor fusion // *Proceedings of the IEEE*. – 1997. – 85 (1). – P. 6-23.
11. Wang H, Kläser A, Schmid C, Liu CL. Dense trajectories and motion boundary descriptors for action recognition // *Int. J. of computer vision*. – 2013. – 103 (1). – P. 60-79.
12. Ji X.F., Wu Q.Q., Ju Z.J., Wang Y.Y. Study of human action recognition based on improved spatio-temporal features. – Springer Berlin Heidelberg. – 2017. – P. 233-250.
13. Dissanayake G., Newman P. Durrant-Whyte H.F., Clark S., Csorba M. A solution to the simultaneous localization and map building (SLAM) problem // *IEEE transaction robotic automation*. – 2001. – No. 17 (3). – P. 229-241.
14. Russakovsky O., Deng J., Su H., Krause J., and et al. ImageNet large scale visual recognition challenge / *CoRR*, vol. abs/1409.0575 (2014). – URL: <http://arxiv.org/abs/1409.0575>.
15. Kountchev R.K., Rubin S.H., Todorov V.T., Kountcheva R. A. Automatic detection of welding defects / *Int. J. Reasoning-based Intelligent Systems*. – 2011. – Vol. 3, No. 1. – P. 34-43.
16. Зеленский А.А., Абдуллин Т.Х., Илюхин Ю.В., Харьков М.А. Высокопроизводительная цифровая система на основе ПЛИС для управления движением многокоординатных станков и промышленных роботов // *СТИН*. – 2019. – № 8. – С. 5-8.
17. Suh S.H., Kang S.K., Chung D.H., Stroud I. Theory and design of CNC systems. – Springer Science & Business Media, 2008.
18. Мартинов Л.И., Мартинов Г.М. Организация межмодульного взаимодействия в распределенных системах ЧПУ. Модели и алгоритмы реализации // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2010. – № 11. – С. 50-55.
19. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника. – М.: Мир, 1989. – С. 624.
20. Ruishu Z., Chang Z., Weigang Z. The status and development of industrial robots // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2018. – Vol. 423, No. 1. – P. 012051.
21. Романов А.М. Обзор аппаратно-программного обеспечения систем управления роботов различного масштаба и назначения. Ч. 1. Промышленная робототехника // *Российский технологический журнал*. – 2019. – Т. 7, № 5. – С. 30-46.
22. Илюхин Ю.В. Синергетический (мехатронный) подход к проектированию систем управления технологических роботов // *Мехатроника*. – 2000. – № 2. – С. 7-12.
23. Волков В.А., Чудинов С.М. Системный анализ для структурно-параметрического синтеза // *Экономика. Информатика*. – 2012. – № 19 (138). – Вып. 24/1.

REFERENCES

1. Zelensky A.A., Morozkin M.S., Panfilov A.N., Kuptsov V.R., Gribkov A.A. Problema zavisimosti oboronno-promyshlennogo kompleksa Rossii ot importa tekhnologicheskogo oborudovaniya [The problem of dependence of the military-industrial complex of Russia on the import of technological equipment], *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki* [News of the Tula State University. Technical science], 2021, No. 9, pp. 203-207.
2. Zelensky A.A., Morozkin M.S., Gribkov A.A. Obzor poluprovodnikovoy promyshlennosti v mire i Rossii: proizvodstvo i oborudovaniye [Overview of the semiconductor industry in the world and Russia: production and equipment], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika* [News of higher educational institutions. Electronics], 2021, Vol. 26, No. 6, pp. 468-480.

3. Zelensky A.A., Abdullin T.Kh., Zhdanova M.M., Voronin V.V., Gribkov A.A. Problema obespecheniya proizvoditel'nosti doverennykh sistem upravleniya s glubinnym obucheniym [The problem of ensuring the performance of trusted control systems with deep learning], *Advanced Engineering Research*, 2022, Vol. 22, No 1, pp. 57-66.
4. Patt Y. Requirements, Bottlenecks, and Good Fortune: Agents for Microprocessor Evolution, *Proceedings of the IEEE*, 2001, Vol. 89, No.11, pp. 1553-1559.
5. Burcev V.S. Parallelizm vychislitel'nykh processov i razvitiye arhitektury superEVM [Parallelism of computational processes and development of supercomputer architecture]. MVK "El'brus". Moscow: IVVS RAN, 1998.
6. Zelensky A.A., Ilyukhin Yu.V., Gribkov A.A. Pamyat'-tsentricheskiye modeli sistem upravleniya dvizheniyem promyshlennykh robotov [Memory-centric models of motion control systems for industrial robots], *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta* [Bulletin of the Moscow Aviation Institute], 2021, Vol. 28, No. 4, pp. 245-256.
7. Bouzgou K., Ahmed-Foitih Z. Workspace analysis and geometric modeling of 6 dof fanuc 200ic robot, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2015, Vol. 182, pp. 703-709.
8. Zhang Z. Microsoft kinect sensor and its effect, *IEEE multimedia*, 2012, Vol. 19, No. 2, pp. 4-10.
9. Walts E.L. Data fusion for C3I: a tutorial, in: Command, Control, Communications Intelligence (C3I) Handbook, EW Communications Inc., Palo Alto, CA. 1986, pp. 217-226.
10. Hall D.L., Linas J.L. An introduction to multisensor fusion, *Proceedings of the IEEE*, 1997, No 85 (1), pp. 6-23.
11. Wang H, Kläser A, Schmid C, Liu CL. Dense trajectories and motion boundary descriptors for action recognition, *Int. J. of computer vision*, 2013, No. 103(1), pp. 60-79.
12. Ji X.F., Wu Q.Q., Ju Z.J., Wang Y.Y. Study of human action recognition based on improved spatio-temporal features. *Springer Berlin Heidelberg*, 2017, pp. 233-250.
13. Dissanayake G., Newman P. Durrant-Whyte H.F., Clark S., Csorba M. A solution to the simultaneous localization and map building (SLAM) problem, *IEEE transaction robotic automation*, 2001, No. 17 (3), pp. 229-241.
14. Russakovsky O., Deng J., Su H., Krause J., and et al. ImageNet large scale visual recognition challenge. *CoRR*, vol. abs/1409.0575 (2014). Available at: <http://arxiv.org/abs/1409.0575>.
15. Kountchev R.K., Rubin S.H., Todorov V.T., Kountcheva R. A. Automatic detection of welding defects. *Int. J. Reasoning-based Intelligent Systems*, 2011, Vol. 3, No. 1, pp. 34-43.
16. Zelensky A.A., Abdullin T.Kh., Ilyukhin Yu.V., Kharkov M.A. Vysokoproizvoditel'naya tsifrovaya sistema na osnove PLIS dlya upravleniya dvizheniyem mnogokoordinatnykh stankov i promyshlennykh robotov [High-performance digital system based on FPGA for motion control of multi-axis machine tools and industrial robots], *STIN*, 2019, No. 8, pp. 5-8.
17. Suh S.H., Kang S.K., Chung D.H., Stroud I. Theory and design of CNC systems. *Springer Science & Business Media*, 2008.
18. Martinov L.I., Martinov G.M. Organizatsiya mezhmodul'nogo vzaimodeystviya v raspredelennykh sistemakh CHPU. Modeli i algoritmy realizatsii [Organization of inter-module interaction in distributed CNC systems. Models and implementation algorithms]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye* [Mechatronics, automation, control], 2010, No. 11, pp. 50-55.
19. Fu K., Gonzalez R., Lee K. Robototekhnika [Robotics]. Moscow: Mir, 1989, 624 p.
20. Ruishu Z., Chang Z., Weigang Z. The status and development of industrial robots, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2018, V. 423, №. 1, pp. 012051.
21. Romanov A.M. Obzor apparatno-programmnogo obespecheniya sistem upravleniya robotov razlichnogo masshtaba i naznacheniya. Chast' 1. Promyshlennaya robototekhnika [Review of hardware and software control systems for robots of various sizes and purposes. Part 1. Industrial robotics]. *Rossiyskiy tekhnologicheskii zhurnal* [Russian technological journal], 2019, Vol. 7, No. 5, pp. 30-46.
22. Ilyukhin Yu.V. Sinergeticheskiy (mekhatronnyy) podkhod k proyektirovaniyu sistem upravleniya tekhnologicheskikh robotov [Synergetic (mechatronic) approach to designing control systems for technological robots], *Mekhatronika* [Mechatronics], 2000, No 2, pp. 7-12.
23. Volkov V.A., Chudinov S.M. Sistemnyy analiz dlya strukturno-parametricheskogo sinteza [System Analysis for Structural-Parametric Synthesis], *Ekonomika. Informatika* [Economics. Computer science], 2012, No. 19 (138), Issue 24/1.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Л.М. Червяков.

Зеленский Александр Александрович – Научно-производственный комплекс «Технологический центр»; e-mail: Zelenskyaa@gmail.com; г. Зеленоград, Россия; к.т.н.; в.н.с.

Zelensky Alexander Aleksandrovich – Scientific-Manufacturing Complex «Technological Centre»; e-mail: Zelenskyaa@gmail.com; Zelenograd, Russia; cand. of eng. sc.; leading researcher.

Л.А. Рыбак, А.А. Волошкин, К.В. Чуев, Д.И. Малышев, В.М. Скитова

**МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ТРЕНАЖЕРНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ ВОДИТЕЛЕЙ
ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ И СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕХНИКИ
С ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМОЙ ВИРТУАЛЬНЫХ 3D МОДЕЛЕЙ
РЕАЛЬНОЙ МЕСТНОСТИ***

Разработка современных тренажерных комплексов для симуляции управления транспортными средствами является актуальной задачей из-за высокой цены ошибок управления, которая может быть решена при помощи механизмов параллельной структуры. В статье представлены актуальные исследования в области создания модели и реального прототипа тренажерного комплекса для обучения водителей транспортных средств и спецтехники на базе динамической шестистепенной платформы подвижности. Одним из обязательных требований при проектировании платформы является исключение из рабочей области особых положений, в которых механизм теряет свою управляемость и могут возникать сбои в работе. В статье представлены результаты исследований влияния особых положений на решение прямой задачи кинематики и геометрию рабочего пространства платформы Гофа-Стюарта (коммерческое название – «Гексапод»). Разработан виртуальный прототип роботизированной платформы в MSC Adams, который позволил выполнить имитационное моделирование кинематических и динамических параметров, характеризующих эксплуатационные условия под действием рабочих нагрузок. Определены наибольшие результирующие силы, действующие на шарниры при максимальной скорости, которую может развить актуатор. В соответствии с предельной нагрузкой выполнено построение 3D модели тренажерного комплекса при помощи систем автоматизированного проектирования. В статье представлены результаты проектирования тренажерного комплекса, изготовлен прототип. Тренажер состоит из верхней платформы и основания, которые соединены поступательными электроприводами. На верхней платформе установлена кабина водителя, которая имеет органы управления повторяющие органы управления автомобилем. Вывод изображения симуляции происходит на установленные мониторы. Для взаимодействия и погружения водителя в среду симуляции разработан программно-аппаратный комплекс «Маршрут», со следующими функциональными возможностями: – автоматизированное формирование цифровой модели рельефа (в том числе областей урбанистической застройки) на основе электронных топографических карт, библиотек трехмерных объектов, результатов лазерного сканирования реальных участков местности, данных от мобильных комплексов с прецизионным навигационным оборудованием; – создание новых трехмерных объектов; – настройка поведенческой модели динамических объектов (интеллектуальных агентов), разработанной с использованием принципов многоагентных систем; – создание комплексов упражнений с различными аварийными ситуациями для обучаемых. Экспериментальные исследования прототипа позволили оценить его возможности и характеристики, скорректировать алгоритмы. Результаты исследований, представленные в статье, будут способствовать созданию прочной инфраструктуры, содействие обеспечению всеохватной и устойчивой индустриализации.

Тренажер; виртуальная модель; платформа Гофа-Стюарта; прямая задача кинематики; имитационное моделирование; цифровой двойник; прототип.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01614, <https://rscf.ru/project/22-29-01614>.

L.A. Rybak, A.A. Voloshkin, K.V. Chuev, D.I. Malyshev, V.M. Skitova

**METHODOLOGICAL FOUNDATIONS OF DESIGNING A SIMULATOR
COMPLEX FOR TRAINING DRIVERS OF VEHICLES AND SPECIAL
EQUIPMENT WITH AN INTEGRATED SYSTEM OF VIRTUAL 3D MODELS
OF REAL TERRAIN**

The development of modern training complexes for simulating vehicle control is an urgent task due to the high cost of control errors, which can be solved using parallel structure mechanisms. The article presents current research in the field of creating a model and a real prototype of a simulator complex for training drivers of vehicles and special equipment based on a dynamic six-degree mobility platform. One of the mandatory requirements when designing a platform is the exclusion from the working area of special positions in which the mechanism loses its controllability and malfunctions may occur. The article presents the results of studies of the influence of special positions on the solution of the direct problem of kinematics and the geometry of the working space of the Gough-Stewart platform (commercial name - "Hexapod"). A virtual prototype of the robotic platform was developed at MSC Adams, which made it possible to simulate the kinematic and dynamic parameters that characterize the operating conditions under the action of workloads. The greatest resultant forces acting on the hinges at the maximum speed that the actuator can develop are determined. In accordance with the ultimate load, a 3D model of the training complex was built using computer-aided design systems. The article presents the results of designing a training complex, a prototype is made. The simulator consists of an upper platform and a base, which are connected by translational electric drives. The driver's cabin is installed on the upper platform, which has controls similar to those of the car. The simulation image is displayed on the installed monitors. For the interaction and immersion of the driver in the simulation environment, the software and hardware complex "Route" has been developed, with the following functionality: – automated formation of a digital terrain model (including areas of urban development) based on electronic topographic maps, libraries of three-dimensional objects, results of laser scanning of real terrain, data from mobile complexes with precision navigation equipment; – creation of new three-dimensional objects; – setting up a behavioral model of dynamic objects (intelligent agents), developed using the principles of multi-agent systems; – creation of sets of exercises with various emergency situations for trainees. Experimental studies of the prototype made it possible to evaluate its capabilities and characteristics, and adjust the algorithms. The research results presented in the article will contribute to the creation of a solid infrastructure, promoting the provision of inclusive and sustainable industrialization.

Training apparatus; virtual model; Gough-Stewart platform; direct problem of kinematics; simulation modeling; digital twin; prototype.

Введение. В настоящее время все чаще используются различные симуляторы для обучения профессиональным навыками. Технологии виртуальной и дополненной реальности позволяют погрузить учащихся в реалистичные условия труда. Одним из наиболее востребованных направлений обучения при помощи симуляции – это обучение управлению транспортным средством. Это связано с тем, что стоимость подземных, наземных, водных или воздушных средств передвижения крайне высока, а ошибка в управлении фатальна. Все симуляторы обучения вождению автомобиля классифицируют на профессиональные, которые очень сложны технически и применяются в автошколах, и домашние, которые можно использовать на ноутбуке. Разработка профессиональных симуляторов вождения является комплексной задачей, которая решается различными способами. Ряд разработок в области симуляторов управления транспортными средствами направлены на получение высококачественного, реалистичного изображения с применением виртуальной реальности и нейросетях алгоритмов [1–3]. Другим направлением является создание физического окружения водителя, которое повторяет кабину реального транспортного средства со всеми органами управления [4, 5], что представляет собой целый тренажерный комплекс для обучения водителя или пилота. Вышеука-

занные симуляторы позволяют получить представление о распространенных ситуациях, возникающих при управлении транспортным средством, а также получить навыки управления, однако стационарные симуляторы не могут передать динамику движения транспортного средства, отсутствие которой приводит к неверному пониманию принципов управления летательными или наземными большегрузными транспортными средствами гражданского и военного назначения. Работы над такими тренажерами уже ведутся длительное время, но с учетом сложности разработки и высокой стоимости, изначально применялись только для подготовки космических полетов. Специфика пилотирования летательными аппаратами одно из направлений, в котором активно ведутся разработки динамических симуляторов в том числе для удаленного управления [6–8]. Одним из средств, которые могут обеспечить требуемые параметры движения – это параллельные механизмы благодаря таким преимуществам, как высокая жесткость, точность, грузоподъемность и низкая стоимость изготовления. Платформа Гофа-Стюарта имеет соответствующие преимущества, а также 6 степеней свободы, что обосновывает её использование в различных симуляторах и тренажерах. Существует множество конфигураций платформы Гофа-Стюарта и механизмов на её основе. В каждой из конфигураций платформа включает 6 штанг переменной длины, однако число шарниров основания и подвижной платформы может быть различным. В статье [9] рассмотрено проектирование 6-RUS конфигурации для авиасимулятора и оптимизация геометрических параметров с учетом физических ограничений работы механизма.

В данной работе будет рассмотрено проектирование тренажерного комплекса обучения управлению транспортными средствами на базе платформы Гофа-Стюарта. Исследования, посвященные тренажерам на базе платформы Гофа-Стюарта известны и рассмотрены в ряде работ, которые исследуют влияние тангажа и крена на эффективность обучения используя выборку испытуемых [10, 11]. Другие исследования направлены на создание эффектов вибрации, которые встречается при управлении транспортными средствами во всех средах [12]. А также работы, направленные на улучшение бокового ускорения и боковых движений, кренов и рыскания для более качественного восприятия собственного движения, путем устранения ошибок имитационных моделей и повышению качества управления [13–15].

Анализ существующих решений тренажерных комплексов на базе платформы Гофа-Стюарта позволил выявить следующее:

1. Большинство из них используется в качестве авиасимуляторов, а также для подготовки космонавтов для пилотируемых полетов.
2. Для обучения водителей наземных транспортных средств применяются тренажеры на базе либо трехстепенных платформ, либо стационарной для имитации кабины или посадочного места водителя с виртуальным отображением передвижения транспортного средства.

В связи с этим, существует проблема создания эффективных тренажерных комплексов, обеспечивающих симуляцию транспортного средства по всем шести координатам в пространстве с возможностью отработки требуемой динамики движения реального транспортного средства с учетом рельефа и географии реальной местности в городской черте или за её пределами. Исследования, представленные в статье, направлены на создание методологических основ проектирования тренажерных комплексов на базе платформы Гофа-Стюарта на основе современных методов численного моделирования и CAD/CAM проектирования для построения цифровых двойников, адекватно отражающих свойства реальных прототипов, а также проектирования самих прототипов.

Математическая модель платформы. Рассмотрим структуру платформы Гофа-Стюарта. Платформа имеет 6 кинематических цепей, которые соединяют неподвижное основание с подвижной платформой, посредством линейных приводов (L_i) и универсальных шарниров у оснований (A_i и B_i). В зависимости от конфигураций количество шарниров основания и подвижной платформы может изменяться, а их расположение может быть, как свободным, так и на окружностях определенных радиусов. На рис. 1 показана пример конфигурации 6-3 платформы Гофа-Стюарта.

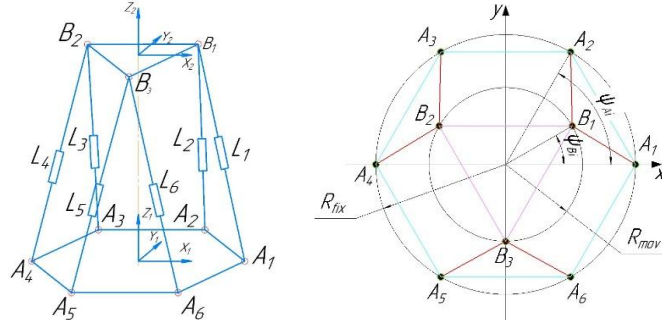


Рис. 1. Конфигурация 6-3 платформы Гофа-Стюарта

Решение обратной задачи кинематики платформы Гофа-Стюарта для входной координаты L_1 запишем как

$$L_1 = \left((A_{1x} - B_{1x})^2 + (A_{1y} - B_{1y})^2 + (A_{1z} - B_{1z})^2 \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где B_{2x}, B_{2y}, B_{2z} – координата точки B_2 в системе координат $X_1Y_1Z_1$ неподвижной платформы. Аналогично определяется значения остальных входных координат. Координаты точек B_i определяются как

$$B_i = (B_{ix} \ B_{iy} \ B_{iz} \ 1)^T = M \cdot (B_{ix}^{(2)} \ B_{iy}^{(2)} \ B_{iz}^{(2)} \ 1)^T, \quad (2)$$

где $B_{ix}^{(2)}, B_{iy}^{(2)}, B_{iz}^{(2)}$ – координаты точек B_i в системе координат $X_2Y_2Z_2$ подвижной платформы, M – матрица преобразования для перехода от подвижной к неподвижной системе координат. Для составления матрицы преобразования используем углы Эйлера (α, β, γ) .

Введём следующие обозначения: $c_\alpha = \cos(\alpha)$, $s_\alpha = \sin(\alpha)$, $c_\beta = \cos(\beta)$, $s_\beta = \sin(\beta)$, $c_\gamma = \cos(\gamma)$, $s_\gamma = \sin(\gamma)$. В таком случае матрицу преобразования M запишем как

$$M = \begin{pmatrix} i_x & j_x & k_x & O_x \\ i_y & j_y & k_y & O_y \\ i_z & j_z & k_z & O_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_\alpha c_\gamma - c_\beta s_\alpha s_\gamma & -c_\gamma s_\alpha - c_\alpha c_\beta s_\gamma & s_\beta s_\gamma & O_x \\ c_\beta c_\gamma s_\alpha + c_\alpha s_\gamma & c_\alpha c_\beta c_\gamma - s_\alpha s_\gamma & -c_\gamma s_\beta & O_y \\ s_\alpha s_\beta & c_\alpha s_\beta & c_\beta & O_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где O_x, O_y, O_z – координаты центра O подвижной платформы в системе координат $X_1Y_1Z_1$.

Ж.Р. Merlet в своих работах [16, 17] отметил, что особое положение для платформы Гофа-Стюарта возникает при попадании оси любой из приводных штанг в плоскость подвижной платформы. Из этого следует что особое положение возникает в том случае, когда хотя бы одна из точек A_i принадлежит плоскости подвижной платформы. Условие возникновения особого положения можно записать в следующем виде

$$aA_{ix} + bA_{iy} + cA_{iz} + d = 0, \quad (4)$$

где a, b, c, d – коэффициенты уравнения плоскости подвижной платформы, которые определяются как

$$a = k_x, b = k_y, c = k_z, d = k_x O_x + k_y O_y + k_z O_z.$$

Попадание в особое положение происходит при смене знака левой части уравнения (3), следовательно, необходимо добавить условие его знакопостоянства

$$aA_{ix} + bA_{iy} + cA_{iz} + d > 0, \quad (5)$$

Ранее для данного механизма рассмотрена задача оптимизация параметров платформы подвижности с использованием PSO алгоритма в статье [18], а также для механизмов другого типа в работах [19, 20]. Критерий оптимизации основан на минимизации размеров конструкции с учётом требуемых соотношений между некоторыми параметрами. Ограничением оптимизации является условие обеспечения требуемой рабочей области с учётом диапазонов ориентации платформы.

Создание и расчет имитационной модели. Для моделирования кинематики и динамики, характеризующих эксплуатационные условия под действием рабочих нагрузок разработан виртуальный прототип роботизированной платформы, представленный на рис. 2. Его цифровая модель, имеющая свойства параметризованного цифрового двойника, создана в программном комплексе MSC Adams и состоит из 4 основных элементов (деталей): основания подвижной платформы, штока, поршня, которые обозначены на рисунке 2: M01...M60 – маркеры соответствующих шарнирных соединений; SJ – сферический шарнир; TJ – линейный привод (актуатор); CM – центр масс; PL – полезная нагрузка, приложенная в центре масс.

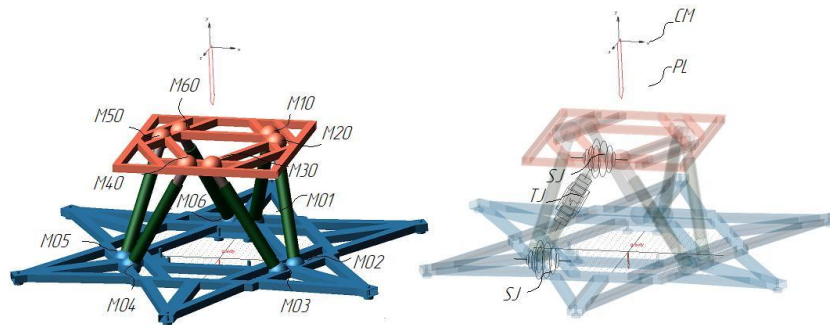


Рис. 2. Цифровая имитационная модель РПП выполненная в MSC Adams

Для испытания модели были отработаны 5 примитивных видов траекторий. Они выбраны с целью реализации наиболее жестких условий эксплуатации с точки зрения возникающих силовых нагрузок в элементах конструкции, а также для определения возможностей модели и комбинирования различных сочетаний траекторий. Все траектории обрабатывались при максимальной скорости, которую может развить актуатор. Исходным (начальным) положением для всех видов траекторий является позиция при котором подвижная часть платформы находится в горизонтальном положении, геометрические центры основания и подвижной части находятся на одной вертикальной линии (ось Y в модели), нулевое исходное положение по высоте выбрано минимально возможное положение верхней платформы, исходя из технических требований к РПП это 900 мм над уровнем пола при массе 600 кг. В результате были получены графики скорости (рис. 3), ускорения центра масс (рис. 4), и действие результирующих сил на шарниры (рис. 5).

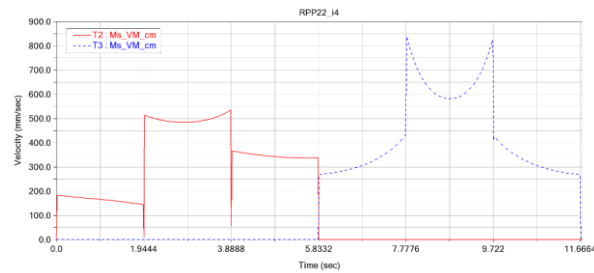


Рис. 3. Изменение результирующей скорости центра масс при выполнении траекторий

Резкие скачки и падения скоростей обусловлены тем, что при отработке завершения движения на участке все актуаторы останавливаются. Пиковые значения результирующей скорости возникают при отработке траектории №3.

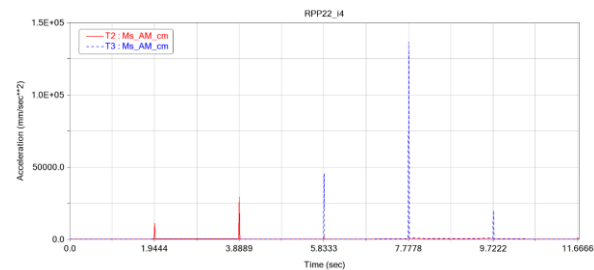


Рис. 4. Изменение результирующей ускорения центра масс при выполнении траекторий

На протяжении большого количества времени ускорение центра масс отсутствует, так как актуаторы ускоряются (замедляются) до максимальной скорости за $t=0,01$ с. Пики результирующей ускорения появляются во время разгона и замедления платформы. Пик ускорения центра масс возникает при отработке траектории №3. На данном участке происходит работа всех шести актуаторов, три из которых (A22, A33, A55) работают на удлинение, а других три (A11, A44, A66) в обратном направлении.

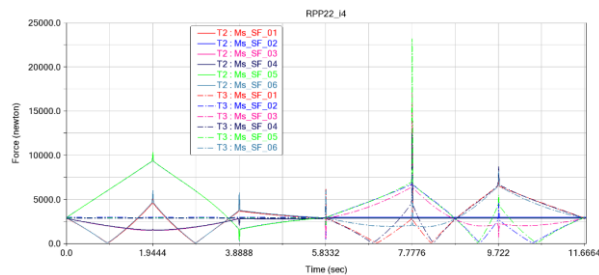


Рис. 5. Изменение результирующих силовых значений в шарнирах основания M01-M06 при отработке траекторий

Наибольший пик результирующей суммы сил, приложенных к шарниру, возникает при отработке траектории №3 (аналогично максимальному пику ускорения). Максимальное значение результирующей суммы сил приходится на шарнир опоры M05.

Наибольший пик результирующей суммы сил, приложенных к шарниру, возникает при отработке траектории 3 в момент времени $t=7.78$ с. Данные расчета пиковых значений результирующих сумм сил, приложенных к шарнирам M01-M06 представлены в табл. 1.

Таблица 1

Пиковые значения суммы сил, приложенных к шарнирам M01-M06

	t, с	M01, Н	M02, Н	M03, Н	M04, Н	M05, Н	M06, Н
T2	0,91	119,25	5943,53	2017,68	2031,80	5950,11	105,48
	1,95	5888,98	10335,88	1630,05	1657,18	10369,98	6031,22
	2,91	90,60	5946,08	1869,81	1894,12	5950,71	79,31
	3,89	5661,14	240,51	2046,28	2051,13	269,42	5772,58
T3	5,84	6172,77	440,47	605,40	4456,80	2073,24	6064,45
	7,78	16859,69	11744,76	17365,41	12497,20	23176,15	7834,03
	8,74	2626,85	2979,26	2802,07	2579,14	2936,76	2724,77
	9,73	7143,79	4886,21	719,80	8724,70	5485,17	8153,82

Цифровой двойник тренажерного комплекса. Исходя из предельной нагрузки на шарнирный узел, выполнено детальное проектирование тренажерного комплекса обучения управлению транспортными средствами (рис. 6). В соответствии с ГОСТ Р 52430-2005 и ГОСТ Р 52923-2008, выбраны карданные шарниры, а в соответствии с представленными в ГОСТе размерами поострены их цифровые двойники. Используя полученные данные предельной нагрузки, выбраны актуаторы, которые изготавливает ЗАО «Сервотехника» мощностью 1.6 КВт каждый. Детализированные цифровые модели актуаторов получены от производителя. Таким образом, в соответствии с выполненной оптимизацией были определены точки крепления актуаторов и построена рама платформы. Конструкция кабины тренажерного комплекса была разработана на базе имеющихся конструктивных решений предполагаемого завода изготовителя прототипа.

Платформа состоит из верхней платформы 1 и основания 2, которые соединены поступательными электроприводами 3. Каждый из поступательных электроприводов 3 соединен с верхней платформой 1 и основанием 2 карданными шарнирами 4, которые используются в автомобилестроении и имеют спецификации с описанием предельной нагрузки. Основание имеет шесть дополнительных упоров 5, каждый из которых оснащен виброопорой 6. Кабина пользователя имеет органы управления, повторяющие органы управления автомобилем.

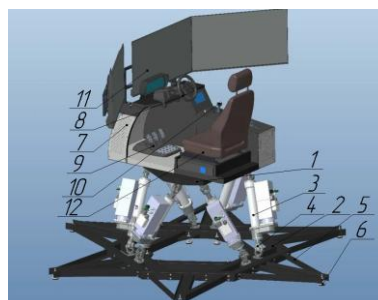


Рис. 6. Цифровой двойник тренажерного комплекса

Основой для закрепления всех элементов является корпус кабины 7, на который закреплены руль 8 и педали 9 являющиеся серийно выпускаемой приставкой с интерфейсом подключения USB. Цифровая приборная панель 9 отображает такую информацию как обороты двигателя, скорость, сигналы поворотов и «Чек Энджин»,

по наличию которого можно определить, что машина заглушена или неисправна. Переключение передач осуществляется электронным селектором коробки передач 10. Вывод изображения симуляции происходит на установленные мониторы 11, которые могут быть выполнены как единым экраном, так и серией экранов меньшей диагонали. Посадка пользователя осуществляется за счет регулируемого кресла 12 со встроенным ремнем безопасности, который необходим для имитации условий эксплуатации автомобиля так и для безопасности при управлении симулятором.

Управление осуществляется от блока управления платформой, содержащего, шесть преобразователей частоты и шесть пультов управления инвертора. Блок управления платформой подключается к ЭВМ через преобразователь USB в CAN. Для разблокировки платформы и ее блокировки (в том числе экстренной) применяется пульт блокировки платформы, находящийся на столе оператора платформы. Для взаимодействия и погружения водителя в среду симуляции разработан программно-аппаратный комплекс «Маршрут», со следующими функциональными возможностями:

- ◆ автоматизированное формирование цифровой модели рельефа (в том числе областей урбанистической застройки) на основе электронных топографических карт, библиотек трехмерных объектов, результатов лазерного сканирования реальных участков местности, данных от мобильных комплексов с прецизионным навигационным оборудованием;
- ◆ создание новых трехмерных объектов;
- ◆ настройка поведенческой модели динамических объектов (интеллектуальных агентов), разработанной с использованием принципов многоагентных систем;
- ◆ создание комплексов упражнений с различными аварийными ситуациями для обучаемых.

Лабораторные испытания прототипа. В соответствии с цифровым двойником платформы, изготовлен прототип тренажерного комплекса с интегрированной системой виртуальных 3D моделей реальной местности на базе предприятия ООО ПФ «Логос» (г. Москва). Характеристики прототипа представлены в табл. 2.

Таблица 2

Технические характеристики тренажерного комплекса

Параметры	Значения
Амплитуда движений:	
-по крену	$\pm 20^\circ$
-по тангажу	$\pm 20^\circ$
-по вертикали	± 400 мм
Линейное ускорение	влево-вправо, вверх-вниз: 5 м/с ² вперед-назад: 10 м/с ²
Угловая скорость	до 1,5 рад/с
Грузоподъемность, кг	не менее 800
Тип привода	электрический
Источник электропитания	промышленная сеть ~50 Гц 380В
Средняя потребляемая мощность, кВт	7
Масса, кг	600
Габаритные размеры, мм	3150x2800x1250
Точность позиционирования	1 мм
Интерфейс управления	USB
Количество приводов динамической платформы	6
Рабочая поверхность динамической платформы, не менее	1200×1600

На рис. 7 представлен прототип тренажерного комплекса, который состоит из тренажера (рис. 7,а) и пульта оператора (рис. 7,б). Пульт оператора позволяет производить запуск динамической платформы, задавать карту местности, устанавливать виртуальный автомобиль водителя в заданную точку на карте, а также отслеживать нарушения при прохождении участка.



Рис. 7. Прототип тренажёрного комплекса с интегрированной системой виртуальных 3d моделей реальной местности

Для испытания тренажера были выбраны несколько трас с различным уклоном поверхности. В соответствии с наклоном виртуальной модели были проведены сравнения изменения крена и тангажа динамической платформы. В симуляции присутствуют поверхности, движение по которым предполагает больший наклон чем позволяют технические характеристики платформы. В таких условиях платформа достигает крайнего положения расчетной рабочей области и останавливается. Следовательно, для эксплуатации платформы не требуется учитывать рельеф среды симуляции. Другие тесты платформы были направлены на достижение платформой максимальной скорости. Для этого, при помощи пульта инструктора, произведена симуляция падения автомобиля из состояния покоя. В результате актуаторы платформы достигли максимальной скорости. Большую скорость при помощи симуляции достичь невозможно в следствии установленного ограничения.

Проведены тестовые заезды в симуляции полигона, на котором присутствуют препятствия различной сложности, такие как горка и железнодорожный переезд (рис. 8,а,б). На рис. 8,в,г представлены тестовые заезды на дороге в симуляции городских условий. В городе воспроизводится симуляция движения потока, в котором движение автомобилей происходит с разной скоростью. Если машина остается неподвижной, другие участники движения попытаются объехать препятствие. Установленные светофоры регулируют порядок проезда перекрестка. При нарушении правил дорожного движения, автомобиль может попасть в дорожно-транспортное происшествие.

На первом экране (рис. 9,а) инструктора выводится информация о движении обучающегося с видом от третьего лица, на втором экране (рис. 9,б) отображается приборная панель испытуемого, карта маршрута и окно управления платформой.

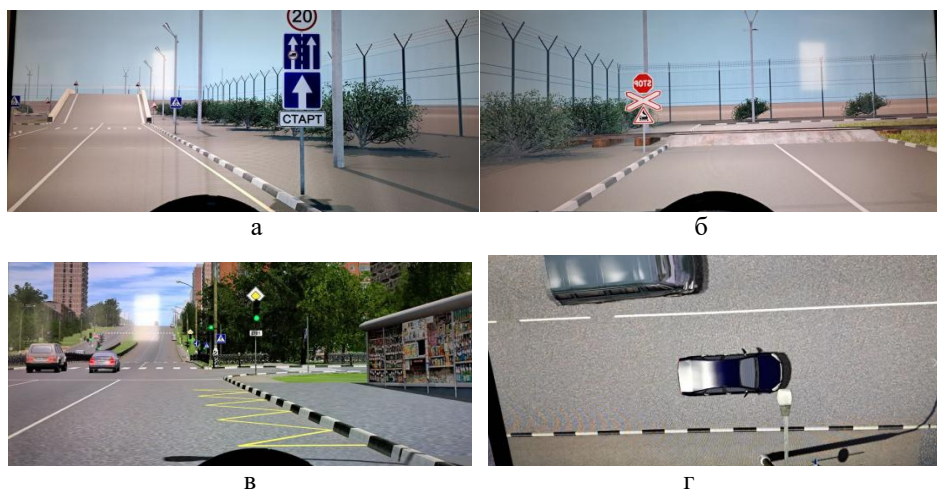


Рис. 8. Тестовые заезды на полигоне и в городских условиях



Рис. 9. Отображение информации на экране инструктора

Заключение. Полученная математическая модель, созданная на основе эволюционных алгоритмов (PSO алгоритм), позволила решить задачу оптимизации геометрических параметров платформы Гофа-Стюарта с учетом минимизации размеров и ограничений на требуемое рабочее пространство и особые положения платформы. В соответствии с полученными геометрическими параметрами расположения и длинами звеньев разработана динамическая модель в программном комплексе MSC Adams. Наибольший пик результирующей суммы сил, приложенных к шарниру, возникает при отработке траектории 3 в момент времени $t=7.78$ и составляет 23,17 кН. Исходя из полученных результатов имитационного моделирования и условий унификации, выполнен подбор приводов и карданных шарниров. Создан цифровой двойник тренажерного комплекса обучения управлению транспортными средствами на базе платформы Гофа-Стюарта при помощи систем автоматизированного проектирования. Изготовлен прототип тренажерного комплекса и проведены испытания. Комплекс оснащен системой виртуальных 3D моделей реальной местности с использованием программно-аппаратного комплекса «Маршрут». Экспериментальные исследования прототипа позволили оценить его возможности и характеристики, скорректировать алгоритмы.

В новой геополитической обстановке импортозамещение становится одной из самых острых проблем экономической безопасности страны в инновационной, оборонной сферах, в связи с чем разработка высокотехнологичных роботизированных устройств, таких как тренажерный комплекс обучения управлению транспортными средствами на базе платформы Гофа-Стюарта, актуальна как никогда.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ribeiro P.R., Andre M., Philipp K., Karel K.* A VR Truck Docking Simulator Platform for Developing Personalized Driver Assistance // *Applied Sciences*. – 2021. – P. 8911.
2. *Andres E.G., Tiago K.S., Carlos M.M., Arthur M.N.* Driving Simulator Platform for Development and Evaluation of Safety and Emergency Systems // *Cornell University Library*. – 2018.
3. *Valentino K., Kevin K., Singgih J., Endra D.* Dynamic Models Based Virtual Reality Flight Simulator // *Internetworking Indonesia Journal*. – 2022. – No. 11. – P. 23-28.
4. *Акулов А.С., Железнов К.И., Заболотный А.М., Чабанюк Е.В.* Тренажер для обучения машинистов горных локомотивов // *Рударско-геолошко-нафтни сборник*. – 2022. – С. 27-35
5. *Schmieder H., Nagel K., Schoener H.* Enhancing a Driving Simulator with a 3D-Stereo Projection System. – Stuttgart, 2017.
6. *Chen G., Dian L., Huan C., Haibo C.* Design and Kinematic Analysis of a Novel Flight Simulator Mechanism // *International Conference on Intelligent Robotics and Applications*. – 2014.
7. *Zhou X.B., Fan M.Y., Chen X.* Design and implementation of instructors operating station for flight simulator. – 2012.
8. *Obaid M.S., Mebayet S.* Drone controlled real live flight simulator // *Journal of Physics*. – 2021. – P. 0121104.
9. *Gao S., Lei D., Liao Q., Zhang G.* Generalized Stewart-Gough platforms and their direct kinematics // *IEEE Transactions on Robotics*. – 2005. – P. 141-154.
10. *Landman A., Hoed A., Baelen D., Stroosma O.* A Procedure for Inducing the Leans Illusion in a Hexapod Motion Simulator. – 2021.
11. *Rafal N., Bibianna B., Piotr F.* Susceptibility to Flight Simulator-Induced Spatial Disorientation in Pilots and Non-Pilots // *International Journal of Aviation Psychology*. – 2020. – P. 25-37.
12. *Natarajan E., Venkataramanan A.R., Sasikumar R., Parasuraman S.* Dynamic Analysis of Compliant LEG of a Stewart-Gough Type Parallel Mechanism // *IEEE Student Conference on Research and Development*. – 2019. – P. 123-128.
13. *Hoed A., Landmann A., Baelen D., Stroosma O.* Leans Illusion in Hexapod Simulator Facilitates Erroneous Responses to Artificial Horizon in Airline Pilots // *Human Factors The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*. – 2020.
14. *Marinus B.D., Zaal P.M., Piter M., Stroosma O.* Between-Simulator Comparison of Motion-Filter Order and Break Frequency Effects on Manual Control // *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. – 2021. – P. 1-18.
15. *Savona F., Stratual M.A., Diaz E., Honnet V.* The Influence of Lateral, Roll and Yaw Motion Gains on Driving Performance on an Advanced Dynamic Simulator. – Nice, 2014.
16. *Писаренко А., Малышев Д., Рыбак Л., Черкасов В.* Применение эволюционных алгоритмов PSO к задаче оптимизации геометрических параметров мобильной платформы 6-6 ВПЧ // *Компьютерные науки Procedia*. – 2022. – № 213. – С. 643-650.
17. *Merlet J.-P.* Singular configurations of parallel manipulators and Grassmann geometry // *The International Journal of Robotics Research*. – 1989.
18. *Малышев Д.И., Рыбак Л.А., Писаренко А.С., Черкасов В.В.* Анализ влияния сингулярностей на решение прямой задачи кинематики и геометрию рабочего пространства платформы Гофа-Стюарта // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2022. – С. 152-162.
19. *Малышев Д., Посыпкин М., Рыбак Л., Усов А.* Подходы к определению рабочей зоны параллельных роботов и анализу их геометрических характеристик // *Инженерные операции*. – 2019. – № 67. – С. 333- 345.
20. *Рыбак Л., Малышев Д., Гапоненко Е.* Алгоритм оптимизации для аппроксимации множества решений систем нелинейных неравенств в задаче определения рабочего пространства робота // *Коммуникации в области вычислительной техники и информатики*. – 2020. – С. 27-37.

REFERENCES

1. *Ribeiro P.R., Andre M., Philipp K., Karel K.* A VR Truck Docking Simulator Platform for Developing Personalized Driver Assistance, *Applied Sciences*, 2021, pp. 8911.
2. *Andres E.G., Tiago K.S., Carlos M.M., Arthur M.N.* Driving Simulator Platform for Development and Evaluation of Safety and Emergency Systems, *Cornell University Library*, 2018.
3. *Valentino K., Kevin K., Singgih J., Endra D.* Dynamic Models Based Virtual Reality Flight Simulator, *Internetworking Indonesia Journal*, 2022, No. 11, pp. 23-28.

4. Akulov A.S., Zhelezov K.I., Zabolotnyy A.M., Chabanyuk E.V. Trenazher dlya obucheniya mashinistov gornyykh lokomotivov [Simulator for training mining locomotive drivers], *Rudarsko-geoloshko-naftni sbornik* [Rudarsko-geološko-naftni Zbornik], 2022, pp. 27-35.
5. Schmieder H., Nagel K., Schoener H. Enhancing a Driving Simulator with a 3D-Stereo Projection System. Stuttgart, 2017.
6. Chen G., Dian L., Huan C., Haibo C. Design and Kinematic Analysis of a Novel Flight Simulator Mechanism, *International Conference on Intelligent Robotics and Applications*, 2014.
7. Zhou X.B., Fan M.Y., Chen X. Design and implementation of instructors operating station for flight simulator, 2012.
8. Obaid M.S., Mebayet S. Drone controlled real live flight simulator, *Journal of Physics*, 2021, pp. 0121104.
9. Gao S., Lei D., Liao Q., Zhang G. Generalized Stewart-Gough platforms and their direct kinematics, *IEEE Transactions on Robotics*, 2005, pp. 141-154.
10. Landman A., Hoed A., Baelen D., Stroosma O. A Procedure for Inducing the Leans Illusion in a Hexapod Motion Simulator, 2021.
11. Rafal N., Bibianna B., Piotr F. Susceptibility to Flight Simulator-Induced Spatial Disorientation in Pilots and Non-Pilots, *International Journal of Aviation Psychology*, 2020, pp. 25-37.
12. Natarajan E., Venkataramanan A.R., Sasikumar R., Parasuraman S. Dynamic Analysis of Compliant LEG of a Stewart-Gough Type Parallel Mechanism, *IEEE Student Conference on Research and Development*, 2019, pp. 123-128.
13. Hoed A., Landmann A., Baelen D., Stroosma O. Leans Illusion in Hexapod Simulator Facilitates Erroneous Responses to Artificial Horizon in Airline Pilots, *Human Factors The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 2020.
14. Marinus B.D., Zaai P.M., Pijters M., Stroosma O. Between-Simulator Comparison of Motion-Filter Order and Break Frequency Effects on Manual Control, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2021, pp. 1-18.
15. Savona F., Stratual M.A., Diaz E., Honnet V. The Influence of Lateral, Roll and Yaw Motion Gains on Driving Performance on an Advanced Dynamic Simulator. Nice, 2014.
16. Pisarenko A., Malyshev D., Rybak L., Cherkasov V. Primenenie evolyutsionnykh algoritmov PSO k zadache optimizatsii geometricheskikh parametrov mobil'noy platformy 6-6 VPS [Application of evolutionary PSO algorithms to the problem of optimization of 6-6 UPU mobility platform geometric parameters], *Komp'yuternye nauki Procedia* [Procedia Computer Science], 2022, No. 213, pp. 643-650.
17. Merlet J.-P. Singular configurations of parallel manipulators and Grassmann geometry, *The International Journal of Robotics Research*, 1989.
18. Malyshev D.I., Rybak L.A., Pisarenko A.S., Cherkasov V.V. Analiz vliyaniya singulyarnostey na reshenie pryamoy zadachi kinematiki i geometriyu rabocheho prostranstva plat-formy Gofa-Styuarta [Analysis of the influence of singularities on the solution of the direct kinematics problem and the geometry of the workspace of the Gough-Stewart platform], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, pp. 152-162.
19. Malyshev D., Posypkin M., Rybak L., Usov A. Podkhody k opredeleniyu rabochey zony parallelnykh robotov i analizu ikh geometricheskikh kharakteristik [Approaches to the determination of the working area of parallel robots and the analysis of their geometric characteristics], *Inzhenernye operatsii* [Engineering Transactions], 2019, No. 67, pp. 333- 345.
20. Rybak L., Malyshev D., Gaponenko E. Algoritm optimizatsii dlya approksimatsii mnozhestva resheniy sistem nelineynykh neravenstv v zadache opredeleniya rabocheho prostranstva robota [Optimization Algorithm for Approximating the Solutions Set of Nonlinear Inequalities Systems in the Problem of Determining the Robot Workspace], *Kommunikatsii v oblasti vychislitel'noy tekhniki i informatiki* [Communications in Computer and Information Science], 2020, pp. 27-37.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н. С.Ю. Мисюрин.

Волошкин Артём Александрович – Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова; e-mail: voloshkin.artem.a@gmail.com; г. Белгород, Россия; тел.: +79524349277; инженер–исследователь.

Рыбак Лариса Александровна – e-mail: rlbgtu@gmail.com; тел.: +74722230530; д.т.н.; профессор; директор НИИ Робототехники и систем управления.

Малышев Дмитрий Иванович – e-mail: malyshev.d.i@ya.ru; тел.: +79507134397; м.н.с.

Чуев Кирил Витальевич – e-mail: Kirill.chuev@gmail.com; тел.: +79805288097; инженер.

Скитова Валерия Михайловна – e-mail: Petrenko_lera1995@mail.ru; тел. +79606256006; инженер.

Voloshkin Artem Aleksandrovich – Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; e-mail: voloshkin.artem.a@gmail.com; Belgorod, Russia; phone: +79524349277; research engineer.

Rybak Larisa Alexandrovna – e-mail: rlbgtu@gmail.com; phone: +74722230530; dr. of eng. sc.; professor; director of Research Institute of Robotics and Control Systems.

Malyshev Dmitry Ivanovich – e-mail: malyshev.d.i@ya.ru; phone: +79507134397; junior researcher.

Chuev Kirill Vitalievich – e-mail: Kirill.chuev@gmail.com; phone: +79805288097; engineer.

Skitova Valeria Mikhailovna – e-mail: Petrenko_lera1995@mail.ru; phone: +79606256006; research engineer.

УДК 681.51, 62-503.54

DOI 10.18522/2311-3103-2023-1-146-154

С.Ю. Курочкин, А.А. Тачков, Е.И. Борисенков

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОВЫМ ДВИЖЕНИЕМ РОБОТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАТИСТИЧЕСКОГО ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассмотрена задача параметрического синтеза системы управления согласованным движением группы мобильных роботов (МР) строем по заданному опорному маршруту. Архитектура системы управления рассматриваемых МР соответствует принципам блочно-модульного построения на основе унифицированных программных компонентов, совместное функционирование которых реализует связующее программное обеспечение, например, Robot Operating System. Стохастическая природа условий применения МР, случайные ошибки в информационно-измерительной системе и использование упрощенных моделей движения МР приводят к возникновению в системе управления МР ошибок, влияющих на скорость его движения. Влияние условий функционирования на качество работы системы связи и системы управления МР отражают вероятностно-временные характеристики (ВВХ): время доставки сообщений в сети и интенсивность остановок МР. Проводимое имитационное моделирование позволяет учесть влияние указанных ВВХ и динамики МР с учетом системы управления приводным уровнем на качество выполнения группой МР поставленной задачи. Согласованное движение группы МР строем по заданному маршруту обеспечивается методом децентрализованной виртуальной структуры. Качество выполнения групповой задачи оценивается двумя показателями: отклонение формы строя от заданной и время выполнения поставленной задачи. Приведен пример вычисления оптимального параметра метода виртуальной структуры, при котором для заданных ВВХ будет обеспечиваться прохождение группой из трех МР опорного маршрута за наименьшее время при минимальных отклонениях текущей формы строя от требуемой. Оптимизационная задача решена при помощи метода золотого сечения, статистическое имитационное моделирование выполнено с использованием пакетов MATLAB Simulink и Parallel Computing Toolbox. Выполнено имитационное моделирование движения однородной группы из трех МР, которой ставится задача движения по маршруту в строю формы «шеренга» с интервалом 5 метров с рекомендуемой скоростью 3 м/с. Качество работы системы автономного управления движением МР обеспечивает безаварийное движение робота с интенсивностью остановок 1,2 остановки в минуту. Система связи и обмена информацией с полностью связной топологией обеспечивает обмен информацией между мобильными роботами с частотой не более 10 Гц, запаздывания в канале связи варьируются в интервале от 0,1 до 0,5 с.

Мобильный робот; группа роботов; групповое управление; имитационное моделирование; система автоматического управления движением.

S.Yu. Kurochkin, A.A. Tachkov, E.I. Borisenkov

PARAMETRIC SYNTHESIS OF A MULTI-ROBOT FORMATION CONTROLLER USING THE STATISTICAL SIMULATION MODELLING

The article proposes a parametric synthesis method of a multi-robot formation controller. The movement of the formation is carried out along the route set by a human operator. Robot's control system corresponds to the modular-assembly principle based on common software, the joint functioning of which is implemented by middleware, for example, Robot Operating System. Errors in the mobile robot control system are caused by: probabilistic application conditions, data-measuring system random errors, using simplified dynamic model within the development process. The influence of the operating conditions on the communication system and the mobile robot autonomous driving system performance reflects by the probabilistic-temporal characteristics: communications and information system delay and the intensity of mobile robot's stops. A method of statistical simulation modeling allowed taking into account the probabilistic-temporal characteristics of the mobile robot communication and the autonomous driving systems, as well as mobile robot dynamics. The coordinated movement of the multi-robot formation along a given path is provided by the method of a decentralized virtual structure. The task execution quality is evaluated by two indicators: the deviation of the form from the given one and the task-performance time. As an example, we consider the task of the movement of three robots along the route in a row-shaped formation, in which, for a given probabilistic-temporal characteristics, a multi-robot formation accomplish the given task in the shortest time with minimal deviations of formation shape from the given one. Optimization solution allowed us to determine the optimal parameter of the formation control system. The optimization problem was solved using the golden section method, statistical simulation was performed using MATLAB Simulink and Parallel Computing Toolbox packages. A simulation of a homogeneous group of three mobile robots movement was performed for the task of driving along the route in the row-shaped formation with an interval of 5 m and a desired speed of 3 m/s. The quality of the autonomous driving system ensures accident-free motion with an intensity of 1,2 stops per minute. The communications and information system with fully connected network topology provides communications flow between mobile robots with a frequency of no more than 10 Hz. Communications system delay vary in the range from 0.1 to 0.5 s.

Formation control; virtual structure approach; mobile robot; unmanned autonomous vehicle; optimization problem.

Введение. Массовое применение мобильных роботов (МР), объединенных в группы, является актуальным направлением развития робототехники. Область применения групп мобильных роботов охватывает широкий диапазон прикладных задач как гражданского [1–2], так и специального назначения [3–5]. Одной из приоритетных научных задач групповой робототехники на сегодняшний день является задача управления согласованным движением мобильных роботов с сохранением ими заданной геометрии строя, например, управление движением автоколонн беспилотных автомобилей по дорогам общего пользования (англ. Cooperative Adaptive Cruise Control) [1, 6, 7], переноска крупногабаритных объектов группами мобильных роботов [8], поиск различных объектов [9]. Как отмечается в [10], важным условием функционирования системы группового управления является надежная работа системы связи и обмена информацией. Другим важным фактором, влияющим на качество совместного движения группы МР, согласно [11], является эффективность работы системы автономного управления движением (САУД) МР.

Архитектура системы управления рассматриваемых в данной работе МР соответствует принципам блочно-модульного построения на основе унифицированных программных компонентов, совместное функционирование которых реализует связующее программное обеспечение, использующее технологию «издатель-подписчик», например, Robot Operating System (ROS) [12]. Система управления МР, структура которой изображена на рис. 1, включает компоненты: аппаратного

уровня (драйверы приводного уровня и сенсорных устройств), программно-алгоритмические модули САУД, системы логического управления групповыми действиями и обмена информацией с оператором и другими МР. САУД МР содержит взаимосвязанные модули, выполняющие следующие функции: 1) решение навигационной задачи; 2) построение локальной карты; 3) обеспечение безопасности при автономном движении; 4) планирование и выбор траектории; 5) обработка сенсорной информации; 6) траекторное управление.

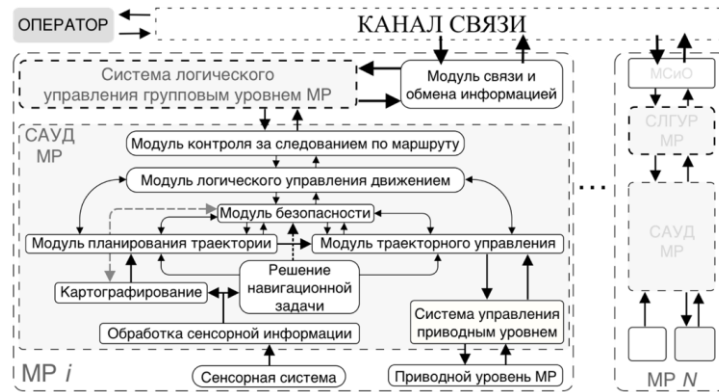


Рис. 1. Структура системы управления мобильным роботом

Стохастическая природа условий применения МР, случайные ошибки в информационно-измерительной системе и использование упрощенных моделей движения МР приводят к возникновению в САУД МР ошибок, снижающих скорость его движения [13]. Влияние условий функционирования на качество работы системы связи и САУД отражают вероятностно-временные характеристики (ВВХ) указанных систем. Основной ВВХ системы связи является время доставки сообщений в сети, САУД – интенсивность остановок МР.

В настоящей статье рассматривается метод параметрического синтеза системы управления согласованным движением группы МР с сохранением заданной геометрии строя, учитывающий ВВХ САУД и системы связи и обмена информацией, а также динамику МР. Влияние ВВХ данных систем на качество движения группы мобильных роботов исследуется при помощи статистического имитационного моделирования.

Описание имитационной модели. Рассматривается задача движения группы МР по опорному маршруту с поддержанием заданной формы строя. Задача формулируется оператором [14] и формально представляется кортежем $Task = \langle \mathbf{W}, V_{max}, \bar{V}, \mathbf{F} \rangle$, где $\mathbf{W} = (\mathbf{tr}_j)_{j=1}^m$ – опорный маршрут движения, описываемый последовательностью точек $\mathbf{tr}_j = (x_j, y_j, \theta_j)$, где $(x_j, y_j) \in \mathbb{R}^2$ – j -я точка, $\theta_j \in S^1$ – требуемая ориентация в точке (x_j, y_j) , V_{max} – максимальная скорость движения МР, $\bar{V}$ – желаемое значение средней скорости движения МР, $\mathbf{F} = (\mathbf{fm}_i)_{i=1}^N$ – описание формы строя при помощи последовательности точек, заданных в полярных координатах: $\mathbf{fm}_i = (D_i, \Phi_i)$, где $D_i \in \mathbb{R}$ – радиальная координата желаемого положения МР в строю, $\Phi_i \in S$ – угловая координата, где i – порядковый номер МР в группе, N – количество МР, входящих в группу.

Движение группы МР, выполняющих сформированную оператором задачу, исследуется с использованием разработанной имитационной модели, структура которой приведена на рис. 2 [15]. Рассматриваемая модель включает следующие блоки: имитационная модель САУД и приводного уровня МР [16], модуль управ-

ления движением МР в группе, имитационная модель системы связи и обмена информацией. Также в модель входит блок подготовки исходных данных, который имитирует постановку задачи оператором.

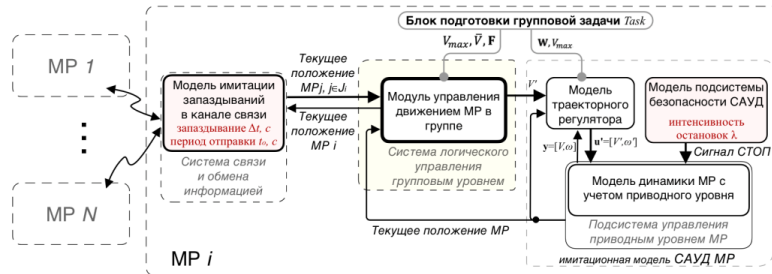


Рис. 2. Структура модели группы МР

Динамика МР с учетом приводного уровня задается при помощи двух линеаризованных моделей с запаздыванием, описывающих прямолинейное движение и поворот МР [16]. При моделировании движения МР принимается допущение, что робот движется без проскальзывания. ВВХ САУД, интенсивность остановок МР, учитывается в блоке подсистемы безопасности САУД, в состав которого входит функция генерации сигналов остановки мобильного робота (требуемая линейная скорость МР равна нулю). Сигналы об остановке МР рассматриваются как последовательность однородных событий, наступающих одно за другим в случайные промежутки времени – ординарный поток без последствия. Интенсивность потока λ задает количество остановок в единицу времени. Время τ , через которое наступит событие, определяется по следующей формуле:

$$\tau = -1/\lambda \cdot \ln(r),$$

где r – случайное число, равномерно распределенное в интервале от 0 до 1, получаемое при помощи генератора псевдослучайных чисел. Величина интенсивности потока λ определяется экспериментально по результатам обработки данных, записанных в процессе движения одного МР по маршруту.

Запаздывание, которое вносит система связи, рассматривается как случайно изменяющаяся величина, равномерно распределенная в интервале от минимально возможного запаздывания t_{min} до максимально возможного t_{max} . Интервал выбирается по результатам обработки данных или на основе экспертной оценки. В рамках проводимого статистического имитационного моделирования частота обмена информацией рассматривается как постоянная величина. Также принимается допущение, что в процессе движения топология связи между МР не изменяется.

Параметрический синтез метода группового управления согласованным движением группы мобильных роботов. В качестве метода группового управления, обеспечивающего согласованное движение группы МР в строю заданной формы, выбран метод децентрализованной виртуальной структуры, подробно описанный в публикациях [17] и [18]. Получив задачу от оператора, группа МР, находящаяся на исходном рубеже (рис. 3), начинает движение по маршруту, обмениваясь друг с другом информацией о своем текущем местоположении. Благодаря информационному обмену, каждый МР вычисляет предполагаемое положение полюса группы, желаемое положение МР корректируется правилом консенсуса [19].

Алгоритм достижения консенсуса для робота под номером i , получающего координаты от роботов, номера которых перечислены в векторе J_i , записывается следующим образом:

$$\mathbf{e}_i = \frac{1}{|J_i|} \sum_{j \in J_i} \gamma_r (\mathbf{P}_i - \mathbf{P}_j),$$

где $\mathbf{e}_i$ – ошибка, которую необходимо компенсировать i -му роботу, чтобы достичь общепринятого значения, $\mathbf{P}_i$ – координаты предполагаемого полюса группы для i -го робота, $\mathbf{P}_j$ – координаты предполагаемого полюса группы для МР под номером j , где $j \in J_i$, $\gamma_r > 0$ – константа, используемая для настройки алгоритма. Координата предполагаемого полюса $\mathbf{P}_j(x_{pj}, y_{pj})$ вычисляется роботом под номером i , исходя из полученного положения робота под номером j и известной форме строя $\mathbf{F}$.

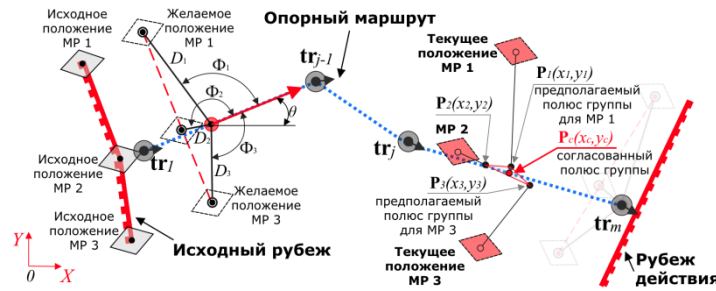


Рис. 3. Пример описания формы строя и постановки задачи группе МР

Считается, что группа роботов достигла консенсуса, сформировала строй, в том случае, если оценки местоположения полюса строя, выполненные каждым роботом, достигают одного общепринятого значения $\mathbf{P}_i \rightarrow \mathbf{P}_j \rightarrow \mathbf{P}_c$ (рис. 3).

Качество выполнения поставленной группе МР задачи оценивается при помощи двух показателей: отклонение формы строя от заданной в процессе движения и время выполнения поставленной задачи. Для оценки отклонения от заданной формы вычисляется евклидово расстояние d_{io} между центром строя $\mathbf{P}_i \in \mathbb{R}$ для i -го МР и геометрическим центром (пространственной медианой) $\mathbf{O} = (x_o, y_o)$:

$$d_{io} = \|\mathbf{P}_i - \mathbf{O}\|_2.$$

Геометрический центр $\mathbf{O}$ вычисляется по формуле:

$$\mathbf{O} = \arg \min_{\mathbf{Y}_e \in \mathbb{R}} \sum_{i=1}^N \|\mathbf{P}_i - \mathbf{Y}_e\|_2,$$

где $\mathbf{Y}_e$ – точка, для которой сумма всех евклидовых расстояний до $\mathbf{P}_i$ минимальна, N – количество роботов.

Изменение среднего значения расстояний $d_o = 1/N \sum_{i=1}^N d_{io}$ для N МР, входящих в группу, позволяет оценить искажение формы строя в процессе движения по маршруту. Результирующее значение искажения формы строя записывается следующим образом:

$$d_{\text{рез}} = \frac{1}{N_{\text{изм}}} \sum_{k=1}^{N_{\text{изм}}} d_{ok},$$

где $N_{\text{изм}}$ – количество измерений, выполненных в процессе выполнения задачи.

Второй показатель качества – время выполнения поставленной задачи, оценивается, как разница между моментом времени t_c , в который группа начала движения по маршруту, и момент времени t_ϕ – время достижения последней точки маршрута последним роботом.

Задача параметрического синтеза заключается в выборе такого настраиваемого параметра γ_r метода виртуальной структуры, при котором для заданных ВВХ САУД и системы связи будет обеспечиваться прохождение опорного маршрута $\mathbf{W}$

за наименьшее время $t_{\text{дв}}$ при минимальных отклонениях $d_{\text{рез}}$ текущей формы строя от требуемой **Б**. Рассматриваемая оптимизационная задача является двухкритериальной и заключается в минимизации двух целевых функций: $f_t(\gamma_r)$ – целевая функция по критерию $t_{\text{дв}}$; $f_d(\gamma_r)$ – целевая функция по критерию $d_{\text{рез}}$. Для того, чтобы найти компромиссное решение, сведем оптимизационную задачу к однокритериальной. Для нормализации значений целевых функций введены коэффициенты ζ_1 и ζ_2 , значения которых определяются экспертом. Таким образом, целевая функция приобретает вид:

$$f(\gamma_r) = \zeta_1 \cdot f_t(\gamma_r) + \zeta_2 \cdot f_d(\gamma_r).$$

Задача глобальной минимизации записывается следующим образом:

$$\min_{\gamma_r \in \mathbb{R}} f(\gamma_r) = f(\gamma_r^*) = f^*,$$

где $f(\gamma_r)$ – скалярная целевая функция; $f(\gamma_r^*) = f^*$ – искомый глобальный минимум; γ_r – варьируемый параметр в пространстве $\mathbb{R}$.

Результаты имитационного моделирования. В качестве примера рассмотрим однородную группу из трех мобильных роботов, которой ставится задача движения по маршруту в строю формы «шеренга» с интервалом 5 метров с рекомендуемой скоростью $\bar{V} = 3$ м/с. Максимальная скорость роботов составляет $V_{\text{max}} = 5$ м/с, качество работы САУД робота обеспечивает безаварийное движение робота с интенсивностью остановок $\lambda = 1,2$ остановки в минуту. Система связи и обмена информацией с полностью связной топологией обеспечивает обмен информацией между мобильными роботами с частотой не более 10 Гц, запаздывания в канале связи варьируются в интервале от 0,1 до 0,5 с.

Для тестирования методики параметрического синтеза и решения задачи оптимизации выбран метод золотого сечения, являющийся одним из наиболее простых в реализации и в то же время эффективным среди методов одномерной оптимизации [20]. На каждой итерации вычисление целевых функций $f_t(\gamma_r)$ и $f_d(\gamma_r)$ выполняется при помощи статистического имитационного моделирования:

$$f_t(\gamma_r) = \frac{1}{N_{\text{сим}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{сим}}} f_{tj}(\gamma_r);$$

$$f_d(\gamma_r) = \frac{1}{N_{\text{сим}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{сим}}} f_{dj}(\gamma_r),$$

где $N_{\text{сим}}$ – количество симуляций, проводимых на одной итерации. Например, для доверительного интервала 95% и уровня значимости 0,05 требуется выполнение не менее 384 симуляций.

Имитационное моделирование проводилось с использованием пакетов MATLAB Simulink и Parallel Computing Toolbox. Условием остановки симуляции является сигнал о том, что все роботы доехали до рубежа действия, максимально возможное время моделирования составляет 600 секунд. Для параметра γ_r , изменяющегося от 0 до 0,5, выполнены оценки значений целевой функции (рис. 4).

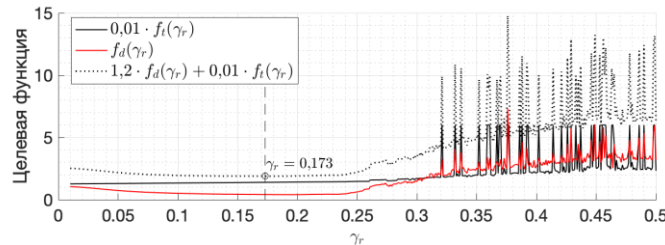


Рис. 4. Оценки значений целевой функции

В результате проведенного вычислительного эксперимента было получено оптимальное значение искомого параметра $\gamma_r = 0,173$ для коэффициентов $\zeta_1 = 1,2$ и $\zeta_2 = 0,01$. На рис. 5 представлены результаты моделирования движения группы из трех МР: изображен опорный маршрут, траектории МР, которые соединены черными линиями, имитирующими текущую форму строя. В процессе движения группы МР промоделирована случайная остановка МР под номером 2, вызвавшая деформацию строя.

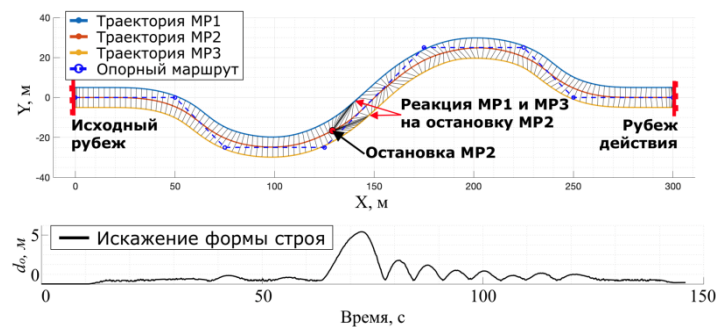


Рис. 5. Результат моделирования движения группы МР по маршруту в строю «Шеренга»

Можно отметить, что предложенный метод параметрического синтеза с использованием статистического имитационного моделирования позволил подобрать оптимальные настройки метода управления групповым согласованным движением МР для заданных ВВХ системы связи и САУД МР.

Выводы. Применение статистического имитационного моделирования позволило оценить качество работы системы группового управления согласованным движением МР по опорному маршруту с поддержанием заданной формы строя. В качестве вероятностно-временных характеристик системы связи и САУД выбраны, соответственно, величина запаздывания и интенсивность остановок МР в процессе автономного движения. Оптимальное значение метода управления групповым согласованным движением МР группового управления определено, благодаря решению однопараметрической двухкритериальной задачи оптимизации с использованием метода золотого сечения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Alonso-Mora J. et al. Reactive mission and motion planning with deadlock resolution avoiding dynamic obstacles // *Autonomous Robots*. – 2018. – Vol. 42, No. 4. – P. 801-824.
2. Girard A.R. et al. A control architecture for integrated cooperative cruise control and collision warning systems // *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control* (Cat. No. 01CH37228). – IEEE, 2001. – Vol. 2. – P. 1491-1496.
3. Young S., Kott A. Control of small robot squads in complex adversarial environments: A review. – 2009.
4. Назарова А.В., Мэйсинь Ч. Организация спасательных команд роботов для ликвидации последствий стихийных бедствий // *Робототехника и техническая кибернетика*. – 2019. – №. 1. – С. 21-28.
5. Власов К.С., Тачков А.А., Данилов М.М. Тактика группового применения наземных робототехнических комплексов при тушении пожаров в резервуарных парках // *Пожарная безопасность*. – 2020. – №. 2. – С. 28-35.
6. Van Arem B., Van Driel C.J.G., Visser R. The impact of cooperative adaptive cruise control on traffic-flow characteristics // *IEEE Transactions on intelligent transportation systems*. – 2006. – Vol. 7, No. 4. – P. 429-436.
7. Sheikholeslam S., Desoer C.A. Longitudinal control of a platoon of vehicles // *1990 American control conference*. – IEEE, 1990. – P. 291-296.

8. Trujillo M.A. et al. Structure Assembly // *Aerial Robotic Manipulation*. – Springer, Cham, 2019. – P. 351-365
9. Healey A.J. Application of formation control for multi-vehicle robotic minesweeping // *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No. 01CH37228)*. – IEEE, 2001. – Vol. 2. – P. 1497-1502.
10. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. – М.: Физматлит, 2009. – 280 с.
11. Пицхопов В.Х., Медведев М.Ю. Сравнительный анализ централизованного и децентрализованного алгоритмов движения строем БЛА мультикоптерного типа // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2022. – № 1 (225). – С. 121-139.
12. Тачков А.А. [и др.]. Принципы построения систем автономного управления движением наземных робототехнических комплексов специального назначения // *Робототехника и техническая кибернетика*. – 2022. – Т. 10, № 2. – С. 121-132.
13. Iakovlev D.S. Collision Risk Analysis to Ensure the Safety of Autonomous Vehicle Motion Control // *2021 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. – 2021. – P. 644-649.
14. Максимов А.А., Тачков А.А., Малыхин А.Ю., Рудянов Н.А. Подход к формализации тактической задачи для группы наземных робототехнических комплексов военного назначения // *Вопросы оборонной техники. Сер. 16*. – 2017. – № 7-8 (109-110). – С. 88-96.
15. Курочкин С.Ю., Тачков А.А. Статистическая имитационная модель группового движения мобильных роботов с учетом вероятностно-временных характеристик системы связи и автономного управления движением // *Экстремальная робототехника*. – 2022. – Т. 1, № 1. – С. 123-129.
16. Тачков А.А. [и др.]. Реализация траекторного регулятора наземного робототехнического комплекса на основе модельного прогнозирующего управления // *Робототехника и техническая кибернетика*. – 2022. – Т. 10, № 1. – С. 43-54.
17. Beard R.W., Lawton J., Hadaegh F.Y. A coordination architecture for spacecraft formation control // *IEEE Transactions on control systems technology*. – 2001. – Vol. 9, No. 6. – P. 777-790.
18. Ren W. Consensus strategies for cooperative control of vehicle formations // *IET Control Theory & Applications*. – 2007. – Vol. 1, No. 2. – P. 505-512.
19. Fax J.A., Murray R.M. Information flow and cooperative control of vehicle formations // *IFAC Proceedings Volumes*. – 2002. – Vol. 35, No. 1. – P. 115-120.
20. Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 446 с.

REFERENCES

1. Alonso-Mora J. et al. Reactive mission and motion planning with deadlock resolution avoiding dynamic obstacles, *Autonomous Robots*, 2018, Vol. 42, No. 4, pp. 801-824.
2. Girard A.R. et al. A control architecture for integrated cooperative cruise control and collision warning systems, *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No. 01CH37228)*. IEEE, 2001, Vol. 2, pp. 1491-1496.
3. Young S., Kott A. Control of small robot squads in complex adversarial environments: A review, 2009.
4. Nazarova A.V., Meysin' Ch. Organizatsiya spasatel'nykh komand robotov dlya likvidatsii posledstviy stikhiynykh bedstviy [Organization of rescue teams of robots to eliminate the consequences of natural disasters], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and Technical Cybernetics], 2019, No. 1, pp. 21-28.
5. Vlasov K.S., Tachkov A.A., Danilov M.M. Taktika gruppovogo primeneniya nazemnykh robototekhnicheskikh kompleksov pri tushenii pozharov v rezervuarnykh parkakh [Tactics of group application of ground-based robotic complexes when extinguishing fires in tank farms], *Pozharnaya bezopasnost'* [Fire Safety], 2020, No. 2, pp. 28-35.
6. Van Arem B., Van Driel C.J.G., Visser R. The impact of cooperative adaptive cruise control on traffic-flow characteristics, *IEEE Transactions on intelligent transportation systems*, 2006, Vol. 7, No. 4, pp. 429-436.
7. Sheikholeslam S., Desoer C.A. Longitudinal control of a platoon of vehicles, *1990 American control conference*. IEEE, 1990, pp. 291-296.
8. Trujillo M.A. et al. Structure Assembly, *Aerial Robotic Manipulation*. Springer, Cham, 2019, pp. 351-365

9. Healey A.J. Application of formation control for multi-vehicle robotic minesweeping, *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No. 01CH37228)*. IEEE, 2001, Vol. 2, pp. 1497-1502.
10. Kalyaev I.A., Gayduk A.R., Kapustyan S.G. Modeli i algoritmy kollektivnogo upravleniya v gruppakh robotov [Models and algorithms of collective management in groups of robots]. Moscow: Fizmatlit, 2009, 280 p.
11. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. Sravnitel'nyy analiz tsentralizovannogo i detsentralizovannogo algoritmov dvizheniya stroem BLA mul'tikopternogo tipa [Comparative analysis of centralized and decentralized algorithms for the movement of a multicopter-type UAV system], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 1 (225), pp. 121-139.
12. Tachkov A.A. [i dr.]. Printsipy postroeniya sistem avtonomnogo upravleniya dvizheniem nazemnykh robototekhnicheskikh kompleksov spetsial'nogo naznacheniya [Principles of construction of autonomous motion control systems for ground-based robotic complexes of special purpose], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and technical cybernetics], 2022, Vol. 10, No. 2, pp. 121-132.
13. Iakovlev D.S. Collision Risk Analysis to Ensure the Safety of Autonomous Vehicle Motion Control, *2021 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*, 2021, pp. 644-649.
14. Maksimov A.A., Tachkov A.A., Malykhin A.Yu., Rudianov N.A. Podkhod k formalizatsii takticheskoy zadachi dlya gruppy nazemnykh robototekhnicheskikh kompleksov voennogo naznacheniya [An approach to the formalization of a tactical task for a group of ground-based robotic systems for military purposes], *Voprosy oboronnoy tekhniki. Ser. 16* [Issues of defense technology. Series 16], 2017, No. 7-8 (109-110), pp. 88-96.
15. Kurochkin S.Yu., Tachkov A.A. Statisticheskaya imitatsionnaya model' gruppovogo dvizheniya mobil'nykh robotov s uchetom veroyatnostno-vremennykh kharakteristik sistemy svyazi i avtonomnogo upravleniya dvizheniem [Statistical simulation model of the group movement of mobile robots taking into account the probabilistic and temporal characteristics of the communication system and autonomous motion control], *Ekstremal'naya robototekhnika* [Extreme robotics], 2022, Vol. 1, No. 1, pp. 123-129.
16. Tachkov A.A. [i dr.]. Realizatsiya traektorного регулятора наземного робототехнического комплекса на основе модельного прогнозирующего управления [Implementation of a trajectory controller of a ground-based robotic complex based on model predictive control], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and technical cybernetics], 2022, Vol. 10, No. 1, pp. 43-54.
17. Beard R.W., Lawton J., Hadaegh F.Y. A coordination architecture for spacecraft formation control, *IEEE Transactions on control systems technology*, 2001, Vol. 9, No. 6, pp. 777-790.
18. Ren W. Consensus strategies for cooperative control of vehicle formations, *IET Control Theory & Applications*, 2007, Vol. 1, No. 2, pp. 505-512.
19. Fax J.A., Murray R.M. Information flow and cooperative control of vehicle formations, *IFAC Proceedings Volumes*, 2002, Vol. 35, No. 1, pp. 115-120.
20. Karpenko A.P. Sovremennye algoritmy poiskovoy optimizatsii [Modern search engine optimization algorithms]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2014, 446 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.Б. Парамонов.

Курочкин Семен Юрьевич – Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), НУЦ «Робототехника»; e-mail: kurochkin.smn@gmail.com; г. Москва, Россия; тел.: 89032161825; м.н.с.; аспирант.

Тачков Александр Анатольевич – e-mail: tachkov@bmstu.ru; к.т.н.; начальник отдела.

Борисенков Егор Игоревич – Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет); e-mail: ei.borisenkov@yandex.ru; г. Москва, Россия; студент.

Kurochkin Semion Yurievich – Bauman Moscow State Technical University, Science and Educational Center “Robotics”; e-mail: kurochkin.smn@gmail.com; Moscow, Russia; phone: +79032161825; junior researcher; post-graduate student.

Tachkov Alexander Anatolyevich – e-mail: tachkov@bmstu.ru; cand. of eng. sc.; head of the department.

Borisenkov Egor Igorevich – Bauman Moscow State Technical University; e-mail: ei.borisenkov@yandex.ru; Moscow, Russia; student.

С.А. Дубовик, А.А. Кабанов

**АСИМПТОТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЗАДАЧАХ СУПЕРВИЗОРНОГО
УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫХ ПОДВОДНЫХ РОБОТОВ***

Работа посвящена актуальной задаче синтеза управления для автономных подводных роботов (АПР). Поскольку АПР должны выполнять действия в соответствии с заданной программой в условиях не всегда прогнозируемой обстановки, то необходимо предусмотреть рабочие инструменты, использование которых совместно с управлением движением и ориентацией АПР требует наряду с механизмами непрерывной локальной стабилизации реализации на верхнем уровне алгоритмов контроля и координирующего управления. Такую двухуровневую схему управления, которую можно назвать супервизорной, в настоящей работе предлагается реализовать с помощью асимптотических методов двух типов: для разделения движений на быстрые и медленные используется аппарат анализа сингулярно возмущенных дифференциальных уравнений, а контроль на верхнем уровне осуществляется на основе принципа больших уклонений. Общая задача синтеза сводится к управлению медленными движениями и стабилизации быстрых движений. При этом в стохастической постановке задачи предполагается, что в быстрых движениях присутствует случайное возмущение. Учитывая, что быстрые движения при этом стабилизируются, с большой вероятностью действие шума усредняется и не оказывает существенного влияния на поведение медленных переменных. Но при достаточно длительном наблюдении можно обнаружить такую ситуацию, когда на некотором промежутке значения возмущений не только взаимно не компенсируются, но, напротив, выстраиваются в последовательность, как бы специально нацеленную на формирование явного ухода медленного подвектора от равновесия. Из теории больших уклонений известно, что такая траектория единственна и наиболее вероятна из всех, ведущих к определенному критическому событию. При этом по фазе этого процесса можно судить о близости критического события. Таким образом, использование теории больших уклонений позволяет организовать контроль уклонений объекта от заданной траектории, способный выдавать оценки по вероятности критических значений контролируемых уклонений. В результате показано, что, если ускорения формируются быстрыми подсистемами, то в медленных подсистемах можно не только добиваться приемлемого качества и точности на фиксированном интервале, но и обеспечить это независимо от действия возмущений. Работоспособность предложенного подхода к синтезу на основе разделения движений и теории больших уклонений показана на примере автономного подводного робота с двумя рулями, носовым и кормовым, в задаче управления продольным движением на заданной глубине. Приводятся результаты моделирования и их обсуждение.

Автономный подводный робот; сингулярное возмущение; большое уклонение; супервизорное управление.

S.A. Dubovik, A.A. Kabanov

**ASYMPTOTIC METHODS IN PROBLEMS OF SUPERVISORY CONTROL
OF AUTONOMOUS UNDERWATER ROBOTS**

The work is devoted to the relevant problem of control synthesis for autonomous underwater vehicles (AUVs). Since AUVs must perform actions in accordance with a given program under conditions of a volatile predictable environment, it is necessary to provide working tools, the use of which, together with the AUV position and orientation control requires, along with continuous local stabilization means, implementation of supervising and coordinated control algorithms at the upper level. Such a two-level control scheme, which can be called supervisory, is proposed in this paper to be implemented using two types of asymptotic methods: to separate movements into fast and slow, an apparatus for analyzing

* Работа частично выполнена при поддержке Минобрнауки России, проект FEFM-2021-0014 № 121111600136-3.

singularly perturbed differential equations is used, and the upper level control is based on the principle of large deviations. The general synthesis task is to control slow movements and stabilize fast movements. At the same time, in the stochastic problem formulation, it is assumed that there is a random perturbation in fast movements. Given that fast movements are stabilized, it is high probable that the noise influence averaged and does not significantly affect the behavior of slow variables. However, with sufficiently long observation it is possible to find a situation where at some period the perturbation values are not only uncompensated, but, on the contrary, line up in a sequence as specially intended to form an apparent deviation of the slow sub-vector from equilibrium. It is known from the theory of large deviations that such a trajectory is the only and most likely of all those leading to a certain critical event. At the same time, the phase of this process can be used to judge the critical event proximity. For this reason, the large deviations theory usage makes it possible to organize the control of deviations from a given object's trajectory, capable of giving estimates on the probability of the controlled deviations critical values. As a result, it is shown that if accelerations are formed by fast subsystems, then in slow subsystems it is possible not only to achieve acceptable quality and accuracy at a fixed interval, but also to ensure this regardless of the disturbances. The validity of the proposed approach to synthesis, based on the separation of movements and the large deviations theory, is shown on the example of an autonomous underwater vehicle with two rudders (fore and aft) in the task of controlling longitudinal motion at a given depth. Simulation results and their discussion are presented.

Autonomous underwater vehicle; singular perturbation; large deviation; supervisory control.

Введение. Потребность в более широком применении автономных подводных роботов (АПР) часто ставит перед теорией управления новые задачи. Приложения задач управления АПР являются достаточно сложными, т.к. на систему управления существенно влияют сильно нелинейная динамика транспортного средства и внешние возмущения, изменяющиеся во времени. В водной среде эти эффекты еще более затрудняют измерение или оценку параметров объекта и среды [1–3].

Отмеченная сложность систем управления АПР способствует развитию приближенных упрощенных методов и алгоритмов синтеза систем управления, сочетающих в себе с одной стороны простоту реализации (в частных случаях и аналитическое решение задачи управления), с другой стороны адекватно учитывающих физику управляемого процесса, что позволяет добиться хороших характеристик точности и качества управляемого процесса. В задачах управления подвижными объектами одним из подходов на этом пути, который хорошо зарекомендовал себя, является разделение движений. В качестве одного из инструментов такой декомпозиции активно используются методы теории сингулярных возмущений и соответствующие им методы композиционного синтеза систем управления [4–6].

На основе теории сингулярных возмущений реализован ряд методов для синтеза управления движением АПР. Так, например, в работе [7] рассматривается задача управления АПР VORTEX с манипулятором PA10 с семью степенями свободы (7-DOF). При этом в работе на основе анализа динамики приводов и сенсоров предложено рассматривать при замкнутом контуре управления состояния АПР VORTEX как медленные переменные, а углы сочленений манипулятора PA10 как быстрые переменные. В этом случае замкнутую систему можно разделить на две подсистемы с помощью приближенных моделей. Одна из них (быстрая подсистема для манипулятора) полностью независима от другой (медленная подсистема АПР), которая в свою очередь получает возмущения со стороны первой. В статье предлагаются два закона управления. Первый является упрощенным законом управления по вычисленным моментам, который требует компенсации для медленной подсистемы (динамика АПР). Второй закон представляет собой нелинейное управление для компенсации возмущений на аппарате, вызванных движением манипулятора, которое не зависит от параметров модели. Доказано, что решения этих приближенных моделей близки к реальным на временном интервале, который при некоторых условиях может быть продлен до бесконечности.

В работе [8] рассматривается задача траекторного управления продольным движением неполноприводного АПР. В предположении, что скорость поступательной динамики АПР намного меньше, чем скорость динамики ориентации, модель движения аппарата представляется в стандартной сингулярно возмущенной форме. На основе этого представления и стандартной методики синтеза на основе теории сингулярных возмущений в работе предложен простой закон управления, который способен стабилизировать АПР на желаемой траектории погружения путем выбора желаемого угла тангажа и соответствующей угловой скорости. В статье также доказывается, что закон управления является робастным при наличии ограниченных возмущений и неопределенностей модели. Основное преимущество предложенного метода заключается в том, что он позволяет снизить сложность синтеза управления и анализа устойчивости.

Аналогичный подход был использован в [9], но для случая управления траекторным движением АПР в трехмерном пространстве. Сначала быстрые движения искусственно вводятся в систему управления с обратной связью путем соответствующего выбора коэффициента усиления. Используя теорию сингулярных возмущений, этот контур рассматривается как быстрый динамический закон управления, предназначенный для формирования пространственной конфигурации быстрой переменной. Затем стабилизирующий регулятор проектируется для редуцированной модели на основе декомпозиции, что приводит к относительно простому закону управления. Здесь же проводился сравнительный анализ с методом бэкстеппинга. Анализ показал, что точность обоих методов практически одинакова, но управляющие входы контроллера на основе сингулярных возмущений более гладкие, чем у контроллера обратного шага. А с точки зрения реализации предлагаемый метод намного проще.

В статье [10] представлены схема управления и анализ устойчивости для системы управления траекторным движением АПР в горизонтальной плоскости. Модель системы приводится в сингулярно возмущенной форме с тройной шкалой времени, что обусловлено различными скоростями изменения переменных состояния. На основе этого используется стандартный подход к декомпозиции всей системы на подсистемы. Структура трехвременной шкалы позволяет проводить анализ динамики в каждой временной шкале независимо. Поэтому стратегии управления разрабатываются в каждой подсистеме отдельно, что приводит к снижению сложности синтеза и относительно простому закону управления.

В [11] также рассматривается задача управления траекторным движением в горизонтальной плоскости АПР, подверженного неизвестным внутренним и внешним возмущениям. Синтез управления построен таким образом, что сначала выводится кинематический закон управления требуемой линейной скоростью и углом рыскания. Затем разрабатывается кинетический закон управления силой тяги и крутящим моментом рыскания, чтобы стабилизировать АПР до желаемой линейной скорости и угла рыскания. Этот закон управления включает в себя две составляющие: подавление помех и стабилизирующий закон управления. Первая реализована на основе расширенного наблюдателя состояния с большим коэффициентом усиления, который используется для оценки неизвестных возмущений. Из-за применения больших коэффициентов усиления в обратной связи в замкнутую систему управления искусственно вводится разделение временной шкалы. Это позволяет применить теорию сингулярных возмущений для анализа устойчивости и синтеза управления отдельно для быстрой и медленной подсистем. Также среди аналогичных работ выделяется [12], где была доказана не только асимптотическая устойчивость системы управления, но и получена оценка области ее существования.

Вышеописанные работы рассматривают детерминированные постановки. В данном же исследовании рассматривается стохастическая задача управления. Аналогично вышеуказанным работам при описании движения используется разделение переменных на медленные и быстрые с соответствующим сингулярно возмущенным представлением модели системы. Таким образом асимптотические методы теории сингулярных возмущений позволяют разделить управление по различным каналам и свести общую задачу синтеза к управлению медленными движениями и стабилизации быстрых движений. При этом в стохастической постановке задачи предполагается, что в быстрых движениях присутствует дискретная по времени последовательность независимых случайных импульсов одинаково распределенных и с нулевым средним каждый. Учитывая еще, что быстрые движения при этом стабилизируются, с большой вероятностью действие шума усредняется и не оказывает существенного влияния на поведение медленных переменных. Но при достаточно длительном наблюдении можно обнаружить такую ситуацию, когда на некотором промежутке значения возмущений не только взаимно не компенсируются, но, напротив, выстраиваются в последовательность, как бы специально нацеленную на формирование явного ухода медленного подвектора от равновесия. Из теории больших уклонений [13] следует, во-первых, что такая траектория единственна и наиболее вероятна из всех, ведущих к определенному критическому событию и, во-вторых, по фазе этого процесса, называемого А-профилем [14, 15], можно судить о близости этого события. Таким образом, использование теории больших уклонений позволяет организовать контроль уклонений объекта от заданной траектории, способный выдавать оценки по вероятности критических значений контролируемых уклонений.

Поскольку АПР должны выполнять действия в соответствии с заданной программой в условиях не всегда прогнозируемой обстановки, то необходимо предусмотреть рабочие инструменты, использование которых совместно с управлением движением и ориентацией АПР требует наряду с механизмами непрерывной локальной стабилизации реализации на верхнем уровне алгоритмов контроля и координирующего управления, как правило, дискретного. Такую двухуровневую схему управления, которую можно назвать супервизорной, в настоящей работе предлагается реализовать с помощью асимптотических методов двух типов: для разделения движений на быстрые и медленные используется аппарат анализа сингулярно возмущенных дифференциальных уравнений, а контроль на верхнем уровне осуществляется на основе принципа больших уклонений. Похожий подход предложен в [16], где авторы представили новую методологию синтеза стохастических систем управления на основе теории больших уклонений и поиске минимального времени выхода траектории управляемого процесса на пороговое значение.

Статья построена следующим образом. Сначала описывается общая сингулярно возмущенная линейно-квадратическая задача терминального управления выходом стохастической системы, решение которой представлено в виде асимптотической композиции терминального регулятора для медленных переменных состояния и стационарного регулятора для быстрых движений. Затем приводятся основные соотношения для построения контроля на основе принципа больших уклонений, расчета А-профиля для системы путей. Предложенный подход к синтезу на основе разделения движений и теории больших уклонений показан на примере подводного аппарата с достаточными средствами регулирования вектора тяги при управлении движением с постоянной скоростью на заданной глубине. Приводятся результаты моделирования и их обсуждение.

Сингулярно возмущенная линейно-квадратическая задача. Здесь рассматривается локальный случай, когда уравнения движения АПР могут быть представлены в линейной форме; более общие уравнения в нелинейной форме рассматриваются ниже.

Предположим, что задана управляемая сингулярно возмущенная система

$$\dot{x} = \tilde{A}x + \tilde{b}u + \tilde{g}v, \quad x(0) = x_0, \quad (1)$$

где вектор состояния x и матрицы имеют блочную структуру:

$$x = \begin{pmatrix} z \\ \xi \end{pmatrix},$$

(тут z, ξ – медленные и быстрые переменные, соответственно)

$$\tilde{b} = \begin{pmatrix} 0 \\ \lambda^{-1}b_1 \end{pmatrix}, \quad \tilde{A} = \begin{pmatrix} J_0 & E_0 \\ 0 & \lambda^{-1}A_1 \end{pmatrix}, \quad \tilde{g} = (g_0^T, g_1^T)^T, \quad b_1 = e_{n_1},$$

e_{ij} – вектор размерности $\mathbf{i}$ (орт), j -ый элемент которого есть единица, а остальные – нули, причем $e_i = e_{ii}$, $J_0 = (0, e_{m1}, \dots, e_{m(m-1)})$, $E_0 = e_m e_{k1}^T$, v_t – стандартный белый шум, а начальное условие x_0 – случайный гауссовский вектор с нулевым средним; на состояниях, управлениях и выходах $y = Hx(t_f)$ необходимо минимизировать критерий (здесь обозначено $x_t = x(t)$ и для простоты управление принято скалярным):

$$\rho_f(\tilde{Q}) = \tilde{\rho}_f = E \left(y^T S_f y + \varepsilon \int_0^{t_f} (x_t^T \tilde{Q} x_t + u_t^2) dt \right), \quad (2)$$

где $\tilde{Q} = \begin{pmatrix} Q_0 & Q_* \\ Q_*^T & Q_1/\varepsilon \end{pmatrix}$, $Q_0 \geq 0$, $S_f > 0$, $\varepsilon = \lambda^2$, причем, будем рассматривать терминальные требования только для медленных переменных: $H = (H_0, 0)$. Наконец, последним условием будет:

У1. $Q_1 = c_1^T c_1$, и тройка (A_1, b_1, c_1) – невырождена.

Решение имеет форму линейной обратной связи $\tilde{D}(t)$ по переменным состояниям: $u(t) = \tilde{D}(t)x(t)$.

Но нас будет интересовать не точное, а приближенное, асимптотическое по λ (субоптимальное) решение.

Приближенное решение задачи (1), (2) представляет собой композицию решений двух следующих укороченных задач.

Во-первых, это терминальная задача на минимум функционала

$$\rho_f = \rho_f(y, \eta) = y^T S_f y + \int_0^{t_f} u_t^2 dt \rightarrow \min_{u_t}, \quad y = H_0 z(t_f), \quad (3)$$

определенного на движениях системы

$$\dot{x}_t = J_0 x_t + B_0 u_t \quad (4)$$

для m -вектора x . Для построения оптимального управления $u_t = d_0(t)x_t$ здесь необходимо решать задачу Коши для матричного дифференциального уравнения

$$\dot{P}_0 = -P_0 J_0 - J_0^T P_0 + P_0 B_0 B_0^T P_0, \quad P_0(t_f) = H_0^T S_f H_0, \quad (5)$$

где $B_0 = -E_0 \bar{A}_1^{-1} b_1$, $\bar{A}_1 = A_1 - b_1 b_1^T P_1$.

Во-вторых, это задача о стационарном регуляторе: управлением $u_t = d_1 x_t$ обеспечить минимум критерию

$$\rho = \int_0^{\infty} (x_t^T Q_1 x_t + u_t^2) dt \quad (6)$$

на решениях системы

$$\dot{x}_t = A_1 x_t + b_1 u_t, \quad (7)$$

которая определена для k -вектора x . В этой задаче управление определяется посредством решения матричного алгебраического уравнения

$$0 = -P_1 A_1 - A_1^T P_1 + P_1 b_1 b_1^T P_1 - Q_1. \quad (8)$$

Теорема 1 [17]. При условии У1 оптимальное решение $\tilde{D}(t)$ задачи (1),(2) представляет собой асимптотическую композицию решений d_0 и d_1 задач (3),(4) и (6),(7) соответственно, что означает существование равномерно по t , $0 \leq t \leq t_1 < t_f$, предела $\lim_{\lambda \rightarrow 0} \tilde{D}(t) = D(t) = (d_0, d_1)$, где $d_0 = d_0(t) = -B_0^T P_0(t)$,

$d_1 = -b_1^T P_1$, матрица $P_0(t)$ является решением задачи Коши (5), а матрица констант P_1 удовлетворяет алгебраическому уравнению Риккати (8), где $\bar{A}_1 = A_1 - b_1 b_1^T P_1$ – гурвицева матрица.

Для матрицы P_0 , зависящей от времени, справедливы соотношения:

$$P_0(t) = W_0^T(t) F_0^{-1}(t) W_0(t), \quad (9)$$

$$W_0(s) = H_0 \begin{pmatrix} 1 & t_f - t & (t_f - t)^2 / 2 & \dots & (t_f - t)^{m-1} / (m-1)! \\ 0 & 1 & t_f - t & \dots & (t_f - t)^{m-2} / (m-2)! \\ 0 & 0 & 1 & \dots & (t_f - t)^{m-3} / (m-3)! \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

В соответствии с приведенными результатами получаем следующий закон управления для терминальной задачи второго порядка

$$u_t = d_0(t) x_t, \quad d_0 = d_0(t) = -e_{22}^T P_0(t), \quad P_0(t) = f(t) \rho^{-1}(t) f(t)^T, \quad (10)$$

$$f(t) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ t_f - t & 1 \end{pmatrix}, \quad \rho = \begin{pmatrix} (t_f - t)^3 / 3 & (t_f - t)^2 / 2 \\ (t_f - t)^2 / 2 & t_f - t \end{pmatrix} + S_f^{-1},$$

а остальные представляют регулятор по быстрым переменным со стационарной обратной связью $d_1 = -b_1^T P_1$.

Замечание 1. Теорема 1 легко расширяется на случай многоканального терминального регулятора, когда вектор медленных переменных $z = \text{col}(z_1, z_2, \dots, z_l)$

является блочным размерности $m = \sum_{i=1}^l m_i$ с m_i -подвекторами z_i . В субоптимальную обратную связь теперь входят l терминальных регуляторов вида (1) (может быть, разной размерности, в зависимости от m_i , $i = 1, 2, \dots, l$).

Замечание 2. Управление ускорением. В контексте предыдущего замечания, в случае $l = 3$, $m_1 = m_2 = m_3 = 2$ получаем три независимых подсистемы второго порядка с элементами состояния, «координата-скорость», и входным сигналом, «ускорение», в трех ортогональных направлениях: продольном, поперечном и вертикальном. Терминальную компоненту в критериях (2), (3) целесообразно использовать посредством конструкций типа (10) для достижения по координатам (наведение) или по координатам и скоростям (приведение) точности, предельно возможной для действующего в системе шума. Аналогичным образом разделить движения на быстрые и медленные можно и в случае нелинейной быстрой подсистемы, если для последней выполняются условия усреднения [13]. Отличие состоит в том, что теперь быстрая подсистема считается возмущенной еще более высокочастотным шумом с периодичностью $\mu = o(\lambda)$ и со свойствами перемешивания, гарантирующими условия усреднения для быстрой ξ -подсистемы. Это, в свою очередь, гарантирует ([13], Гл.7), что с точностью до μ быстрый подвектор ξ оказывается инвариантным к шуму, то есть ξ -подсистема ведет себя как устойчивая и детерминированная. Как следствие этого, опять появляется возможность формировать ускорения на входе медленной подсистемы нужным образом, то есть частные задачи оптимизации для медленных переменных и в такой постановке остаются актуальными.

Замечание 3. Результат, аналогичный теореме 1, может быть получен и для задачи стабилизации как по быстрым, так и по медленным переменным. В этом случае вместо критерия (2) нужно взять

$$\rho = \int_0^{\infty} (x_t^T Q x_t + \varepsilon u_t^T R u_t) dt,$$

где матрица квадратичной формы состояния может быть выбрана блочно-диагональной:

$$Q = \text{diag}(Q_0, Q_1), \quad Q_0 = c_0^T c_0, \quad Q_1 = c_1^T c_1,$$

при соответствующих условиях невырожденности в быстрой и медленной подсистемах, аналогичных условию У1.

Быстрые компоненты, как правило, связаны с задачами локальной стабилизации, в терминах медленных переменных обычно формулируются ограничения и условия на возможные критические состояния (КС) в рассматриваемых режимах движения АПР.

Контроль на основе принципа больших уклонений. Для решения задачи идентификации дефектов в системе (1) рассмотрим вспомогательную задачу оптимального управления для системы

Рассмотрим систему:

$$\dot{\tilde{x}} = a(\tilde{x}) + \varepsilon \sigma \dot{w}, \quad \tilde{x}(t_0) = x_0 \in R^n, \quad (11)$$

где $\dot{w} - k$ -вектор «белого шума», a – гладкая векторная функция, $\varepsilon > 0$ – малый параметр, $\sigma - n \times k$ -матрица. Будем считать, что соответствующая невозмущенная система (получается из (1) при $\varepsilon = 0$):

$$\dot{x} = a(x), \quad (12)$$

имеет единственное решение для каждого x_0 в заданной (и достаточно малой) окрестности ее состояния равновесия x_χ , $a(x_\chi) = 0$.

Вместе с (11) рассмотрим детерминированную систему путей [14, 17]:

$$\dot{\varphi} = a(\varphi) + \sigma v, \quad \varphi(0) = x_0 \in R^n. \quad (13)$$

где v – суммируемая функция, для которой на решениях (3) определен функционал действия [13] (ФД):

$$S_{t_0 t_f}(\varphi, v) = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} v^T v dt, \quad (14)$$

принимая конечные значения для абсолютно непрерывных функций на $[t_0, t_f]$. Введем условие на КС (матрица C полного ранга):

$$C\varphi(t_f) - y = 0 \quad (15)$$

и область D , содержащую все штатные состояния системы (3), то есть состояния до возникновения КС; в частности $x_0 \in D$ и множество путей, выходящих из D в составе функций, непрерывных на отрезке $[t_0, t_f]$, есть:

$$F = \{\varphi \in C_{t_0 t_f}(R^n) : \varphi_\tau \in D, \tau \in [t_0, t_f), \varphi_{t_f} \in R^n \setminus D\}.$$

Тогда в соответствии с принципом больших уклонений [8] справедливо равенство:

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \varepsilon^2 \ln P\{\tilde{x}_t \in R^n \setminus D\} = - \min_{\varphi \in F} S_{t_0 t_f}(\varphi, v), \quad (16)$$

где функционал $S_{t_0 t_f} = S_{t_0 t_f}(\varphi, t)$ определен в соответствии с (14) на решениях управляемой системы (13). Задачу оптимального управления (13)-(15) будем именовать задачей Лагранжа-Понтрягина (ЛП), а ее решения (экстремали ФД) – профилями КС. По ФД определяется квазипотенциал [13] системы путей – функция точки x и состояния равновесия χ :

$$V(\chi, x) = \inf \{ S_{t_0 t_f}(\varphi) : \varphi \in C_{t_0 t_f}(R^n), \varphi_{t_0} = \chi, \varphi_{t_f} = x \}.$$

Соответствующую экстремаль $\tilde{\varphi}(t)$, удовлетворяющую (13) и ведущую из состояния устойчивого равновесия (аттрактора) χ , будем называть предельным или *A-профилем* состояния x [14, 15].

Вычисление A-профиля для линейных систем. Для нас будет важен линейный случай задачи ЛП (13)-(15), который определяется следующими уравнениями для прямых и сопряженных переменных, а также для оптимального управления:

$$\dot{\varphi}_t = A\varphi_t + \sigma v_t, \quad C\varphi(t_f) = y, \quad (17)$$

$$\dot{\psi}_t = -A^T \psi_t, \quad \psi(t_f) = \psi_f, \quad (18)$$

$$v_t = \tilde{v}_t = \sigma^T \psi_t. \quad (19)$$

Подставляя решение начальной задачи (18) в (19) и (17), получим систему:

$$\dot{\varphi}_t = A\varphi_t + \sigma \sigma^T e^{A^T(t_f-t)} \psi_f, \quad C\varphi(t_f) = y,$$

решение которой $\varphi(t)$, в свою очередь, определяет профиль КС: $x_f = \varphi(t_f)$

$$\varphi(t) = e^{A(t-t_f)} x_f + J(t) \psi_f, \quad (20)$$

где $J(t)$ – грамиан управляемости:

$$J(t) = \int_{t_f}^t e^{A(t-\tau)} \sigma \sigma^T e^{A^T(t_f-\tau)} d\tau. \quad (21)$$

В предположении гурвицевости матрицы A , что эквивалентно существованию единственного положительно определенного решения D уравнения Ляпунова:

$$\sigma\sigma^T = -AD - DA^T,$$

грамиан управляемости (44) выражается через D :

$$J(t) = D e^{A^T(t_f-t)} - e^{A(t-t_f)} D. \quad (22)$$

Подставляя (22) в (20), получим следующее выражение для решения:

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= e^{A(t-t_f)} x_f + (D e^{A^T(t_f-t)} - e^{A(t-t_f)} D) \psi_f = \\ &= e^{A(t-t_f)} (x_f - D \psi_f) + D e^{A^T(t_f-t)} \psi_f. \end{aligned} \quad (23)$$

Потребуем в (23):

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \varphi(t) = \chi = 0. \quad (24)$$

Это будет выполнено, если и только если:

$$x_f - D \psi_f = 0. \quad (25)$$

Разрешая (25) относительно сопряженных переменных, и подставляя в (23), получаем соотношение для вычисления А-профиля:

$$\tilde{\varphi}(t) = D e^{A^T(t_f-t)} D^{-1} x_f. \quad (26)$$

Так же просто выражается через D квазипотенциал устойчивой системы (17):

$$V(0, x) = \frac{1}{2} x^T D^{-1} x. \quad (27)$$

В соответствии с принципом Лагранжа [17], в составе необходимых условий экстремума имеем задачу минимизации $V(0, x_f)$ при ограничении (15). Записывая лагранжиан для этой задачи (здесь $x = x_f$):

$$L = \frac{1}{2} x^T D^{-1} x + \mu^T (Cx - y),$$

и условие стационарности: $L_x = D^{-1} x + C^T \mu = 0$, имеем отсюда и из (48):

$$x = D C^T \mu, \quad (28)$$

$$y = C D C^T \mu.$$

В последнем равенстве $C D C^T > 0$, так как, по предположению, C – матрица полного ранга, поэтому для μ имеем: $\mu = (C D C^T)^{-1} y$. Подставляя это в (28), а затем в (26), приходим к выражению для А-профиля:

$$\tilde{\varphi}(t) = D e^{A^T(t_f-t)} C^T (C D C^T)^{-1} y. \quad (29)$$

Применение принципа больших уклонений в синтезе управления АПР. В синтезе мы опираемся на теорему 1 (с учетом замечаний) и на метод усреднения [17], на основе которого создается быстрый контур, формирующий заданные ускорения для медленных переменных. Поскольку применяемый подход обеспечивает взаимную независимость каналов в медленной подсистеме, появляется возможность реализации процедуры управления на основе повторения однотипных операций, которые представлены на рис. 1.

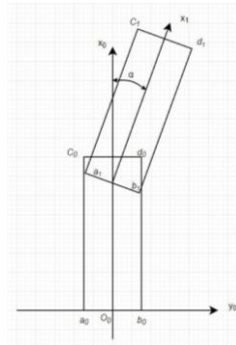


Рис. 1. К описанию пошаговой процедуры управления

Пусть, для определенности, необходимо осуществить движение АПР в горизонтальной плоскости вдоль линии $O_0O_1x_1$: начав движение из точки O_0 в системе координат $O_0x_0y_0$ вдоль O_0x_0 -оси (задачи 0) и дойдя до точки O_1 , продолжить движение уже в системе координат $O_1x_1y_1$ вдоль O_1x_1 -оси (задачи 1) и так далее. В этой схеме барьеры $O_0a_0 = O_0b_0 = y_0$, $O_1a_1 = O_1b_1 = y_1$ задают ограничения, в рамках которых должно осуществляться движение, то есть условие (15) для задач в системах координат $O_0x_0y_0$, $O_1x_1y_1$ выглядят так (соответственно):

$$C\varphi(t_f) \pm y_0 = 0, \quad C\varphi(t_f) \pm y_1 = 0. \quad (30)$$

А-профили для каждой из задач легко вычисляются по формуле (29), где $A = J_0 + B_0d_1$, $C = (1 \ 0)$, а $y = y_0$ или $y = -y_0$ для первой пары задач (задачи 0) и $y = y_1$ или $y = -y_1$ для второй пары (задачи 1).

Здесь остановимся только на проблеме, связанной с переключением с задач 0 на задачи 1. При этом переходе в окрестности точки O_1 (и в последующих аналогичных) АПР имеет дополнительную компоненту скорости на левый или правый борт в зависимости от знака угла α : в случае рис. 1 это будет смещение на левый борт. В связи с этим, нужно оценить влияние начального условия на процесс контроля критического выхода АПР на ограничение. Покажем здесь, что соседние экстремали (профили), не удовлетворяющие условию (25), экспоненциально близки с А-профилем.

Пусть в (50) $x_f - D\psi_f = \gamma_f \neq 0$, $\psi_f = \tilde{\psi}_f + \Delta\psi_f$, тогда $\psi_f = \tilde{\psi}_f + \Delta\psi_f$,

$$\varphi(t) = \tilde{\varphi}(t) + J(t)\Delta\psi_f, \quad (31)$$

где $\Delta\psi_f = -D^{-1}\gamma_f$, а функция $\tilde{\varphi}(t)$ удовлетворяет (29). В обозначениях $x_0 = \varphi_0 = \varphi(t_0)$, $\tilde{\varphi}_0 = \tilde{\varphi}(t_0)$, $J_0 = J(t_0)$, из (31) получаем:

$$\Delta\psi_f = J_0^{-1}(x_0 - \tilde{\varphi}_0), \quad (32)$$

где невырожденность грамиана следует из управляемости.

Итак, (21), (22) позволяет вычислить профиль, исходящий из точки (t_0, x_0) :

$$\varphi(t) = \tilde{\varphi}(t) + J(t) J_0^{-1}(x_0 - \tilde{\varphi}_0). \quad (33)$$

Сравним по значениям ФД конечные и предельные профили, для чего обозначим: $S_{0f} = S_{t_0 t_f}(\varphi, \nu)$ и $\tilde{S}_{0f} = S_{t_0 t_f}(\tilde{\varphi}, \nu)$. Из (14), (19) имеем:

$$S_{0f} = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} \psi_f^T e^{A(t_f - \tau)} \sigma \sigma^T e^{A^T(t_f - \tau)} d\tau \psi_f = -\frac{1}{2} \psi_f^T I_{0f} \psi_f,$$

где $I_{0f} = \int_{t_0}^{t_f} e^{A(t_f - \tau)} \sigma \sigma^T e^{A^T(t_f - \tau)} d\tau = e^{A(t_f - t_0)} J(t_0)$, откуда получаем:

$$S_{0f} = -\frac{1}{2} \psi_f^T e^{A(t_f - t_0)} J(t_0) \psi_f. \quad (34)$$

Выражение для $\tilde{S}_{0f}$ получается из (34) при дополнительном условии $\psi_f = \tilde{\psi}_f$, то есть при $\Delta\psi_f = 0$ и использовании соотношения (25); в результате имеем:

$$\tilde{S}_{0f} = V(0, x_f) - V(0, \tilde{\varphi}(t_0)). \quad (35)$$

Полагая $P_{t_0 t_f} = P\{\tilde{x}_{t_0} = \tilde{\varphi}(t_0) \in D; \tilde{x}_{t_f} \in R^n \setminus D\}$, при $t_0 = t$ из (16) получаем

$$\varepsilon^2 \ln P_{t t_f} \approx -\tilde{S}_{t t_f} = -\min_{\varphi \in F} S_{t t_f}(\varphi, \nu). \quad (36)$$

Вернемся к (33), имея в виду возможность аппроксимации профилей в случае долговременного прогноза, то есть при больших значениях $t_f - t_0$: функции $\tilde{\varphi}(t)$ и $\varphi(t)$ на отрезке $[t_0, t_f]$ – это два решения для уравнения (17) при разных начальных условиях в момент t_0 , причем матрица A в этом уравнении по предположению – гурвицева. В силу этого, разность $\varphi(t) - \tilde{\varphi}(t)$ удовлетворяет однородному уравнению $\dot{z}_t = A z_t$ и, следовательно, для любого t : $\varphi(t) - \tilde{\varphi}(t) \rightarrow 0$ при $t_0 \rightarrow -\infty$.

Далее представлены результаты вычислений профилей и А-профилей и соответствующие им $\tilde{S}_{t t_f}, S_{t t_f}$ в функции времени.

Обозначим здесь: $\tilde{S}_{\varphi_0} = \tilde{S}_{t_0 t_f}(\varphi_0) = \min_{\varphi \in F, \varphi(t_0) = \varphi_0} S_{t_0 t_f}(\varphi, \nu)$ для $\varphi_0 \in D$, значения ФД на А-профиле в этот же момент t_0 обозначим $\tilde{S}$.

Результаты моделирования для АПР. В настоящее время модели АПР, как и других морских объектов, принято представлять в стандартном формате, как в [18–20]. В качестве примера здесь рассматривается АПР Ictineu [20], которая является базовой для проекта Ictineu (Falcon). Вектор состояния модели составляют: $\eta = (x \ y \ \psi)^T$ – подвектор положения и ориентации, включающий координаты положения на горизонтальной плоскости и угол ψ направления движения (рыскания); $\nu = (u \ v \ r)^T$ – подвектор скоростей продольной и боковой, а также рыскания (соответственно). Исходные уравнения для η и ν

$$\begin{aligned} \dot{\eta} &= R(\psi) \nu, \\ M \dot{\nu} &= -C(\nu) \nu - D(\nu) \nu + \tau, \end{aligned} \quad (37)$$

где $M = \text{diag}(M_{\dot{u}}, M_{\dot{v}}, M_{\dot{r}})$, $M_{\dot{u}} = m - X_{\dot{u}}$, $M_{\dot{v}} = m - Y_{\dot{v}}$, $M_{\dot{r}} = I_z - N_{\dot{r}}$; $D(\nu) = \text{diag}(X_u + D_u |u|, Y_v + D_v |v|, N_r + D_r |r|)$, X_u, Y_v, N_r – коэффициенты линейного сопротивления, D_u, D_v, D_r – квадратичные коэффициенты сопротивления;

$$R(\psi) = \begin{pmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad C(v) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -M_{\dot{v}}v \\ 0 & 0 & M_{\dot{u}}u \\ M_{\dot{v}}v & -M_{\dot{u}}u & 0 \end{pmatrix}. \quad (38)$$

В АПР Ictineu средства управляемости: это четыре двигателя с усилиями $u = (u_1, u_2, u_3, u_4)^T$; распределение их интегрированной тяги τ в (37) по трем направлениям описывается (3×4) -матричным коэффициентом B полного ранга:

$$\tau = Bu.$$

Также, как выше, здесь мы разделяем вектор состояния на медленные и быстрые компоненты, только в рамках теории усреднения (замечание 2).

Замечание 4. Поскольку матрица B имеет полный ранг, достаточно считать управлением в (37) вектор сил и момента $\tau = (F_u, F_v, F_r)^T$ или соответствующих ускорений. Предполагая малость углов рыскания (α в дальнейшем и дифферента), мы ограничиваемся здесь синтезом алгоритмов на базе ускорений в связанных осях.

В рамках гипотезы усреднения синтез для быстрых и медленных переменных также производится отдельно. Для медленной подсистемы это та же задача (3)-(5) с учетом замечания 3, которое в рамках задачи стабилизации приводит к добавлению постоянной матрицы Q_0 в правую часть уравнения (5) и обнулению производной в левой его части, то есть к трансформации матричного дифференциального уравнения в алгебраическое. Что касается быстрой подсистемы, то в рамках используемой модели с сильными условиями управляемости удастся обеспечить требуемые свойства устойчивости более простыми средствами. Управления в (37), с учетом замечания 4, будем формировать по правилу:

$$\tau = (F_u, F_v, F_r)^T = (A_{xd} - A_x, A_{yd} - A_y, A_{\psi d} - A_{\psi})^T / \lambda, \quad (35)$$

где $\lambda > 0$, как и выше, достаточно малый параметр, а $A_{xd}, A_{yd}, A_{\psi d}$ – входы (ускорения) для соответствующих медленных подсистем.

При этом, в качестве системы (17) использовался фильтр Баттерворта второго порядка (относительное затухание $\xi = 1/\sqrt{2} \approx 0.707$) на отрезке $[t_0, t_f] = [0, 10c.]$. Осциллограммы приведены на рис. 2-4. На рис. 2 пунктирной линией обозначен А-профиль критического состояния $(10 \ 0)^T \tilde{\varphi}(t)$, точнее, его конечный отрезок протяженностью $10c.$, а сплошной – профиль, исходящий из начальной точки $\varphi_0 = \varphi(0) = (-0.4 \ 0)^T$, тогда как $\tilde{\varphi}_0 = \tilde{\varphi}(0) = (-0.00064 \ 0)^T$: после 2-ой секунды кривые на рисунке практически сливаются. По значениям ФД процесс выглядит так: $\tilde{S} = 400.0$, $\tilde{S}_{\varphi_0} = 399.998$. Небольшое улучшение критерия $\tilde{S}_{\varphi_0}$ по сравнению с $\tilde{S}$ связано с тем, что при $\xi < 1$ система является осциллятором и начальное условие φ_0 действует синфазно с $\tilde{\varphi}(t)$. В этом можно убедиться, уменьшив относительное затухание.

Такие осциллограммы профилей с выраженной колебательностью ($\xi \approx 0.07$) приведены на рис. 3: штриховая кривая соответствует А-профилю, т.е. $\tilde{S} = 34.509$, на рис. 3,а сплошная кривая – профиль, исходящий из начальной точки $(-0.4 \ 10)^T$ с $\tilde{S}_0 = 25.55$, соответствующий движению в фазе с А-профилем; на рис. 3,б тонкая кривая – профиль, исходящий из начальной точки $(-0.4 \ -7)^T$ с $\tilde{S}_0 = 65.1$,

соответствующий движению в противофазе с А-профилем, ниже оранжевым цветом представлена как монотонная функция t кривая оптимального действия $\tilde{S}_{t t_f}$ между точками t и t_f , вычисляемого согласно (35) как разность соответствующих квазипотенциалов $\tilde{S}_{t t_f} = V(0, x_f) - V(0, \tilde{\varphi}(t))$ и, согласно (36), дающего оценку $-\ln P_{t t_f}$, то есть оценку в момент t вероятности наступления события (15) (или какого-то из (30)) через $t_f - t$ единиц времени.

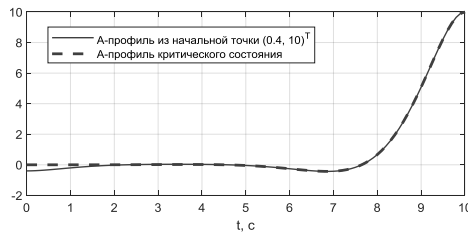


Рис. 2. Осциллограммы профилей для фильтра Баттерворта второго порядка

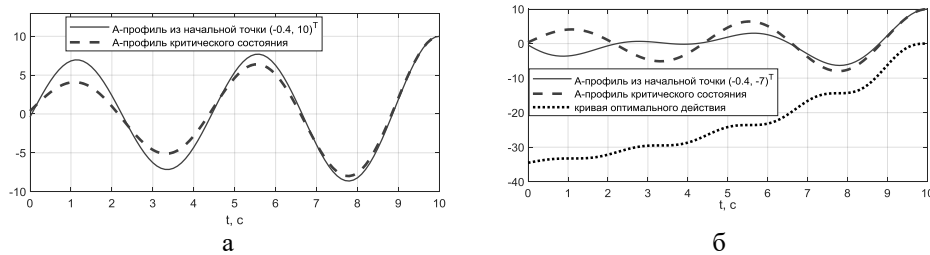


Рис. 3. Осциллограммы профилей для осциллятора с $\xi = 0.1/\sqrt{2}$

Отсюда вывод: когда все штатно и достигается управление в режиме фильтра Баттерворта второго порядка или с еще большим ξ можно не беспокоиться о нарушении барьерных ограничений в точке перехода от одного отрезка траектории к другому (точка O_1 на рис. 1), если же по тем или иным причинам управление идентифицируется как весьма колебательное (ориентировочно: $0 < \xi < 1/2$), стоит обратиться к выбору момента перехода с одного сегмента на другой так, чтобы он соответствовал движению в противофазе с А-профилем, идентифицированным в левой полукрестности O_1 .

Наконец, проанализируем способность системы выполнять маневр, который задан изначально как базовый. Результаты моделирования представлены на рис. 4,а — реальное осуществление траектории в (x, y) — плоскости, далее приведены осциллограммы компонентов состояния в функции времени, где сплошная линия соответствует каналу продольного движения, штриховая — боковому каналу, а пунктирная — рысканию, причем на панели (б) изображены скорости, а на (в) — ускорения. По штриховой кривой на (б) видно, что после излома траектории в боковом канале реализуется динамика фильтра Баттерворта второго порядка.

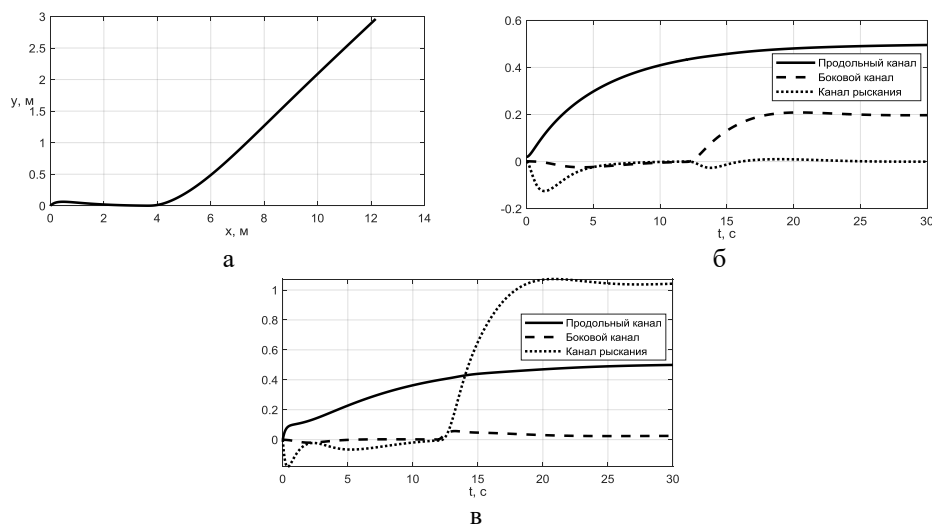


Рис. 4. Траектория и осциллограммы для базовой модели АПП Ictineu

Заключение. В задачах синтеза и алгоритмизации бортовых систем АПП, которые объективно должны функционировать в условиях неопределенности, асимптотические методы могут сыграть конструктивную роль. В настоящей работе предлагается в локальном смысле, используя методы сингулярных возмущений и усреднения, осуществлять стабилизацию прямолинейных участков траектории, а на глобальном уровне, контролируя выполнение общей задачи, с помощью принципа больших уклонений реализовывать, по необходимости, переключения на другие лучи. Здесь наш интерес был связан с такими переключениями, которые отвечают на возмущения со стороны внешней среды, но аналогичная техника может быть использована в задачах, где сам объект (АПП) оказывается источником возмущений в связи с необходимостью выполнения рабочей миссии.

Результаты моделирования подтверждают работоспособность предложенного подхода и показывают, что удастся получить близкий к оптимальному вариант назначения БЛА на области сканирования с точки зрения минимизации суммарных временных затрат и обеспечения безопасности перемещения БЛА группы к полосам сканирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Li D., Du L. AUV Trajectory Tracking Models and Control Strategies: A Review // JMSE. – 2021. – Vol. 9 (9). – P. 1020.
2. Zhao R., Xu J., Xiang X., Xu G. A review of path planning and cooperative control for MAUV systems // Chin. J. Ship Res. – 2018. – Vol. 13. – P. 58-65.
3. Tijjani A.S., Chemori A., Creuze V. A survey on tracking control of unmanned underwater vehicles: Experiments-based approach // Annual Reviews in Control. – 2022. – Vol. 54. – P. 125-147.
4. Kokotovic P.V., Khalil H.K., O'Reilly J. Singular perturbation methods in control: analysis and design. – Orlando: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1999. – 387 p.
5. Khalil H.K. Nonlinear systems. New Jersey: Prentice Hall. – 3rd ed., 2002. – 750 p.
6. Дмитриев М.Г., Курина Г.А. Сингулярные возмущения в задачах управления // Автоматика и телемеханика. – 2006. – № 1. – С. 3-51.
7. Canudas de Wit C., Olguin Diaz O., Perrier M. Nonlinear control of an underwater vehicle/manipulator with composite dynamics // IEEE Trans. Contr. Syst. Technol. – 2000. – Vol. 8 (6). – P. 948-960.

8. *Lei M.* Nonlinear diving stability and control for an AUV via singular perturbation // *Ocean Engineering*. – 2020. – Vol. 197. – P. 106824.
9. *Lei M., Li Y., Pang S.* Robust singular perturbation control for 3D path following of underactuated AUVs // *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. – 2021. – Vol. 13. – P. 758-771.
10. *Lei M., Li Y.* Model-Based Control and Stability Analysis of Underactuated Autonomous Underwater Vehicles Via Singular Perturbations // *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*. – 2020. – Vol. 15 (6). – P. 061006.
11. *Lei M., Li Y., Pang S.* Extended state observer-based composite-system control for trajectory tracking of underactuated AUVs // *Applied Ocean Research*. – 2021. – Vol. 112. – P. 102694.
12. *Minowa A., Toda M.* Stability analyses on a towed underwater vehicle motion control system using a high-gain observer // *Adv Control Appl.* – 2021. – Vol. 3 (3). – P. 3:e77.
13. *Freidlin M.I., Wentzell A.D.* Random Perturbations of Dynamical Systems. – 3rd ed. – New York: Springer-Verlag, 2012. – 460 p.
14. *Дубовик С.А.* Асимптотическая семантизация данных в системах управления // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2019. – Вып. 20 (8). – С. 461-471.
15. *Kabanov A.A., Dubovik S.A.* Methods of modeling and probabilistic analysis of large deviations of dynamic systems // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2020. – Vol. 1661 (1). – P. 012044.
16. *Schmid M., Crassidis J.L.* A New Stochastic Control Paradigm Employing Large Deviations Theory // *AIAA Scitech 2019 Forum*. – San Diego, California, Jan, 2019. – P. 1-29.
17. *Дубовик С.А., Кабанов А.А.* Функционально устойчивые системы управления: асимптотические методы синтеза. – М.: ИНФРА-М, 2019. – 249 с.
18. *Do K., Pan, J.* Control of Ships and Underwater Vehicles: Design for Underactuated and Nonlinear Marine Systems. – London: Springer-Verlag, 2009. – 401 p.
19. *Liceaga-Castro E., van der Molen G.M.* Submarine H/sup ∞ / depth control under wave disturbances // *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.* – 1995. – Vol. 3 (3). – P. 338-346.
20. *Shen C.* Motion Control of Autonomous Underwater Vehicles Using Advanced Model Predictive Control Strategy. A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of PhD. Victoria, BC, Canada: University of Victoria, 2018.

REFERENCES

1. *Li D., Du L.* AUV Trajectory Tracking Models and Control Strategies: A Review, *JMSE*, 2021, Vol. 9 (9), pp. 1020.
2. *Zhao R., Xu J., Xiang X., Xu G.* A review of path planning and cooperative control for MAUV systems, *Chin. J. Ship Res.*, 2018, Vol. 13, pp. 58-65.
3. *Tijjani A.S., Chemori A., Creuze V.* A survey on tracking control of unmanned underwater vehicles: Experiments-based approach, *Annual Reviews in Control*, 2022, Vol. 54, pp. 125-147.
4. *Kokotovic P.V., Khalil H.K., O'Reilly J.* Singular perturbation methods in control: analysis and design. Orlando: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1999, 387 p.
5. *Khalil H.K.* Nonlinear systems. New Jersey: Prentice Hall. 3rd ed., 2002, 750 p.
6. *Dmitriev M.G., Kurina G.A.* Singulyarnye vozmushcheniya v zadachakh upravleniya [Singular perturbations in control problems], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and telemekhanika], 2006, No. 1, pp. 3-51.
7. *Canudas de Wit C., Olguin Diaz O., Perrier M.* Nonlinear control of an underwater vehicle/manipulator with composite dynamics, *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.*, 2000, Vol. 8 (6), pp. 948-960.
8. *Lei M.* Nonlinear diving stability and control for an AUV via singular perturbation, *Ocean Engineering*, 2020, Vol. 197, pp. 106824.
9. *Lei M., Li Y., Pang S.* Robust singular perturbation control for 3D path following of underactuated AUVs, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2021, Vol. 13, pp. 758-771.
10. *Lei M., Li Y.* Model-Based Control and Stability Analysis of Underactuated Autonomous Underwater Vehicles Via Singular Perturbations, *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 2020, Vol. 15 (6), pp. 061006.
11. *Lei M., Li Y., Pang S.* Extended state observer-based composite-system control for trajectory tracking of underactuated AUVs, *Applied Ocean Research*, 2021, Vol. 112, pp. 102694.

12. Minowa A., Toda M. Stability analyses on a towed underwater vehicle motion control system using a high-gain observer, *Adv Control Appl.*, 2021, Vol. 3 (3), 3:e77.
13. Freidlin M.I., Wentzell A.D. Random Perturbations of Dynamical Systems. 3rd ed. New York: Springer-Verlag, 2012, 460 p.
14. Dubovik S.A. Asimptoticheskaya semantizatsiya dannykh v sistemakh upravleniya [Asymptotic Semantization of Data in Control Systems], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2019, Issue 20 (8), pp. 461-471.
15. Kabanov A.A., Dubovik S.A. Methods of modeling and probabilistic analysis of large deviations of dynamic systems, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2020, Vol. 1661 (1), pp. 012044.
16. Schmid M., Crassidis J.L. A New Stochastic Control Paradigm Employing Large Deviations Theory, *AIAA Scitech 2019 Forum*. San Diego, California, Jan, 2019, pp. 1-29.
17. Dubovik S.A., Kabanov A.A. Funktsional'no ustoychivye sistemy upravleniya: asimptoticheskie metody sinteza [Functionally stable control systems: asymptotic methods of synthesis]. Moscow: INFRA-M, 2019, 249 p.
18. Do K., Pan, J. Control of Ships and Underwater Vehicles: Design for Underactuated and Non-linear Marine Systems. London: Springer-Verlag, 2009, 401 p.
19. Liceaga-Castro E., van der Molen G.M. Submarine H/sup ∞ / depth control under wave disturbances, *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.*, 1995, Vol. 3 (3), pp. 338-346.
20. Shen C. Motion Control of Autonomous Underwater Vehicles Using Advanced Model Predictive Control Strategy. A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of PhD. Victoria, BC, Canada: University of Victoria, 2018.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.А. Крамарь.

Дубовик Сергей Андреевич – Севастопольский государственный университет; e-mail: duboviksa@gmail.com; г. Севастополь, Россия; тел.: +79787622582; д.т.н.; профессор.

Кабанов Алексей Александрович – Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской Академии Наук; e-mail: kabanovaleksey@gmail.com; г. Москва, Россия; тел.: +79787622582; Севастопольский государственный университет; зав. кафедрой; к.т.н.; доцент.

Dubovik Sergey Andreevich – Sevastopol State University; e-mail: duboviksa@gmail.com; Sevastopol, Russia; phone: +79787927340; dr. of eng. sc; professor.

Kabanov Aleksei Alexandrovich – Federal Research Center "Informatics and control" of the Russian Academy of Sciences; e-mail: kabanovaleksey@gmail.com; Moscow, Russia; phone: +79787622582; Sevastopol State University; head of the department; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 007.52:004.896

DOI 10.18522/2311-3103-2023-1-170-184

И.В. Бычков, А.В. Давыдов, М.Ю. Кензин, Н.В. Нагул, А.А. Толстихин

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ СТРАТЕГИЙ И УПРАВЛЕНИЕ ГРУППОЙ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ В УСЛОВИЯХ НЕПОЛНОТЫ ИНФОРМАЦИИ*

Рассматриваются различные задачи планирования стратегий и управления группой мобильных роботов в сложных динамических условиях при неполной информации о внешней среде. Представлены подходы к решению задач составления эффективного рабочего расписания в условиях непостоянного состава действующей группы, поиска источника нестационарного поля концентрации, супервизорного управления дискретно-событийными системами. Для задачи составления верхнеуровневого расписания групповой работы разработана оригинальная

* Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ, проект №121032400051-9.

математическая модель, сформулированная в терминах задач планирования рабочих смен, а также проблемно-ориентированная модификация эволюционных алгоритмов со специализированным набором эвристик для ее эффективного решения. Поиск и мониторинг источника нестационарного поля концентрации осуществляется с помощью децентрализованной мультиагентной стратегии управления, объединяющей элементы бионических и градиентных подходов, а также метода генерации искусственных потенциальных полей. Рассмотренная стратегия управления обладает низкой вычислительной сложностью, высокой вариативностью по отношению к типам обследуемых полей и легко масштабируется для управления любым достаточным количеством мобильных роботов. Последнее имеет особое значение, в частности, при рассмотрении задачи параллельного и независимого мониторинга нескольких источников. Для решения различных задач теории супервизорного управления дискретно-событийными системами, используемыми на различных уровнях иерархической системы управления робототехническими комплексами, предложено использовать средства логического вывода, а именно, автоматическое доказательство теорем в исчислении позитивно-образованных формул. Особенности исчисления позволяют эффективно решать сложные задачи управления динамическими системами, а также осуществлять обработку и контроль событий на основе данных об окружающей среде в режиме реального времени в процессе логического вывода. Основанный на позитивно-образованных формулах подход позволяет исследовать свойства дискретно-событийных систем в автоматной форме, синтезировать и моделировать конечные автоматы для построения и реализации монолитных и модульных супервизоров. Предложена общая схема, объединяющая рассмотренные подходы к управлению группой мобильных роботов на различных уровнях и масштабах времени в рамках единой иерархической системы управления.

Децентрализованные стратегии управления; позитивно-образованная формула; логический вывод; дискретно-событийная система; супервизорное управление; обследование поля концентрации; задача составления расписания; эволюционные алгоритмы.

I.V. Bychkov, A.V. Davydov, M.Yu. Kenzin, N.V. Nagul, A.A. Tolstikhin

INTELLIGENT STRATEGY PLANNING AND CONTROL OF A GROUP OF MOBILE ROBOTS UNDER CONDITIONS OF INCOMPLETE INFORMATION

Different problems of strategy planning and control of a mobile robot group under complex dynamic conditions with incomplete information about the external environment are considered. Approaches to solving problems of effective work scheduling under conditions of inconstant active group composition, searching for the source of a nonstationary concentration field, supervisory control of discrete-event systems are presented. An original mathematical model formulated in terms of work-shift scheduling problems and a problem-oriented modification of evolutionary algorithms with a specialized set of heuristics for its efficient solution are developed for the problem of scheduling top-level group work. Searching and monitoring the source of the nonstationary concentration field is carried out using a decentralized multi-agent control strategy that combines elements of bionic and gradient approaches, as well as a method for generating artificial potential fields. The considered control strategy has low computational complexity, high variability with respect to the types of fields surveyed, and is easily scalable to control any available number of mobile robots. The latter is of special importance, in particular when considering the problem of parallel and independent monitoring of multiple sources. It is proposed to use the means of logical inference, namely automatic theorem proving in the calculus of positively constructed formulas, to solve various problems of the supervised control theory of discrete-event systems used at different levels of the robotic complex hierarchical control system. Features of the calculus allows solving complex problems of dynamic systems control, as well as processing and controlling events based on environmental data in real time in the process of logical inference efficiently. The approach based on positively constructed formulas allows studying the properties of automata-based discrete-event systems, as well as to synthesize and model finite automata for the construction and realization of monolithic and modular supervisors. A general scheme combining the considered approaches for controlling a group of mobile robots at different levels and time scales within a single hierarchical control system is proposed.

Decentralized control strategy; concentration field survey; scheduling problem; evolutionary algorithm; discrete-event system; supervisory control; positively constructed formula; logical inference.

Введение. Робототехнические комплексы на базе нескольких автономных мобильных роботов (АМР) все чаще находят применение в различных сферах человеческой деятельности, включая разведывательные, спасательные и поисково-исследовательские миссии. Однако, сложности выработки совместных стратегий и неспособность оперативно вырабатывать согласованные решения не позволяют рассматривать их в качестве удобного и гибкого инструмента для выполнения широкого спектра работ. В статье рассматриваются проблемы планирования и интеллектуального принятия решений группой из нескольких АМР в сложных заранее неизвестных средах: задача планирования эффективного рабочего расписания в условиях непостоянного состава действующей группы АМР, задача обследования поля концентрации с целью определения его параметров, а также оригинальный подход к анализу и синтезу управляемых логических дискретно-событийных систем (ДСС), применяемых на нижних уровнях реализации процесса принятия совместных решений.

В общем случае, целью робототехнических операций является посещение группой роботов набора ключевых локаций с целью проведения там работ в соответствии с заданными требованиями [1]. Сопутствующую задачу распределения заданий и ресурсов принято формулировать в терминах задач групповой маршрутизации. В реальных условиях такая модель будет включать сложный набор взаимосвязанных пространственно-временных и технических ограничений, что делает невозможным ее решение в явном виде и за разумное время [2]. В этом контексте, наиболее “проблемными” принято считать энергетические (топливные) и коммуникационные требования.

Большинство представленных в литературе подходов, как правило, инкорпорирует эти ограничения сразу в многоатрибутную модель задачи маршрутизации, что приводит к значительным потерям в скорости решения, а также к необходимости разработки дополнительных проблемно-ориентированных схем оптимизации [3]. Более того, согласно [4], лишь малое количество работ рассматривает эти ограничения в рамках моделей с функционально и параметрически разнородными группами роботов. В качестве альтернативного подхода можно назвать различные гарантирующие методы, обеспечивающие строгое выполнение данных ограничений на основе геометрических или графо-теоретических моделей (построение цепочек роботов, удержание формаций и др.) [5]. Основным недостатком таких методов является их низкая эффективность в нестандартных ситуациях, а также тот факт, что они заметно ограничивают групповое движение из-за жесткого требования связности всей сети роботов [6].

В то же время, на практике чаще всего применяется децентрализованный подход, когда АМР принимают большинство решений самостоятельно на основе правил и в зависимости от своего текущего состояния, а распределение общих ресурсов осуществляется путем локальных переговоров [7]. Основным недостатком подхода заключается в том, что он обращает внимание только на состояние конкретного робота и игнорирует как текущее, так и прогнозируемое состояние всей группы, жертвуя эффективностью работы в пользу отказоустойчивости, общей надежности и простоты. Таким образом, сохраняется потребность в разработке гибкого и универсального интеллектуального подхода, лишенного ключевых недостатков перечисленных методов, который обеспечивал бы эффективную организацию и координацию работы разнородной группы АМР в динамических условиях [8].

Другой важной задачей, связанной с использованием робототехнических комплексов, является обследование нестационарных полей концентрации [9]. Данный термин описывает широкий спектр объектов, явлений и процессов, частными примерами которых могут служить термическое поле, образованное одним или

несколькими подводными термальными источниками, поле солёности или распространение некоторого биологического вида по ограниченной области. Выделяют три основных постановки задачи обследования подобных полей: поиск источника [10], восстановление заданной линии уровня поля [11] и его картографирование [12]. Несмотря на то, что данные постановки имеют свои фундаментальные и прикладные приложения, задача локализации и мониторинга источников поля концентрации обладает в настоящее время наибольшей актуальностью. Одним из основных подходов к решению данной задачи является галсовый поиск [13], обладающий рядом недостатков, главным из которых является низкая результативность при обследовании нестационарных полей. Это приводит к необходимости разработки новых мультиагентных стратегий поиска источников полей концентрации, например, основывающихся на градиентных [14] или биологических [15] подходах, а также их гибридах.

Удобным формализмом, позволяющим описывать изменение состояния системы вследствие наступления некоторых событий, является формализм дискретно-событийных систем [16], в частности, логических ДСС, когда время наступления событий может не учитываться. Для ограничения функционирования логических ДСС в настоящее время активно применяется теория супервизорного управления (ТСУ) [17], позволяющая управлять поведением системы в заданных рамках. Для интеллектуализации процесса решения задач ТСУ предлагается подход, основанный на автоматическом доказательстве теорем (АДТ) в исчислении позитивно-образованных формул (ПОФ). АДТ является активно развивающейся областью искусственного интеллекта, основанной на методах математической логики, что делает его наиболее формализованным направлением дедуктивного построения и автоматизированного вывода. Исчисление ПОФ введено в [18, 19] и разработано как полный метод для АДТ с функциональными символами в [20] и [21]. Его основные приложения лежат в области управления динамическими и интеллектуальными системами, и включают ориентацию телескопа [19], групповое управление рулями высоты, преследование целей [22], достижимость набора целей [23]. Благодаря своим особенностям, исчисление ПОФ позволяет совмещать автоматический поиск логических выводов со специальными эвристиками, настраиваемыми для решаемой задачи.

Общая структура предлагаемого подхода к управлению группой представлена на рис. 1. Планировщик верхнего уровня отвечает за составление расписания рабочих периодов с учетом энергетических ограничений и требований к регулярности связи. На среднем уровне решаются задачи построения маршрутов и траекторий для подгрупп роботов, действующих на каждом рабочем периоде при выполнении текущих задач. Сюда могут входить как задачи распределения целей и заданий между индивидуальными АМР [24], так и задачи планирования путей и траекторного управления для связанных коалиций из нескольких роботов [25], например, при движении формациями, обследовании полей концентрации и др. Наконец, на нижнем уровне располагается обработчик событий, отвечающий, среди прочего, за переключение режимов работы всей группы и индивидуальных роботов в зависимости от текущих условий рабочей среды. В последующих разделах кратко представлены методы решения задач на каждом из трех уровней.

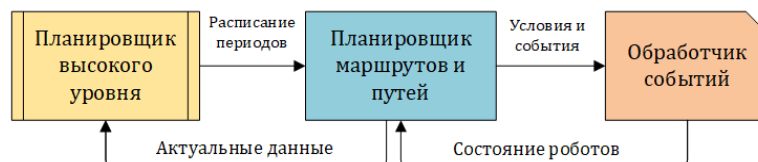


Рис. 1. Схема системы группового управления АМР в динамических условиях

Планирование высокоуровневых групповых стратегий. Планирование высокоуровневых групповых стратегий предлагается базировать на двух основных факторах, объединяющих наиболее реалистичные комплексные модели группового управления – коммуникационных и энергетических ограничениях. Это определяет основную концепцию предложенного подхода: разбить миссию на последовательность рабочих периодов, на каждом из которых будет действовать группировка с постоянным составом, а все изменения состава будут осуществляться в рамках запланированных групповых сборов (рандеву) в конце каждого такого периода. Проведение сборов с требуемой частотой позволит роботам регулярно обновлять знания о среде и состоянии группы путем обмена накопленной информацией.

В этом случае, планирование миссии будет заключаться в том, чтобы найти эффективную стратегию в форме расписания групповых рандеву (рис. 2). При этом, каждому рандеву должно быть поставлено в соответствие одно или более событий двух различных типов: сбор группы для коммуникационных нужд и/или сбор для обновления состава группы (отправка части роботов на подзарядку или возвращение подзарядившихся роботов обратно в группу).

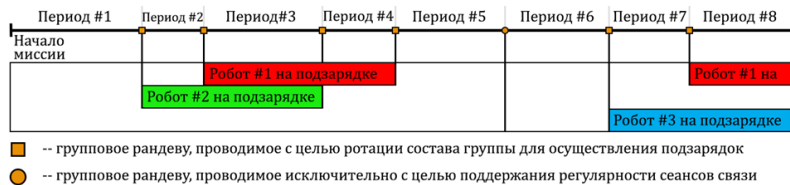


Рис. 2. Схема организации выполнения миссии на основе групповых рандеву

Последовательность рандеву с соответствующим набором событий должны быть сформированы таким образом, чтобы не только гарантировать требуемую регулярность сеансов связи и своевременную подзарядку всех роботов в группе, но и обеспечить максимальную работоспособность всех группировок роботов, действующих на протяжении миссии, в контексте их функциональных возможностей. Это позволит исключить вопросы связи и пополнения энергии из задачи планирования индивидуальных задач роботов на каждом рабочем периоде. Такая задача планирования является в некотором роде обратной вариацией задачи составления расписания рабочих смен (shift scheduling problem) [26]. В отличие от классической постановки, где требуется сформировать разнородную команду рабочих и построить для них расписание, гарантированно покрывающее заданную потребность в рабочей силе при наименьших затратах, в нашем случае, наоборот, команда роботов задана и фиксирована, а составление расписания смен (рабочих периодов) требуется в контексте максимизации качества конечного покрытия и удовлетворения потребностей самих роботов (рис. 3).

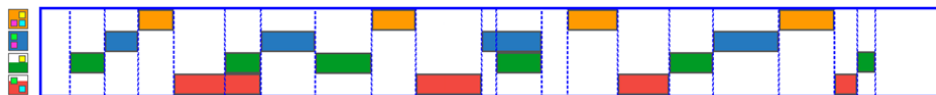


Рис. 3. Пример рабочего расписания для группы из четырех разнородных роботов

Таким образом, можно сформировать следующую постановку задачи. Пусть для выполнения миссии длительностью T (горизонт планирования) дана группа из n АМР, различающихся по крейсерской скорости v_i , емкости батарей b_i и набору установленного исследовательского оборудования (сонары, камеры и др.)

$\{u_i^{(j)}\} \in \{0,1\}, j = 1, \dots, l, i = 1, \dots, n$. Подзарядка батарей АМР производится на специальной станции, оснащенной w зарядными доками и расположенной на расстоянии d от области группового сбора, со средней скоростью c .

Обозначим за $Q_{ij} = (t_{ij1}, t_{ij2})$ j -ый период подзарядки i -го робота как временной отрезок, на котором АМР покидает группу, перемещается к станции зарядки, пополняет запас энергии батарей и возвращается обратно. Следуя той же логике, интервал между двумя последовательными периодами зарядки АМР назовем его рабочей сменой. Ставится задача поиска наиболее эффективного расписания рабочих смен для всей группы действующих роботов на период T :

$$S = \{Q_{11}, Q_{12}, \dots, Q_{21}, Q_{12}, \dots, Q_{n1}, Q_{n2}, \dots, Q_{nq}\},$$

где эффективность расписания определяется следующим набором критериев [27]:

- 1) своевременная подзарядка для всех роботов в группе;
- 2) максимальное покрытие рабочих потребностей на протяжении миссии;
- 3) равномерное распределение рабочей силы группы во времени;
- 4) минимальное количество необязательных (излишних) рандеву, поскольку каждое из них отвлекает роботов от выполнения текущих целей.

В условиях необходимости планирования и корректировки расписаний в режиме, близком к реальному времени, наиболее применимыми представляются различные метаэвристические методы. Несмотря на большое разнообразие существующих подходов к составлению расписаний, эволюционные алгоритмы остаются одним из наиболее часто используемых методов на протяжении многих лет. В среднем, они работают быстрее и масштабируются лучше, чем любые другие метаэвристические подходы. Кроме того, их структура позволяет легко встраивать дополнительные специализированные эвристики и алгоритмические схемы для учета особенностей конкретных задач из прикладной области.

Таким образом, предлагается использование гибридной модификации эволюционных алгоритмов с набором проблемно-ориентированных эвристик и генетических операторов, а также встроенным блоком локального поиска. Эффективность подхода подтверждена серией вычислительных экспериментов на двух наборах тестовых задач: первый включает постановки для групп малого размера до с априори известным значением оптимума, а второй набор содержит задачи большой размерности с высокой степенью разнородности АМР. Подход демонстрирует хорошую масштабируемость, он способен генерировать эффективные расписания для параметрически и функционально разнообразных групп из нескольких десятков роботов за несколько минут фоновых вычислений.

Мультиагентная стратегия управления мобильными агентами при решении задачи обследования поля концентрации. Под полем концентрации (рис. 4) будем понимать объект, явление или процесс, описываемый, в общем виде, некоторой функцией $f(t, q): T \times Q \rightarrow R, Q \subseteq R^p, p \geq 2, T = [0, \infty)$. Источниками поля концентрации называются такие точки $q_j^e(t) \in L$, которые являются локальными экстремумами $f(t, q)$. В случае нестационарного поля, источники могут изменять как абсолютное значение функции поля, так и свое местоположение. Соответственно, необходимо ввести следующее ограничение, без которого их локализация и мониторинг невозможны:

$$\forall t_1, t_2 \in T, q^e \in L: \|q^e(t_1) - q^e(t_2)\| < |v(t_2 - t_1)|,$$

где v – максимальная скорость движения агентов.

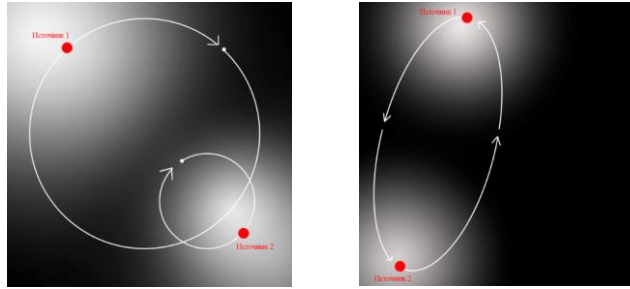


Рис. 4. Примеры моделей нестационарных полей концентрации (стрелками обозначены траектории движения источников)

Пусть доступные мобильные агенты являются интеграторами второго порядка, динамика которых описывается следующей системой уравнений:

$$\dot{q}_i = v_i, \quad \dot{v}_i = u_i, \quad i \in \Gamma = \{1, 2, \dots, n\},$$

где $q_i \in R^p$, $v_i \in R^p$ и $u_i \in R^p$ – соответственно, положение, скорость и управление i -го агента. Агенты способны производить замеры величины поля (функции $f(t, q)$), но ограничены при этом только своими текущими координатами. Также предположим, что ограничения на дальность установки стабильного канала связи между агентами не накладываются, что позволяет им беспрепятственно обмениваться данными о своих текущих координатах и проведенных замерах. Таким образом, задачу локализации и мониторинга источников можно свести к подбору такого u , при котором критерий качества обследования принимал минимальное значение. В данной работе рассматривается критерий $M(t) = \max_{j \in \Gamma} \min_{i \in \Gamma} \|q_i(t) - q_j^e(t)\|$, где n_e – количество источников. В данном случае критерий минимален только в том случае, когда в малой окрестности каждого источника находится хотя бы один агент.

Для решения поставленной задачи предложен подход, названный стратегией управления кластеризованной популяцией. Предполагается, что множество агентов Γ разбито на m ($m \geq n_e$) непересекающихся кластеров

$$\tau = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m\} \forall j, k: j \neq k \rightarrow \tau_j \cap \tau_k = \emptyset.$$

Пусть разбиение τ сбалансировано, т. е. $\forall j, k: |\tau_j| \approx |\tau_k| \geq 3$, а состав кластеров не изменяется в процессе решения задачи. Агенты, принадлежащие разным кластерам, находятся между собой в конкурентных отношениях. Более правильным с точки зрения биологической природы предложенной стратегии управления является термин «аменсализм», т.е. одни агенты оказывают негативное эффект на других, не испытывая со стороны последних ни положительного, ни негативного влияния. Таким образом, группа, находящаяся ближе других к источнику, отталкивает другие кластеры, не позволяя им приближаться.

Управление каждого агента строится как взвешенная сумма трех сил: кооперирующей F_i^c , градиентной F_i^g и сегрегирующей F_i^s :

$$u_i = c_1 F_i^c + c_2 F_i^g + c_3 F_i^s,$$

где $c_1, c_2, c_3 \in R^+$ – некоторые положительные коэффициенты. В основе построения сил лежит применение метода искусственных потенциальных полей [28], при этом, каждая из них отвечает за свою часть решения задачи.

Градиентная сила направляет робота вдоль рассчитанной оценки градиента к ожидаемому экстремальному значению поля и определяется как

$$F_i^g = \sum_{j \in \tau_k} F_{ij}^g = \sum_{j \in \tau_k} \left(\frac{q_{ij}(s_j - s_i)}{\|q_{ij}\|} \right), \quad i \in \tau_k, \quad (1)$$

где $\|q_{ij}\|$ – евклидова норма вектора $q_{ij} = q_i - q_j$, s – текущий замер величины поля концентрации в текущих координатах агента.

Согласно (1), направление поиска выбирается путем сравнения измеренных значений поля, полученных роботом и его соседями. Таким образом, если s_i меньше, чем s_j , то соответствующая составляющая силы F_i^g направлена в сторону робота j . Что характерно, компоненты F_{ij}^g и F_{ji}^g градиентной силы равны. Благодаря этому достигается самоорганизация движения группы, при которой каждый робот движется в том же направлении и с той же скоростью, что и его соседи, имея лишь незначительные отклонения, которые гасятся кооперирующей силой и на достаточно большом отрезке времени стремятся к нулю.

С другой стороны, кооперирующая сила обеспечивает реализацию агентами стаинового поведения, в частности, избегание столкновений и центрирование стаи. Было предложено определять данную силу следующим образом:

$$F_i^c = - \sum_{j \in \tau_k} (\nabla_{q_i} U_{ij}^c(\|q_{ij}\|)) , \quad i \in \tau_k, \quad (2)$$

где $U_{ij}^c(\|q_{ij}\|)$ – искусственная потенциальная функция, которая определяет взаимодействие агентов, ∇_{q_i} обозначает градиент относительно компонент вектора q_i . В качестве потенциальной функции $U_{ij}^c: R^+ \rightarrow R^+$ предлагается функция

$$U_{ij}^c(\|q_{ij}\|) = \alpha \left(\frac{1}{2} (\|q_{ij}\| - d_{ij}^A)^2 + \beta \ln \ln \|q_{ij}\| + \beta \frac{d_{ij}^A}{\|q_{ij}\|} \right), \quad (3)$$

где $\alpha, \beta \in R^+$ – некоторые управляющие параметры; $d_{ij}^A > 0$ – определяет желаемое расстояние между агентами. Функция (3) построена на основе потенциальной функции, предложенной в [28], путем добавления параметра β , позволяющего варьировать размер области, на которой эта функция является строго выпуклой. Таким образом, под воздействием данной силы агенты одного кластера стремятся образовать формацию, которая в случае минимального необходимого количества агентов имеет вид правильного треугольника со сторонами длиной d_{ij}^A .

Наконец, сегрегирующая сила отвечает за вышеописанное взаимодействие между различными кластерами и задается следующим образом:

$$F_i^s = - \sum_{j \notin \tau_k} (\nabla_{q_i} U_{ij}^s(\|q_{ij}\|)) , \quad i \in \tau_k. \quad (4)$$

$$U_{ij}^s(\|q_{ij}\|) = \begin{cases} 0, & \text{при } (\|q_{ij}\| > d_{ij}^B) \vee (s_i > s_j), \\ \alpha \left(\frac{1}{2} (\|q_{ij}\| - d_{ij}^B)^2 + \beta \ln \ln \|q_{ij}\| + \beta \frac{d_{ij}^B}{\|q_{ij}\|} \right), & \text{иначе,} \end{cases} \quad (5)$$

где $d_{ij}^B \gg d_{ij}^A$ – минимальное желаемое расстояние между кластерами. Сила F_i^s строится по тем же принципам, что и кооперирующая, за исключением двух факторов:

1) F_i^s прикладывается только к агентам кластера с меньшими значениями величины поля, что побуждает их искать источник, который еще не находится под наблюдением какого-либо кластера агентов.

2) F_i^s выталкивает агентов за пределы радиуса d_{ij}^B , но не заставляет кластеры выдерживать между собой расстояние d_{ij}^B .

Для оценки качества работы предложенной стратегии управления произведено несколько серий модельных испытаний, различающихся, в том числе, начальными условиями и моделями обследуемых полей концентрации. В большинстве

проведенных тестов группе агентов удавалось достигнуть поставленной задачи за относительно малое время (150-500 секунд модельного времени). При этом, после локализации всех источников амплитуда отклонения критерия при дальнейшем мониторинге не превышала 15 модельных метров, что является допустимой погрешностью, учитывая размер обследуемых областей в 1000×1000 метров.

Логический подход к управлению дискретно-событийными системами.

На нижнем уровне предлагаемого подхода к групповому управлению АМР для обработки событий, возникающих в рабочей среде или внутри самой группы роботов, предлагается использовать логические дискретно-событийные системы (ДСС). ДСС может быть представлена [16] конечным автоматом $G = (Q, \Sigma, \delta, q_0, Q_m)$, где Σ – множество состояний q ; Σ – множество событий; $\delta: \Sigma \times Q \rightarrow Q$ – функция переходов; $q_0 \in Q$ – начальное состояние; $Q_m \subset Q$ – множество маркированных состояний. Множество $L(G) = \{w: w \in \Sigma^* \text{ и } \delta(w, q_0) \text{ определено}\}$ представляет собой язык, генерируемый G , а множество $L_m(G) = \{w: w \in L(G) \text{ и } \delta(w, q_0) \in Q_m\}$ – язык, маркированный G . Маркированный язык используется для описания завершенных системой задач, например, миссии группы АМР, или заданной цепочки переключений режимов функционирования отдельного робота.

Теория супервизорного управления (ТСУ) [17] предполагает, что из множества событий выделено множество $\Sigma_c \subseteq \Sigma$ управляемых событий, и $\Sigma_{uc} = \Sigma \setminus \Sigma_c$ – неуправляемые события, $\Sigma_c \cap \Sigma_{uc} = \emptyset$. Супервизор как средство управления ДСС способен препятствовать возникновению управляемых событий с целью ограничить поведение системы в некоторых заданных рамках, определяемых регулярным языком, например, K . Например, при использовании робототехнических комплексов природа таких ограничений вытекает из внешней обстановки или изменении структуры группы роботов как взаимодействующих агентов. Обозначим $L(J/G)$ формальный язык, генерируемый ДСС G в присутствии супервизора J . Пусть $\bar{K}$ обозначает множество всех префиксов слов из K . Основная задача супервизорного управления (*basic supervisory control problem, BSCP*) заключается в построении такого супервизора, что $L(J/G) \subseteq K$. Известно, что условием существования решения этой задачи является управляемость K . Язык K управляем (относительно $L(G)$ и Σ_{uc}) если $\bar{K}\Sigma_{uc} \cap L(G) \subseteq \bar{K}$. Таким образом, для построения управления необходимо проводить проверку управляемости спецификации K как желаемых ограничений на ДСС.

В качестве примера рассмотрим ДСС, которая используется для решения задачи управления роботом в неизвестной среде [29]. Предполагается, что робот должен следовать по заданному пути, покидая его, чтобы избежать столкновения с встречающимися препятствиями, и возвращаясь на него после выполнения маневров уклонения (рис. 5). ДСС имеет следующие состояния, соответствующие режимам работы робота: PF (следование по заданному пути), DOL (обход обнаруженного препятствия с левой стороны), DOR (обход обнаруженного препятствия с правой стороны), NRP (поиск заданного пути), SOL (поиск препятствия слева), SOR (поиск препятствия справа). Состояние PF маркировано, чтобы показать, что робот всегда должен возвращаться на заданный путь. Событиями ДСС являются: NOR – 'справа нет препятствий', OF – 'обнаружено препятствие далеко', RPR – 'робот вышел на заданный путь', и наборы событий $AL_i, AR_i, i = \overline{1, 5}$, обозначающие переход в режимы обхода препятствий из других режимов. Некоторые из событий AL_i, AR_i являются композиционными, т.е. определяются несколькими атомарными событиями, запускаемыми условиями окружающей среды. Например, AL_1 , так как переход в режим обхода препятствия слева от него является результатом события $eOLNF$ с одним из событий $eORN, eORNf$ или eON , где $eOLNF, eORN, eORNf, eON$ объясняются в табл. 1. Пусть спецификацию задает автомат H , генерирующий язык спецификации K (рис. 6). Требуемая стратегия поведения АНПА может быть выражена

следующим образом: стараться не попасть туда, откуда невозможно выбраться, используя стандартные алгоритмы уклонения от препятствий; не менять выбранное направление уклонения от препятствия, пока АНПА не вернется к исходному пути (правило левой или правой руки); перестраивать путь только в случае крайней необходимости [29]. События RPR, NOR, NOD, OF неуправляемы.

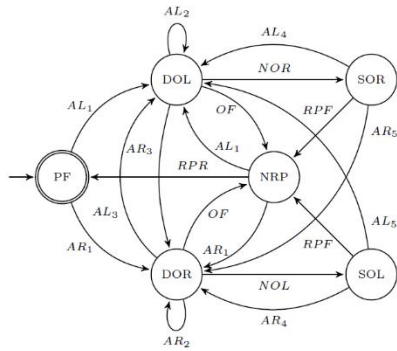


Рис. 5. ДСС G

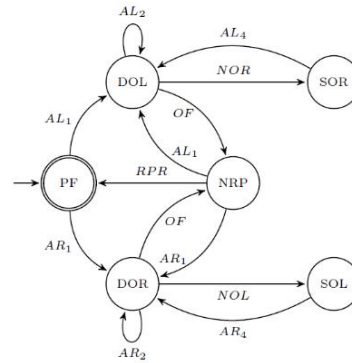


Рис. 6. Автомат H , задающий спецификацию K на функционирование G

Для анализа и синтеза супервизорного управления в рамках ТСУ предлагается использовать автоматическое доказательство теорем (АДТ) в исчислении позитивно-образованных формул (ПОФ) [19]. Язык ПОФ представляет собой первопорядковый логический язык, состоящий из формул, построенных из атомарных с помощью связок $\vee$, $\&$, кванторов $\forall$ и $\exists$, констант true и false . В общем виде ПОФ состоит из базы фактов и так называемых вопросов к базе, ответами на которые являются подстановки известных фактов вместо переменных вопроса. Консеквент вопроса, на который нашелся ответ, попадает в базу с соответствующей подстановкой. В результате построения вывода ПОФ как некоторой теоремы, в базе накапливаются факты, представляющие собой, например, план действий или, как в случае с ДСС, последовательность событий, произошедших в системе. Множество таких последовательностей образует формальный язык, описывающий функционирование системы. Для АТР на основе ПОФ-исчисления был разработан прuver Bootfrost, который специализируется на выводе ПОФ без неограниченных переменных. Разработаны эффективные алгоритмы поиска логического вывода для этого класса формул. Исходный код проекта, реализованный на языке Rust, можно найти на странице GitHub (<https://github.com/snigavik/bootfrost>). Основанный на ПОФ подход к работе с ДСС позволяет, среди прочего, обеспечить проверку управляемости заданного языка спецификации, построение наибольшего управляемого подязыка неуправляемого языка, реализацию монолитных и модульных супервизоров для систем, состоящих из m подсистем и n спецификаций. Например, для рассмотренного примера на рис. 5-6 прuver Bootfrost проверяет управляемость K за 22 шага. С помощью логического вывода в исчислении ПОФ на основе автоматов G и H , генерирующих $L(G)$ и K , может быть построен наибольший управляемый подязык $K^{\uparrow C}$ спецификации K во время процедуры проверки ее управляемости [30]. В случае, если $K^{\uparrow C} \neq \emptyset$, конечный автомат S , распознающий $K^{\uparrow C}$, может быть выбран в качестве супервизора J для G , являясь решением BSCP, причем $L(J/G) = L(S||G)$, что гарантирует максимально возможную реализацию ограничений на функционирование ДСС G , заданных спецификацией K . Здесь $S||G$ обозначает параллельную композицию автоматов S и G .

Преимуществом предлагаемого подхода с использованием ПОФ является возможность дополнительной обработки и контроля событий на основе данных об окружающей среде в режиме реального времени в процессе логического вывода [31]. За это отвечают специальные логические правила, представленные в ПОФ в виде вопросов обработки событий. При ответе на них запускаются подвыводы, в которых события, поступающие из рабочей среды, служат параметрами, используемыми в расчетах или для другой обработки. Например, предикаты T_i на рис. 7 вычисляются по формулам, соответствующим переходам, представленным на рис. 8. Таким образом, события AL_i , AR_i могут произойти, т.е. появиться в следующих вопросах ПОФ, только если выполняются условия их срабатывания. За неимением места приводится только часть таких вопросов. Знак *, использованный с предикатом E в последних двух вопросах, показывает, что произошедшее событие должно быть удалено из базы, чтобы исключить его повторное использование машиной поиска вывода. Таким образом, семантика исчисления ПОФ превращается в немонотонную, что свидетельствует о вариативности исчисления.

Таблица 1

События ДСС G

Имя	Условия срабатывания	Описание
eOLN	$R_{max}^L < R_{min}$	Препятствие, обнаруженное слева, близко
eOLNF	$R_{min} \leq R_{max}^L < R_{min} + \Delta R$	Препятствие, обнаруженное слева, находится недалеко
eNOL	$R_{max}^L = \infty$	Слева препятствий нет
eORN	$R_{max}^R < R_{min}$	Обнаруженное справа препятствие близко
eORNF	$R_{min} \leq R_{max}^R < R_{min} + \Delta R$	Препятствие, обнаруженное справа, находится недалеко
eNOR	$R_{max}^R = \infty$	Справа нет препятствий
eON	$\rho_{min} < \rho_n$	Обнаруженное препятствие близко
eOF	$\rho_{min} > \rho_f$	Обнаруженное препятствие далеко
eERP		Робот достиг конца заданного пути
eEAP		Робот достиг конца пути уклонения
eRPR		Робот достиг заданного пути

$$\begin{aligned}
 \exists B, B_s \left\{ \begin{array}{l} \forall T_1^\#(eOLNF, eORN, eORNF, eON) \longrightarrow \exists E(AL_1) \\ \forall T_2^\#(eORNF, eOLN, eON) \longrightarrow \exists E(AR_1) \\ \forall \sigma, s, \sigma', s' L(\sigma, s), \delta_1(s, \sigma', s'), \delta_2(s, \sigma', s'), E^*(\sigma' = AL_i) \longrightarrow \exists L(\sigma \cdot \sigma', s') \\ \forall \sigma, s, \sigma', s' L(\sigma, s), \delta_1(s, \sigma', s'), \delta_2(s, \sigma', s'), E^*(\sigma' = AR_i) \longrightarrow \exists L(\sigma \cdot \sigma', s') \end{array} \right.
 \end{aligned}$$

Рис. 7. ПОФ, содержащая специальные предикаты обработки событий

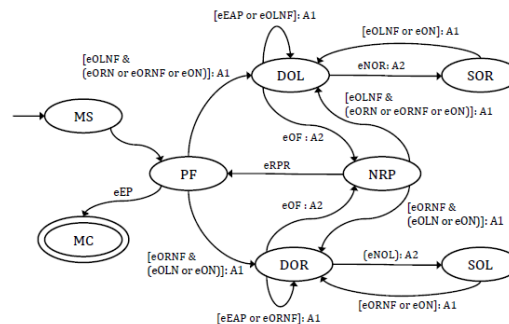


Рис. 8. ДСС для задачи управления движением робота

Заключение. Управление робототехническим комплексом, включающим в себя несколько взаимодействующих АМР, является сложной и комплексной задачей, в особенности, в условиях неполноты информации и высокой динамики внешних условий. Предложенный в данной работе трехуровневый подход к построению системы группового управления позволяет избежать ряда недостатков, характерных для существующих решений данной задачи. Его важной особенностью является низкая зависимость верхнего и нижнего уровней от конкретики предметной области, что позволяет использовать их для решения широкого спектра практических задач. В то же время, основная стратегия управления, нацеленная на непосредственное решение поставленной задачи, концентрируется на среднем уровне — планировщике маршрутов и путей. Таким образом, достигается высокая универсальность и вариативность применения подхода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kenzin M., Bychkov I., Maksimkin N. Self-adaptive coordination for fuel-constrained robot teams with periodic and aperiodic communications // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. – 2022. – Vol. 236 (17). – P. 9730-9742.
2. Dutia D. Multi-robot task allocation and scheduling with spatio-temporal and energy constraints // *Master's Thesis, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, MA, USA*, 2019.
3. Koc C., Bektas T., Jabali O et al. Thirty years of heterogeneous vehicle routing // *European Journal of Operational Research*. – 2016. – Vol. 249 (1). – P. 1-21.
4. Asghari M., Mirzapour Al-e-hashem S.M.J. Green vehicle routing problem: A state-of-the-art review // *International Journal of Production Economics*. – 2021. – Vol. 231: 107899.
5. Stephan J., Fink J., Kumar V. et al. Concurrent control of mobility and communication in multirobot systems // *IEEE Transactions on Robotics*. – 2017. – Vol. 33(5). – P. 1248-1254.
6. Kantaros Y., Guo M., Zavlanos M. Temporal logic task planning and intermittent connectivity control of mobile robot networks // *IEEE Transactions on Automatic Control*. – 2019. – Vol. 64 (10). – P. 4105-4120.
7. Kannan B., Marmol V., Bourne J. et al. The Autonomous Recharging Problem: Formulation and a market-based solution // *Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. – 2013. – P. 3503-3510.
8. Selmair M., Hauers S., Gustafsson-Ende L. Scheduling charging operations of autonomous AGVs in automotive in-house logistics // *Proceedings of the Simulation in Production and Logistics 2019, Chemnitz, Germany*. – 2019.
9. Hwang J., Bose N., Fan S. AUV Adaptive Sampling Methods // *Applied Sciences*. – 2019. – Vol. 9. – P. 1-30.
10. Pang S., Farrell J.A. Chemical plume source localization // *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part B*. – 2006. – Vol. 36. – P. 1068-1080.
11. Zhang Y., Godin M.A. et al. Using an autonomous underwater vehicle to track a coastal upwelling front // *IEEE J. Ocean. Eng.* – 2012. – Vol. 37. – P. 338-347.
12. Zhang Y., Bellingham J.G. et al. Autonomous Four-Dimensional Mapping and Tracking of a Coastal Upwelling Front by an Autonomous Underwater Vehicle // *J. Field Robot.* – 2016. – Vol. 33. – P. 67-81.
13. Киселев Л.В., Медведев А.В. Модели динамики и алгоритмы управления движением автономного подводного робота при траекторном обследовании аномальных физических полей // *Подводные исследования и робототехника*. – 2011. – № 1 (11). – С. 24-31.
14. Camilli R., Bingham B. et al. Integrating in-situ chemical sampling with AUV control systems // *In Proceedings of the Oceans 2004, Kobe, Japan, 9–12 November 2004*. – 2004. – P. 101-109.
15. Hayes A.T., Martinoli A., Goodman R.M. Distributed odor source localization // *IEEE Sens. J.* – 2002. – Vol. 2. – P. 260-271.
16. Cassandras C.G., Lafortune S. *Introduction to Discrete Event Systems*. – 3rd ed. – Cham, Switzerland: Springer, 2021. – XXVI. – 804 p.
17. Wonham W.M., Cai K. *Supervisory Control of Discrete-Event Systems*. – NY: Springer, 2019. – 487 p.

18. Vassilyev S.N. Machine synthesis of mathematical theorems // The Journal of Logic Programming. – 1990. – Vol. 9 (2-3). – P. 235-266.
19. Васильев С.Н., Жерлов А.К., Федунев Е.А., Федосов Б.Е. Интеллектуальное управление динамическими системами. – М.: Физматлит, 2000. – 352 с.
20. Davydov A., Larionov A., Cherkashin E. On the calculus of positively constructed formulas for automated theorem proving // Automatic Control and Computer Sciences. – 2011. – Vol. 45 (7). – P. 402-407.
21. Larionov A., Davydov A., Cherkashin E. The calculus of positively constructed formulas, its features, strategies and implementation // Proc. of International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija 2013. – 2013. – P. 1023-1028.
22. Vassilyev S., Galyaev A. Logical-optimization approach to pursuit problems for a group of targets // Dokl. Math. – 2017. – Vol. 95. – P. 299-304.
23. Vassilyev S., Ponomarev G. Automation methods for logical derivation and their application in the control of dynamic and intelligent systems // Proc. Steklov Inst. Math. – 2012. – Vol. 276. – P. 161-179.
24. Каляев И.А., Капустян С.Г., Усачев Л.Ж. Метод решения задачи распределения целей в группе БЛА сетцентрической системой управления // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 12 (185). – С. 55-70.
25. Пилюхов В.Х., Медведев М.Ю. Сравнительный анализ централизованного и децентрализованного алгоритмов движения строим БЛА мультикоптерного типа // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 1 (225). – С. 121-139.
26. Van den Bergh J., Beliën J. et al. Personnel scheduling: A literature review // European Journal of Operational Research. – 2013. – Vol. 226. – P. 367-385.
27. Kenzin M., Bychkov I., Maksimkin N. A Hierarchical Approach to Intelligent Mission Planning for Heterogeneous Fleets of Autonomous Underwater Vehicles // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10 (11):1639.
28. Santos V.G. Spatial segregative behaviors in robotic swarms using differential potentials // Swarm Intelligence. – 2020. – Vol. 14. – P. 259-284.
29. Ulyanov S., Bychkov I., Maksimkin N. Event-Based Path-Planning and Path-Following in Unknown Environments for Underactuated Autonomous Underwater Vehicles // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10, No. 21. – P. 7894.
30. Davydov A., Larionov A., Nagul N. The construction of controllable sublanguage of specification for DES via PCFs based inference // Proc. of the 2nd International Workshop on Information, Computation, and Control Systems for Distributed Environments, ICCS-DE 2020, Irkutsk, Russia, July 6-7, 2020: CEUR-WS Proceedings. – 2020. – Vol. 2638. – P. 68-78.
31. Давыдов А.В., Нагул Н.В., Ларионов А.А. Об обработке событий в формальном логическом подходе к управлению дискретно-событийными системами // Вычислительные технологии. – 2022. – Т. 27, № 5. – С. 89-100.

REFERENCES

1. Kenzin M., Bychkov I., Maksimkin N. Self-adaptive coordination for fuel-constrained robot teams with periodic and aperiodic communications, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2022, Vol. 236 (17), pp. 9730-9742.
2. Dutia D. Multi-robot task allocation and scheduling with spatio-temporal and energy constraints, *Master's Thesis, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, MA, USA*, 2019.
3. Koc C., Bektas T., Jabali O et al. Thirty years of heterogeneous vehicle routing, *European Journal of Operational Research*, 2016, Vol. 249 (1), pp. 1-21.
4. Asghari M., Mirzapour Al-e-hashem S.M.J. Green vehicle routing problem: A state-of-the-art review, *International Journal of Production Economics*, 2021, Vol. 231: 107899.
5. Stephan J., Fink J., Kumar V. et al. Concurrent control of mobility and communication in multirobot systems, *IEEE Transactions on Robotics*, 2017, Vol. 33 (5), pp. 1248-1254.
6. Kantaros Y., Guo M., Zavlanos M. Temporal logic task planning and intermittent connectivity control of mobile robot networks, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2019, Vol. 64 (10), pp. 4105-4120.

7. Kannan B., Marmol V., Bourne J. et al. The Autonomous Recharging Problem: Formulation and a market-based solution, *Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2013, pp. 3503-3510.
8. Selmaier M., Hauers S., Gustafsson-Ende L. Scheduling charging operations of autonomous AGVs in automotive in-house logistics, *Proceedings of the Simulation in Production and Logistics 2019, Chemnitz, Germany*, 2019.
9. Hwang J., Bose N., Fan S. AUV Adaptive Sampling Methods, *Applied Sciences*, 2019, Vol. 9, pp. 1-30.
10. Pang S., Farrell J.A. Chemical plume source localization, *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part B*, 2006, Vol. 36, pp. 1068-1080.
11. Zhang Y., Godin M.A. et al. Using an autonomous underwater vehicle to track a coastal upwelling front, *IEEE J. Ocean. Eng.*, 2012, Vol. 37, pp. 338-347.
12. Zhang Y., Bellingham J.G. et al. Autonomous Four-Dimensional Mapping and Tracking of a Coastal Upwelling Front by an Autonomous Underwater Vehicle, *J. Field Robot.*, 2016, Vol. 33, pp. 67-81.
13. Kiselev L.V., Medvedev A.V. Modeli dinamiki i algoritmy upravleniya dvizheniem avtonomnogo podvodnogo robota pri traektornom obsledovanii anomal'nykh fizicheskikh poley [Dynamic models and algorithms for controlling the movement of an autonomous underwater robot during trajectory examination of anomalous physical fields], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater research and robotics], 2011, No. 1 (11), pp. 24-31.
14. Camilli R., Bingham B. et al. Integrating in-situ chemical sampling with AUV control systems, *In Proceedings of the Oceans 2004, Kobe, Japan, 9–12 November 2004*, 2004, pp. 101-109.
15. Hayes A.T., Martinoli A., Goodman R.M. Distributed odor source localization, *IEEE Sens. J.*, 2002, Vol. 2, pp. 260-271.
16. Cassandras C.G., Lafortune S. Introduction to Discrete Event Systems. 3rd ed. Cham, Switzerland: Springer, 2021, XXVI, 804 p.
17. Wonham W.M., Cai K. Supervisory Control of Discrete-Event Systems. NY: Springer, 2019. – 487 p.
18. Vassilyev S.N. Machine synthesis of mathematical theorems, *The Journal of Logic Programming*, 1990, Vol. 9 (2-3), pp. 235-266.
19. Vasil'ev S.N., Zherlov A.K., Fedunov E.A., Fedosov B.E. Intel'ektnoe upravlenie dinamicheskimi sistemami [Intelligent control of dynamic systems]. Moscow: Fizmatlit, 2000, 352 p.
20. Davydov A., Larionov A., Cherkashin E. On the calculus of positively constructed formulas for automated theorem proving, *Automatic Control and Computer Sciences*, 2011, Vol. 45 (7), pp. 402-407.
21. Larionov A., Davydov A., Cherkashin E. The calculus of positively constructed formulas, its features, strategies and implementation, *Proc. of International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija 2013*, 2013, pp. 1023-1028.
22. Vassilyev S., Galyaev A. Logical-optimization approach to pursuit problems for a group of targets, *Dokl. Math.*, 2017, Vol. 95, pp. 299-304.
23. Vassilyev S., Ponomarev G. Automation methods for logical derivation and their application in the control of dynamic and intelligent systems, *Proc. Steklov Inst. Math*, 2012, Vol. 276, pp. 161-179.
24. Kalyaev I.A., Kapustyan S.G., Usachev L.Zh. Metod resheniya zadachi raspredeleniya tselyey v gruppe BLA setetsentricheskoy sistemoy upravleniya [A method for solving the problem of distributing goals in a group of UAVS by a network-centric control system], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 12 (185), pp. 55-70.
25. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. Sravnitel'nyy analiz tsentralizovannogo i detsentralizovannogo algoritmov dvizheniya stroem BLA mul'tikopternogo tipa [Comparative analysis of centralized and decentralized algorithms for the movement of a multicopter-type UAV system], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 1 (225), pp. 121-139.
26. Van den Bergh J., Beliën J. et al. Personnel scheduling: A literature review, *European Journal of Operational Research*, 2013, Vol. 226, pp. 367-385.
27. Kenzin M., Bychkov I., Maksimkin N. A Hierarchical Approach to Intelligent Mission Planning for Heterogeneous Fleets of Autonomous Underwater Vehicles, *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, Vol. 10 (11):1639.
28. Santos V.G. Spatial segregative behaviors in robotic swarms using differential potentials, *Swarm Intelligence*, 2020, Vol. 14, pp. 259-284.

29. Ulyanov S., Bychkov I., Maksimkin N. Event-Based Path-Planning and Path-Following in Unknown Environments for Underactuated Autonomous Underwater Vehicles, *Applied Sciences*, 2020, Vol. 10, No. 21, pp. 7894.
30. Davydov A., Larionov A., Nagul N. The construction of controllable sublanguage of specification for DES via PCFs based inference, *Proc. of the 2nd International Workshop on Information, Computation, and Control Systems for Distributed Environments, ICCS-DE 2020, Irkutsk, Russia, July 6-7, 2020: CEUR-WS Proceedings*, 2020, Vol. 2638, pp. 68-78.
31. Davydov A.V., Nagul N.V., Larionov A.A. Ob obpabotke cobytiy v fopmal'nom logicheckom podxode k upravlению dickpetno-cobytiynymi cistemami [On event processing in a formal logical approach to the management of discrete event systems], *Vychislitel'nye tekhnologii* [Computational Technologies], 2022, Vol. 27, No. 5, pp. 89-100.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. В.Б. Барахнин.

Бычков Игорь Вячеславович – Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова Сибирского отделения РАН; e-mail: idstu@icc.ru; г. Иркутск, Россия; тел.: 83952427100; академик; директор.

Давыдов Артем Васильевич – e-mail: artem@icc.ru; тел.: 83952453085; научный сотрудник.

Кензин Максим Юрьевич – e-mail: gorthauers@gmail.com; тел.: 83952453085; научный сотрудник.

Нагул Надежда Владимировна – e-mail: sapling@icc.ru; тел.: 83952453085; к.ф.-м.н.; с.н.с.

Толстухин Антон Артемович – e-mail: madstayler93@gmail.com; тел.: 83952453085; м.н.с.

Bychkov Igor Vyacheslavovich – Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; e-mail: idstu@icc.ru; Irkutsk, Russia; phone: +73952427100; academician; director.

Davydov Artem Vasilievich – e-mail: artem@icc.ru; phone: +73952453085; researcher.

Kenzin Maxim Yurievich – e-mail: gorthauers@gmail.com; phone: +73952453085; researcher.

Nagul Nadezhda Vladimirovna – e-mail: sapling@icc.ru; phone: +73952453085; senior researcher.

Tolstikhin Anton Artemovich – e-mail: madstayler93@gmail.com; phone: +73952453085; junior researcher.

УДК 614.842.47

DOI 10.18522/2311-3103-2023-1-184-197

И.В. Образцов, В.П. Шкодырев

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖИВУЧЕСТИ (ОБЗОР)*

Информации о пожароопасных ситуациях, циркулирующей в контурах перечисленных систем и уровня технологий искусственного интеллекта, вполне достаточно, чтобы разработать научно-методический аппарат обнаружения пожароопасных ситуаций в корабельных помещениях, определения места их возникновения и факторов пожара, прогнозирования развития пожароопасной ситуации и разработать комплекс технологических решений с применением искусственного интеллекта для получения обоснованных рекомендаций по локализации и тушению пожаров на кораблях ВМФ. Это позволит значительно сократить время

* Работа выполняется в рамках научно-исследовательской работы «Поиск и исследование методов и технологий искусственного интеллекта для применения в системах обеспечения пожарной безопасности кораблей», включенная в научный план ВС РФ на 2023 год и плановый 2024 и 2025 года.

обнаружения источников возгорания, дать достоверную информацию о пожароопасной обстановке, спрогнозировать развитие пожара в корабельных помещениях и оперативно организовать борьбу с корабельным пожаром до возникновения критических пожароопасных факторов и ущерба кораблю, здоровью и жизни личного состава. Технологии искусственного интеллекта являются эффективным средством решения сложных плохо формализуемых задач. К этому классу традиционно относятся задачи классификации, кластеризации, аппроксимации многомерных отображений, прогнозирования временных рядов, нелинейной фильтрации, управления сложными технологическими объектами. Анализ пожарной опасности технологических процессов, работы корабельных систем и технических средств показал, что одним из наиболее перспективных путей разрешения системного противоречия в обеспечении пожарной безопасности является использование технологий искусственного интеллекта. Необходимость разработки интеллектуальных систем обеспечения живучести на кораблях ВМФ обусловлена необходимостью повышения эффективности руководства при борьбе за живучесть в ряде аварий и катастроф. Описаны примеры влияния различных факторов на ведение борьбы за живучесть при возникновении аварий. Определена роль интеллектуальных систем обеспечения живучести в составе систем кораблей и судов. Обоснована необходимость внедрения таких систем. Разрабатываемые в настоящее время интеллектуальные системы обеспечения живучести на кораблях ВМФ призваны оказывать помощь командному составу кораблей и судов в своевременности и обоснованности принятия решений, что позволит повысить эффективность борьбы за живучесть.

Пожарная безопасность; борьба за живучесть; корабли ВМФ; интеллектуальная система живучести; расписывание образов; искусственные нейронные сети; искусственный интеллект; база данных; база знаний; интеллектуальная поддержка принятия решения.

I.V. Obraztsov, V.P. Shkodyrev

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF AN INTELLIGENT SURVIVABILITY SYSTEM (REVIEW)

Information about fire-hazardous situations circulating in the circuits of the listed systems and the level of artificial intelligence technologies is quite enough to develop a scientific and methodological apparatus for detecting fire-hazardous situations in ship premises, determining the location of their occurrence and fire factors, predicting the development of a fire-hazardous situation and developing a set of technological solutions using artificial intelligence to obtain sound recommendations on localization and extinguishing fires on Navy ships. This will significantly reduce the time for detecting sources of ignition, provide reliable information about the fire-hazardous situation, predict the development of a fire in the ship's premises and promptly organize the fight against a ship's fire before the occurrence of critical fire-hazardous factors and damage to the ship, the health and life of personnel. Artificial intelligence technologies are an effective means of solving complex poorly formalized tasks. This class traditionally includes the tasks of classification, clustering, approximation of multidimensional maps, time series forecasting, non-linear filtering, and management of complex technological objects. The analysis of the fire hazard of technological processes, the operation of ship systems and technical means has shown that one of the most promising ways to resolve the systemic contradiction in ensuring fire safety is the use of artificial intelligence technologies. The need to develop intelligent survivability systems on Navy ships is due to the need to improve the effectiveness of leadership in the fight for survivability in a number of accidents and catastrophes. Examples of the influence of various factors on the conduct of the struggle for survivability in the event of accidents are described. The role of intelligent survivability systems in the systems of ships and vessels is determined. The necessity of implementing such systems is justified. The intelligent survivability systems currently being developed on Navy ships are designed to assist the command staff of ships and vessels in the timeliness and validity of decision-making, which will increase the effectiveness of the fight for survivability.

Fire safety; the struggle for survivability; Navy ships; intelligent survivability system; Schedule images artificial neural networks; artificial intelligence; database; knowledge base; Intelligent decision support.

Введение. Борьба за живучесть корабля начинается сразу после возникновения аварии, которые могут носить как боевой, так и эксплуатационный характер. Однако, эффективность действий экипажа (аварийной партии) может быть снижена из-за недостатка или полного отсутствия объективной информации о повреждениях, о состоянии помещений и отсеков, его технических средств и т.п. Одновременно с этим, при наличии неполной и противоречивой информации об аварии, личном составе, технических средств и др. бороться за живучесть приходится в условиях дефицита времени на принятие решений и их реализацию. Решением этого противоречия может быть применение систем информационной поддержки для обеспечения живучести корабля – интеллектуальной системы обеспечения живучести корабля ВМФ (ИСОЖ).

Постановка задачи. Основная задача, возлагаемая на системы информационной поддержки – обеспечить лицо, принимающее решение (ЛПР), информацией, объем и форма представления которой позволяют ему в экстремальных условиях оперативно и обоснованно принимать оптимальные решения по управлению техническими средствами (ТС) и действиям личного состава экипажей при борьбе за живучесть корабля при различных авариях, включая автоматическое формирование рекомендаций с учетом текущего фактического состояния ТС, реального протекания аварийной ситуации и прогноза ее развития.

Системы информационной поддержки борьбы за живучесть (СИП БЖ) корабля ВМФ предназначены для автоматизированной выработки рекомендаций и представления информации в интересах обеспечения безаварийной эксплуатации корабля и судна ВМФ, а также принятия рациональных, оптимальных и эффективных решений руководителем борьбы за живучесть [1].

Рассмотрение основных задач, выполняемых современными СИП БЖ, позволяет сделать следующие выводы [2–3]:

1. Несмотря на постоянное совершенствование архитектуры, конструкции, приборного оборудования кораблей уровень аварийности продолжает оставаться значительным, устойчиво сохраняются тенденции возрастания материальных потерь от аварий и гибель личного состава.

2. Как показывает анализ, неблагоприятное развитие абсолютного большинства аварийных ситуаций происходит из-за ошибок людей. Психологические возможности персонала, в первую очередь, руководителей в условиях аварийной ситуации не позволяют им в полном объеме реализовывать имеющийся на корабле организационный и технический потенциал. Потери от аварий зачастую существенно превосходят ожидаемые результаты.

3. Противоречивость сложившегося положения состоит в том, что совершенствование архитектурно-конструктивных элементов корабля и функциональных характеристик оборудования одновременно сопровождается, естественно, их усложнением. Возросла плотность размещения оборудования на корабле. Более разветвленными стали сети потоков энергии и рабочих сред. При возникновении аварийных ситуаций, как правило, одновременно выходит из строя значительное количество механизмов и устройств.

4. Именно в этих сложных эксплуатационных условиях внедрение современных средств класса АСППР (автоматизированные системы поддержки принятия решений), предназначенных для информационной, аналитической и интеллектуальной поддержки лиц, обосновывающих и принимающих решения на современных кораблях, как сложных арготических комплексах, позволит снизить критичность влияния «человеческого фактора» на результативность и эффективность управления борьбой за живучесть корабля.

ИСОЖ предназначена для обеспечения автоматизированной выработки и представления ЛПР в режиме реального времени интеллектуальной поддержки (ИП) в интересах комплексного обеспечения безаварийной эксплуатации объекта

установки, принятия рациональных решений при возникновении потенциально опасных, нештатных ситуаций, а также при осуществлении руководства борьбы за живучесть.

Основные функции ИСОЖ:

- ◆ повышение ситуационной информированности ЛППР;
- ◆ сокращение времени принятия решений руководящим должностным лицом в любой обстановке (ситуации);
- ◆ оценка (анализ) возникшей нештатной/аварийной ситуации (АС);
- ◆ выработка и своевременное предоставление ЛППР информационной поддержки в целях обеспечения принятия эффективных решений и контроля за их исполнением в условиях возникновения нештатной ситуации и АС, в том числе, и при осуществлении руководства борьбы за живучесть (БЖ);
- ◆ определение (прогнозирование) влияния последствий выполнения рекомендованных или самостоятельно осуществляемых действий по локализации и ликвидации повреждений (АС) на дальнейшее использование аварийного объекта и его систем, комплексов, механизмов и отдельных ТС, а также на условия перевозимых грузов и состояние здоровья л/с и привлекаемых (перевозимых) лиц;
- ◆ осуществление анализа взаимозависимых параметров различных корабельных систем и ТС для выявления негативного влияния режимов функционирования одних групп оборудования на рабочие процессы в других системах и др.

Для оценки состояния корабля и динамики развития аварии целесообразно применять математическое и программное обеспечение обработки исходной и текущей информации необходимо. Это обеспечение должно быть специфичным для каждого типа аварий (затопление, пожар, взрыв и т.д.), так как в противном случае ИСОЖ не сможет выработать конкретных предложений, а ограничится лишь набором общих рекомендаций, которые не будут иметь практической пользы для повышения эффективности борьбы за живучесть. Разработка такого обеспечения потребует глубокого изучения и понимания основных процессов, происходящих во время аварии, создания их математических моделей, способных к адаптации в зависимости от объема исходных и текущих данных (мониторинга). Более того, программное обеспечение и заложенные в него алгоритмы и модели должны обладать способностью не только оценивать, но и прогнозировать развитие аварии, последствия действий экипажа, а также состояние жизненно важных механизмов и систем корабля.

В настоящее время на всех современных кораблях ВМФ используется интеллектуальная поддержка (в случае поступления воды или возникновения пожара или аварии ТС). В ходе их создания был реализован новый подход аппаратного мониторинга при пожаре, который позволяет контролировать не только традиционные параметры газо-воздушной среды (ГВС) отсеков и помещений корабля (наличие пламени, повышенной температуры, изменение концентрации газов CO , CO_2 , O_2 и других), но и упомянутый ранее – давление и скорость его изменения во времени.

Разработчики новой ИСОЖ исходят из того, что математическое моделирование развития пожара должно базироваться только на тех исходных параметрах, которые могут быть измерены или идентифицированы в аварийном отсеке (помещении) корабля, моделей оценки (возможных сценариев) развития пожара должно быть несколько, а конкретный сценарий выбирается автоматически. При этом чем подробнее исходные данные об аварии, полученные при аппаратном мониторинге помещений, либо от членов экипажа корабля, тем более детальный и обоснованный сценарий развития событий должен быть использован. Учитывая сложность и непредсказуемость корабельного пожара, необходимо, чтобы систематическая

ошибка оценки конкретной ситуации при ее моделировании гарантированно исключала негативное воздействие на предлагаемые рекомендации и решения по борьбе за живучесть.

С учетом вышеизложенных обстоятельств были разработаны математические модели развития пожара и его воздействия на оборудование и ТС, которые были использованы при создании ИСОЖ (рис. 1).

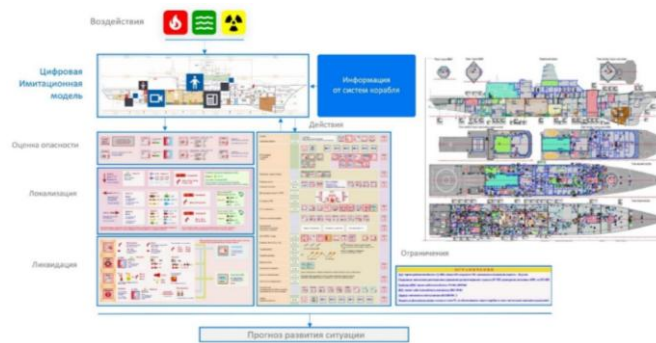


Рис. 1. Графический интерфейс ИСОЖ

Одной из основных подсистем ИСОЖ является подсистема (система) определения местоположения л/с (ПОМЛС), предназначенная для обеспечения определения местоположения, перемещения и поддержания (контроля) условий жизнедеятельности л/с на уровне, необходимом для сохранения его здоровья и работоспособности, как в повседневной, так и в аварийной ситуации, в том числе при осуществлении БЖ (рис. 2). Данная подсистема обладает возможностью функционирования в качестве самостоятельной системы.



Рис. 2. ПОМЛС ИСОЖ. Экранные формы, графический интерфейс

Применение в составе ИСОЖ оборудования внутриобъектовой связи (ПВС) вместе с функцией распознавания голоса (переговоров, команд) позволит обеспечить оперативность управления в любой сложившейся ситуации, а также при осуществлении руководства борьбой за живучесть.

К числу основных мероприятий, обеспечивающих безопасную эксплуатацию кораблей различных классов в части создания систем типа ИСОЖ, на основе выполненного выше анализа следует относить [4]:

1. В первую очередь, в аспекте «разделения» ответственности между лицами, обосновывающего и принимающего решения (командиром корабля и его помощниками) в части экспертной оценки данных, размещаемых ими в ходе эксплуатации в базе данных и знаний (БДЗ) ИСОЖ. Именно роль «комдива живучести в

аварийной (критической) ситуации» должна быть не только закреплена в соответствующих регламентах (документации) по кораблю, но и определять ответственность должностного состава за совершенствование БДЗ с учетом специфики корабля и его плавания при решении свойственных задач.

Недооценка данного фактора естественно может привести к «отказу от управления» (с использованием данных ИСОЖ) в процессе возникновения аварийной ситуации и борьбы за живучесть судна.

2. В основу проектных решений обоснования структуры и решаемых задач ИСОЖ должны закладываться исходные данные по обеспечению безопасной эксплуатации кораблей соответствующих классов исключительно на основе проектно-технической, конструкторской и технологической документации корабля вплоть до использования в качестве «подложки» соответствующих чертежей. Именно это (целостность и качество проектно-технологической документации, строгое соответствие проектных решений по информационной поддержке борьбы за живучесть (ИП БЖ) проектно-технологической документации кораблей) позволит существенно минимизировать проектные ошибки и объем экспериментальных проверок.

3. Для систем типа ИСОЖ особое значение приобретает не только проведение полномасштабных испытаний всех видов (лабораторных, стендовых, швартовых, межведомственных и т.п.), но и прохождение процедур сертификации средств и аттестации объекта информатизации. Именно эти процедуры (по полномасштабной отработке, испытаниям, сертификации проектных решений по ИП БЖ, а также аттестации объектов автоматизации БЖ) позволят повысить качество верификации, валидации системы и снизить риск введения в эксплуатацию «сырых», «недоработанных» системно-технических, проектных и управленческих решений.

4. В процессе проектирования систем типа ИСОЖ в качестве исходных данных для «заливки» в БДЗ целесообразно задавать максимально возможный перечень алгоритмов действий ЛПР при борьбе за живучесть корабля. Более того, данный перечень должен иметь соответствующий уровень верификации и валидности, чтобы минимизировать в процессе обучения ошибки управления ЛПР.

5. В процессе отработки (тренажерный режим) принятых проектных решений по архитектуре, функционалу и алгоритмам ИСОЖ в качестве «доверительных» должны использоваться независимо несколько (более 3-5) экспертов, что наряду с реализацией полимодельной концепции формирования алгоритмов информационно-аналитической поддержки операторов создаст достаточные условия по регуляризации задач оптимального принятия многокритериальных решений.

Особый интерес в целях обеспечения пожарной безопасности вызывают решения, связанные с распознаванием образов в системах пожарной сигнализации и видеонаблюдения [5–11]. Искусственный интеллект (ИИ) – мощный и на сегодня, пожалуй, наилучший метод для решения задач распознавания образов в пожароопасных ситуациях, когда отсутствуют значительные фрагменты информации, а имеющаяся информация предельно зашумлена.

Следует отметить, что технологии ИИ, это перспективная и развивающаяся область науки, которую можно использовать для обеспечения пожарной безопасности, а также работы систем пожаротушения [12–13].

На данный момент уже существует ряд систем, которые призваны помочь ЛПР при организации тушения пожара, однако, ИИ применяется в качестве связующего звена всех этих систем. Данные всех датчиков будут обрабатываться ИИ и передаваться в ИСОЖ (рис. 3). ИИ же посредством анализа будет передавать полноценную уже сведенную информацию ЛПР, таким образом повышается осведомленность ЛПР.



Рис. 3. Система обработки данных ИИ

Вместе с тем, анализ источников (литературы и патентных материалов) [14–16] показывает, что имеет место проявление следующих особенностей и тенденций создания и развития систем ИП АСППР применительно к интеллектуальным системам управления типа ИСОЖ:

1. Теорией систем искусственного интеллекта требования к интеллектуальным возможностям ИП систем управления класса СИП БЖ определяются условиями обеспечения высокой степени надежности и качества функционирования ИСОЖ при наличии существенной неопределенности входных данных (условий функционирования), изменчивости обстановки, широкого спектра воздействий случайного характера, а также неполноты и нечеткости поступающей информации. При этом в наиболее общем случае ИСОЖ, как интеллектуальная система управления, должна обладать широким многообразием функциональных свойств, включая:

- ◆ способность к анализу ситуаций, оценке обстановки и собственного состояния на основе обработки сенсорной информации (информации в сигналах датчиков с их числом более 100-150);
- ◆ способность к проведению самодиагностики ИСОЖ;
- ◆ способность к планированию целесообразных действий и поведения на основе анализа задачно-ориентированных указаний;
- ◆ способность к логическому выводу на основе данных, накопленных и непрерывно (циклически с длительностью цикла принятия решений порядка 1 минуты) актуализируемых знаний;
- ◆ способность к выполнению прогнозов и предсказаний на интервале минимум от 5-7 циклов принятия решений, т.е. от (10-15) минут;
- ◆ способность к интерактивному (в пределе – автоматическому) формированию модели внешней обстановки с контролируемыми параметрами верификации и валидности;
- ◆ способность к интерактивному (в пределе – автоматическому) формированию модели обстановки на корабле с возможностью вывода формальных закономерностей на основе анализа разрозненных фактов и с различным уровнем адекватности;
- ◆ способность к обобщению формируемых и актуализируемых знаний, накопленного опыта и типовых ситуаций с их регистрацией в базе данных и знаний (БДЗ) ИСОЖ;
- ◆ способность к обучению корабельного экипажа, в первую очередь, командиров, старших помощников командира и механиков корабля на примерах задач, хранимых в БДЗ, в интерактивном режиме с соответствующим расширением перечня и объема учебных задач;

- ♦ способность к самообучению корабельного экипажа, как в автономном режиме, так и в режиме дистанционного обучения (контроля знаний), а также в режиме группового обучения автономно и дистанционно;

- ♦ способность к моделированию ситуаций корабельным экипажем, представленных на уровне естественного языка описания и программирования.

2. Требования к человеко-машинному интерфейсу ИСОЖ определяются из условий обеспечения ее эффективной эксплуатации в экстремальных условиях, при высокой быстротечности изменения ситуаций, минимальном времени на оценку оперативной обстановки и постановку соответствующих задач с учетом стрессовых состояний или возможной неподготовленности оператора (пользователя), способного выдать необходимое целеуказание только лишь в самой обобщенной форме. При наличии таких ограничений приказ на выполнение задачи и доклад об итогах ее решения должны отдаваться и приниматься в режиме двустороннего диалога на уровне естественного или близкого к нему языка.

3. Реализация подобных, по существу – потенциальных, возможностей предполагает необходимость обеспечения следующих функций человеко-машинного интерфейса:

- ♦ поддержание диалога на уровне естественного языка, в том числе с возможностью речевого и символьного ввода/вывода;

- ♦ ввод и адекватное восприятие естественно-языковых целеуказаний и команд оператора на выполнение требуемых прикладных задач;

- ♦ интерпретация (объяснение) принимаемых решений на уровне естественного языка;

- ♦ естественно-языковое обучение понятиям и общим закономерностям, признакам объектов и ситуаций, правилам целесообразного поведения в типовых ситуациях.

4. Требования к функциям ИСОЖ в части внешнего восприятия, «очувствления» обстановки при использовании комплекса соответствующих датчиков, реализуемого интеллектуальной подсистемой управления, определяются необходимостью достоверной идентификации текущего состояния технических систем и устройств корабля для построения (синтеза) адекватной модели обстановки и последующего синтеза принимаемого решения о рациональном порядке выполнения поставленной прикладной задачи. При этом очевидно, что эффективность функционирования систем типа ИСОЖ будет во многом зависеть от заложенного набора ее возможностей по сенсорному «очувствлению», включая:

- ♦ сбор и выполнение предварительной обработки различных видов сенсорной информации о текущем состоянии и воздействиях внешней среды;

- ♦ способность к оперативному обучению средств распознавания, формированию типовых вариантов обстановки и принимаемых решений (типовых моделей управления) как в штатных условиях функционирования, аварийных условиях (типовых моделей управления борьбой за живучесть), так и в условиях, не предусмотренных соответствующими наставлениями и инструкциями экипажу по предотвращению аварий, борьбы за живучесть корабля;

- ♦ способность отслеживать заданные типы изменений внешней среды (по соответствующим типовым моделям борьбы за живучесть) с идентификацией их параметров.

5. Практическая реализация рекомендаций теории систем искусственного интеллекта сопряжена, как показывает анализ практик построения автоматизированных систем СИП БЖ [17, 18], с необходимостью решения следующих основных проблем создания и развития систем типа ИСОЖ:

5.1. Формирования алгоритмов и методов БЖ применительно к специфике конкретных проектов кораблей, включая наиболее критичные из них с точки устойчивости борьбы за живучесть.

5.2. Возрастания структурной, функциональной и системной сложности корабельных систем и её учета при синтезе и реализации результативных и эффективных алгоритмов и методов БЖ.

5.3. Отсутствия в связи с новизной направления развития систематизированных сведений о практиках и рекомендациях по проектированию систем типа ИСОЖ (рис. 4), их достаточной практической отработки в связи с ограниченными возможностями испытаний устройств и систем по БЖ, существенной ресурсной и рискованной емкостью подобных испытаний.

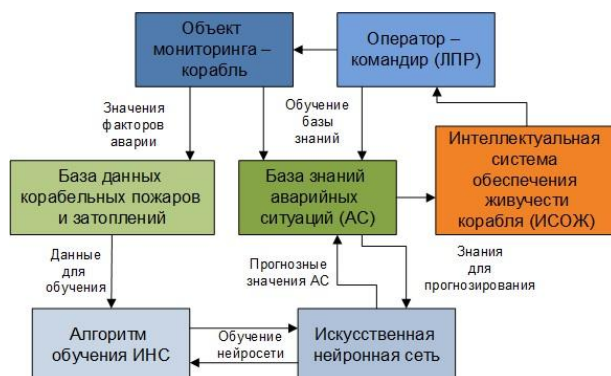


Рис. 4. Структурная схема перспективной ИСОЖ

Наиболее значимыми задачами реализации технологий искусственного интеллекта и их научно-технического совершенствования являются [19, 20]:

1. Систематизация накопленного опыта и выявление лучших практик обоснования, проектирования, создания и развития элементов и систем ИСОЖ. Одним из возможных вариантов решения данной задачи может быть согласованная ведущими специалистами в отрасли базы данных и знаний (БДЗ-СИП) с квалиметрическими оценками качества (Q) и конкурентной способности (КС=Q/QБТР) альтернативных вариантов (АВ) технологических решений (ТР) и образцов технических средств (ТС) в сравнении с базовыми ТР (БТР), как ведомственного (корпоративного), национального, так и международного (мирового) уровней. Решение этой задачи позволит проектировщикам и заказчикам технологически и инновационно-«прозрачно» управлять развитием систем ИСОЖ с соответствующей экономичностью затрат всех видов (времени, финансов, материально-технически, трудовых и других).

При этом, немаловажным преимуществом следует считать получение синергетического (эмерджентного) эффекта выигрыша за счет реализации принципа концентрации коллективных усилий специалистов с актуализацией их потенциалов на единой информационной основе БДЗ-СИП.

В свою очередь, не исключается также эффект определенной нейтрализации значимости вопросов корпоративных тайн, так как реализация высокотехнологичных решений по ИСОЖ будет доступна только высоко технологически развитым компаниям. Более того, которые будут заинтересованы культивировать различные формы высокопрофессиональной вневедомственной независимой экспертизы, в том числе участвующей в актуализации БДЗ-СИП, решении нетрадиционных задач системной аналитики и синтеза.

2. Оперативная (своевременная) опытно-конструкторская проработка и отработка перспективных ТР, создание опытных образцов ТС по ИСОЖ из состава конкурентно-способных вариантов в БДЗ-СИП, в том числе получения сопоставимых данных обеспечения конкурентной способности создаваемых образцов ИСОЖ.

Таким образом, одним из факторов, обосновывающих актуализацию данной задачи, является тенденция стремительного роста структурной и функциональной сложности современных систем ИСОЖ, а также практическую невозможность описания исходных данных при формализации требований к системам автоматизации в условиях многовариантного развития аварийных ситуаций и борьбы за живучесть, а, тем более, поведенческих характеристик операторов и наличия «человеческих» факторов. В свою очередь, использование даже технологий моделирования, в первую очередь, имитационного моделирования без использования «оболочек» конкурентно способных ТР, не позволит в силу ряда необходимых упрощений достигнуть необходимого уровня верификации исходных данных и необходимого уровня валидности полученных результатов моделирования.

В этой связи, переход к эмпирическим принципам поиска и выбора направлений развития будет более предпочтительным, так как будет в условиях явно выраженной и трудно преодолимой неопределенности базироваться на контролируемой и непрерывно актуализируемой базе эмпирически обоснованных данных.

Решение этой задачи позволит проектировщикам и заказчикам практически безальтернативно выбирать конкурентно способные ТР с соответствующей минимизацией рисков, затрат на поисковые НИР и обоснование ОКР.

3. Минимизация числа контуров автоматизированного управления процессами БЖ и их перевода в состав числа контуров автоматического управления с целью минимизации возможностей проявления негативного влияния субъективных свойств операторов (человеческих факторов).

Решение этой задачи позволит снизить риски Заказчика при возможном неполном представлении требований к системам ИСОЖ, недостаточном качестве реализации этих требований, объективности многофакторности задачи ИСОЖ.

Более того, это позволит сузить сектор решаемых оператором высоко ответственных задач и проектов управленческих решений, представляемых СИП, с одновременной концентрацией его ресурсных возможностей на альтернативных вариантах проектных решений с соответствующей регистрацией принятия решений.

С единых позиций подойти к решению всего спектра задач структурно-функционального синтеза системы поддержки принятия решения (СППР), СИП, возникающих на различных этапах их жизненного цикла, можно в рамках решения только практических задач, в том числе в рамках выполняемых НИОКР, используя фундаментальные и прикладные результаты, полученные к настоящему времени в таких научных дисциплинах, как исследование операций, искусственный интеллект, теория управления, теория принятия решений, системный анализ.

Закключение. Несмотря на то, что в настоящее время достигнут значительный прогресс в вопросах конструктивного обеспечения живучести кораблей, многие идеи и разработки, в том числе и кратко изложенные в данной статье, все еще находятся лишь на стадии теоретических и экспериментальных исследований. Существующие наработки необходимо «переводить» в практическую плоскость, учитывая их при проектировании новых (модернизации) кораблей ВМФ.

Для реализации интеллектуального подхода в обеспечении живучести выполняется поисковая научно-исследовательская работа: «Поиск и исследование методов и технологий искусственного интеллекта для применения в системах обеспечения пожарной безопасности кораблей» с выполнением фундаментальных задач направлена на повышение эффективности обеспечения пожарной безопасно-

сти кораблей (судов обеспечения) и подводных лодок ВМФ. Работа включена в научный план Вооруженных сил Российской Федерации на 2023 год и плановый период 2024 и 2025 годов. Цель работы - обосновать методы и технические решения для обеспечения интеллектуального контроля пожарной опасности в корабельных помещениях различного назначения. Заказчиками НИР выступают Управление развития технологий искусственного интеллекта Министерства обороны Российской Федерации и Морской научный комитет Военно-Морского Флота. Головной исполнитель: Военный учебно-научный центр Военно-Морского Флота «Военно-морская академия».

Впервые будет проведена работа по теоретическому обоснованию методов и технологий, позволяющих интеллектуализировать процесс контроля пожарной безопасности в корабельных помещениях. По результатам выполнения НИР будет принято решение о целесообразности внедрения функций интеллектуальной поддержки в системы обеспечения живучести кораблей (судов обеспечения) и подводных лодок ВМФ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Требования ВМФ к системам информационной поддержки по борьбе за живучесть подводной лодки. Д-5539. – СПб.: НИИ кораблестроения и вооружения ВМФ, 2013.
2. Киришнер, А.Л., Корманов В.М. Система информационной поддержки при борьбе за живучесть надводных кораблей и подводных лодок // Научно-технический сборник «Системы управления и обработки информации». – 2000. – Вып. 1.
3. Никитин Е.В. Некоторые проблемы обеспечения живучести кораблей и судов ВМФ // Военная мысль. – 2016.
4. Шилов К.Ю., Бобрович В.Ю., Поленин В.И., и др. Автоматизация процессов борьбы за живучесть корабля, судна: коллективная монография. – 3-е изд. испр. и доп. – СПб.: ИАП БЖКС, 2022. – 506 с.
5. Круглеевский В.Н. Принципы формирования комплекса источников первичной информации, необходимого для диагностирования пожарной опасности контролируемого объекта // Сб. материалов научно-технической конференции. – СПб.: ВМИИ, 2000.
6. Артамонов В.С., Круглеевский В.Н., Скороходов Д.А., Поляков А.С. Судовые системы пожарной сигнализации. От прошлого в будущее. – СПб.: Изд-во университета ГПС МЧС России, 2013.
7. Соловьев В.А., Круглеевский В.Н., Колесник В.А. Процесс контроля пожарной опасности в корабельных помещениях, как задача распознавания образов // Морской вестник. – 2006. – № 3.
8. Образцов И.В., Круглеевский В.Н. Подход к развитию систем пожарной сигнализации как к системам распознавания образов // Сб. трудов всероссийской научно-теоретической конференции. – СПб.: ВМПИ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия», 2015.
9. Образцов И.В., Круглеевский В.Н., Казакевич Н.В. Анализ методов и способов автоматизированного обнаружения и контроля пожара и пожарной опасности в корабельных помещениях // Сб. научных трудов ВУНЦ ВМФ «ВМА». – СПб.: ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия», 2015.
10. Образцов И.В., Круглеевский В.Н., Цатков А.П. Повышение эффективности корабельных систем пожарной сигнализации путем реализации функции освещения обстановки в аварийном помещении // Сб. статей Международной научно-практической конференции «Кораблестроение в XXI веке: состояние, проблемы, перспективы» ВОКОР-2018. – СПб., 2018.
11. Соловьев С.Н., Пушкарев О.П., Цымбаревич В.А., Бледнов Д.А., Круглеевский В.Н. Общие технические требования к системам корабельного (судового) мониторинга и комплексам технических средств охраны надводных кораблей и судов обеспечения Военно-Морского Флота. – СПб., 2016.
12. Пуха Г.П. Технологии реализации интеллектуальной поддержки принятия решения: учебник. – СПб.: ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия», 2018. – 224 с.
13. Бухаров Е.О., Поляков В.Р. Искусственный интеллект как перспективная основа методов формализованного прогнозирования // Военная мысль. – 2019. – № 4. – С. 81-86.

14. *Образцов И.В., Круглеевский В.Н., Гусева А.И., Малыхина Г.Ф.* Использование нейросетевой модели обработки данных в системах обнаружения пожаров для определения места возгорания // *Морские интеллектуальные технологии*. – 2019. – № 2 (44). – Т. 2. – С. 93-101.
15. *Образцов И.В., Круглеевский В.Н., Наумов С.К., Кузнецов А.В.* Судовое устройство определения источника возгорания мультикритериальным пожарным извещателем с использованием нейронного классификатора. Патент на полезную модель № 198734 от 24 июля 2020 г., патентообладатель: ООО «НПО Пожарная автоматика сервис».
16. *Образцов И.В., Круглеевский В.Н., Гусева А.И., Малыхина Г.Ф.* Способ определения местоположения очага пожара с использованием многослойного рекуррентного персептрона. Заявка на изобретение № 2021117160 от 12 декабря 2022 г., патентообладатель: ФГАОУ ВО «СПбПУ».
17. *Образцов И.В., Круглеевский В.Н.* Методика автоматизированного распознавания пожара в корабельных помещениях // *Сб. научных трудов III Научно-практической конференции «Современные технологии автоматизации борьбы за живучесть (АПБЖ-2015)»*. – СПб.: Клуб Моряков-подводников и ветеранов ВМФ, 2015.
18. *Образцов И.В., Круглеевский В.Н., Дягилев М.В.* Усовершенствование тактики борьбы с корабельным пожаром в части обнаружения пожара, выбора и применения средств пожаротушения // *Сб. трудов всероссийской научно-теоретической конференции*. – СПб.: ВМПИ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия», 2016.
19. *Шпак В.Ф., Директоров Н.Ф., Мирошников В.И., Новойцев С.П., Наумов В.Н., Серегин А.В., Синицук Ю.И., Туровский О.М.* Информационные технологии в системе управления силами ВМФ (теория и практика, состояние и перспективы развития). – СПб.: Элмор, 2005. – 832 с.
20. *Козлов В.Н.* Системный анализ, оптимизация и принятие решений: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2011. – 244 с.

REFERENCES

1. *Trebovaniya VMF k sistemam informatsionnoy podderzhki po bor'be za zhivuchest' podvodnoy lodki. D-5539* [Navy requirements for submarine survivability information support systems. D-5539]. St. Petersburg: NII korablestroeniya i vooruzheniya VMF, 2013.
2. *Kirshner, A.L., Kormanov V.M.* Sistema informatsionnoy podderzhki pri bor'be za zhivuchest' nadvodnykh korabley i podvodnykh lodok [Information support system in the fight for the survivability of surface ships and submarines], *Nauchno-tekhnicheskiy sbornik «Sistemy upravleniya i obrabotki informatsii»* [Scientific and technical collection "Information management and processing systems"], 2000, Issue 1.
3. *Nikitin E.V.* Nekotorye problemy obespecheniya zhivuchesti korabley i sudov VMF [Some problems of ensuring the survivability of ships and vessels of the Navy], *Voennaya mysl'* [Military Thought], 2016.
4. *Shilov K.Yu., Bobrovich V.Yu., Polenin V.I., i dr.* Avtomatizatsiya protsessov bor'by za zhivuchest' korablya, sudna: kollektivnaya monografiya [Automation of the processes of fighting for the survivability of a ship, vessel: collective monograph]. 3rd ed. corr. and exp. St. Petersburg: IAP BZhKS, 2022, 506 p.
5. *Krugleevskiy V.N.* Printsipy formirovaniya kompleksa istochnikov pervichnoy informatsii, neobkhodimogo dlya diagnostirovaniya pozharной opasnosti kontroliruemogo ob"ekta [Principles of forming a complex of primary information sources necessary for diagnosing the fire hazard of a controlled facility], *Sb. materialov nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Collection of Materials of a Scientific and Technical Conference]. St. Petersburg: VMII, 2000.
6. *Artamonov V.S., Krugleevskiy V.N., Skorokhodov D.A., Polyakov A.S.* Sudovye sistemy pozharной signalizatsii. Ot proshlogo v budushchee [Ship fire alarm systems. From the past to the future]. St. Petersburg: Izd-vo universiteta GPS MChS Rossii, 2013.
7. *Solon'ko V.A., Krugleevskiy V.N., Kolesnik V.A.* Protsess kontrolya pozharной opasnosti v korabel'nykh pomeshcheniyakh, kak zadacha raspoznavaniya obrazov [The process of controlling fire danger in ship premises as a task of pattern recognition], *Morskoy vestnik* [Marine Bulletin], 2006, No. 3.
8. *Obraztsov I.V., Krugleevskiy V.N.* Podkhod k razvitiyu sistem pozharной signalizatsii kak k sistemam raspoznavaniya obrazov [Approach to the development of fire alarm systems as pattern recognition systems], *Sb. trudov vserossiyskoy nauchno-teoreticheskoy konferentsii* [A collection of works of the All-Russian Scientific and Theoretical Conference]. St. Petersburg: VMPI VUNTS VMF «Военно-морская академия», 2015.

9. Obratsov I.V., Kruglevskiy V.N., Kazakevich N.V. Analiz metodov i sposobov avtomatizirovannogo obnaruzheniya i kontrolya pozhara i pozharной opasnosti v korabel'nykh pomeshcheniyakh [Analysis of methods and methods for automated detection and control of fire and fire hazard in ship premises], *Sb. nauchnykh trudov VUNTS VMF «VMA»* [Collection of scientific works of the VUNC Navy "VMA."]. St. Petersburg: VUNTS VMF «Voenno-morskaya akademiya», 2015.
10. Obratsov I.V., Kruglevskiy V.N., Tsapkov A.P. Povyshenie effektivnosti korabel'nykh sistem pozharной signalizatsii putem realizatsii funktsii osveshcheniya obstanovki v avariynom pomeshchenii [Increasing the efficiency of ship fire alarm systems by implementing the function of lighting the situation in an emergency room], *Sb. statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Korablestroenie v XXI veke: sostoyanie, problemy, perspektivy» VOKOR-2018* [Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference "Shipbuilding in the 21st Century: State, Problems, Prospects" VOKOR-2018]. St. Petersburg, 2018.
11. Solov'ev S.N., Pushkarev O.P., Tsymbarevich V.A., Blednov D.A., Kruglevskiy V.N. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya k sistemam korabel'nogo (sudovogo) monitoringa i kompleksam tekhnicheskikh sredstv okhrany nadvodnykh korably i sudov obespecheniya Voenno-Morskogo Flota [General technical requirements for ship (ship) monitoring systems and complexes of technical means of protection of surface ships and support vessels of the Navy]. St. Petersburg, 2016.
12. Pukha G.P. Tekhnologii realizatsii intellektual'noy podderzhki prinyatiya resheniya: uchebnik. St. Petersburg: VUNTS VMF «Voenno-morskaya akademiya», 2018, 224 p.
13. Bukharov E.O., Polyakov V.R. Iskusstvennyy intellekt kak perspektivnaya osnova metodov formalizovannogo prognozirovaniya [Artificial intelligence as a promising basis for formalized forecasting methods], *Voennaya mysl'* [Military thought], 2019, No. 4, pp. 81-86.
14. Obratsov I.V., Kruglevskiy V.N., Guseva A.I., Malykhina G.F. Ispol'zovanie neyrosетеvoy modeli obrabotki dannykh v sistemakh obnaruzheniya pozharov dlya opredeleniya mesta vozgoraniya [Using a neural network data processing model in fire detection systems to determine the place of ignition], *Morskie intellektual'nye tekhnologii* [Marine Intelligent Technologies], 2019, No. 2 (44), Vol. 2, pp. 93-101.
15. Obratsov I.V., Kruglevskiy V.N., Naumov S.K., Kuznetsov A.V. Sudovoe ustroystvo opredeleniya istochnika vozgoraniya mul'tikriterial'nykh pozharных izveshchatelem s ispol'zovaniem neyronnogo klassifikatora. Patent na poleznuyu model' № 198734 ot 24 iyulya 2020 g., patentoobladatel': ООО «NPO Pozharnaya avtomatika servis» [Vessel device for determining the source of ignition by a multicritical fire detector using a neural classifier. Patent for utility model No. 198734 dated July 24, 2020, patent holder: NPO Fire Automation Service LLC].
16. Obratsov I.V., Kruglevskiy V.N., Guseva A.I., Malykhina G.F. Sposob opredeleniya mestopolozheniya ochaga pozhara s ispol'zovaniem mnogoslоynnogo rekurrentnogo perseptrona. Zayavka na izobretenie № 2021117160 ot 12 dekabrya 2022 g., patentoobladatel': FGAOU VO «SPbPU» [Method for Determining the Location of a Fire Source Using a Multi-layer Recurrent Perceptron. Application for the invention No. 2021117160 dated December 12, 2022, patent holder: FSAEI HE "SPbPU"].
17. Obratsov I.V., Kruglevskiy V.N. Metodika avtomatizirovannogo raspoznavaniya pozhara v korabel'nykh pomeshcheniyakh [Procedure for Automated Fire Recognition in Ship Rooms], *Sb. nauchnykh trudov III Nauchno-prakticheskoy konferentsii «Sovremennye tekhnologii avtomatizatsii bor'by za zhivuchest' (APBZH-2015)»* [Collection of scientific works of the III Scientific and Practical Conference "Modern Technologies for Automation of Survivability Control (APBZh-2015)"]. St. Petersburg: Klub Moryakov-podvodnikov i veteranov VMF, 2015.
18. Obratsov I.V., Kruglevskiy V.N., Dyagilev M.V. Usovershenstvovanie taktiki bor'by s korabel'nykh pozharom v chasti obnaruzheniya pozhara, vybora i primeneniya sredstv pozharotusheniya [Improvement of ship fire control tactics in terms of fire detection, selection and use of fire extinguishing equipment], *Sb. trudov vserossiyskoy nauchno-teoreticheskoy konferentsii* [A collection of works of the All-Russian Scientific and Theoretical Conference]. St. Petersburg: VMPI VUNTS VMF «Voenno-morskaya akademiya», 2016.

19. *Shpak V.F., Direktorov N.F., Miroshnikov V.I., Novoytsev S.P., Naumov V.N., Seregin A.V., Sineshchuk Yu.I., Turovskiy O.M.* Informatsionnye tekhnologii v sisteme upravleniya silami VMF (teoriya i praktika, sostoyanie i perspektivy razvitiya) [Information technologies in the management system of the Navy (theory and practice, state and development prospects)]. St. Petersburg: Elmor, 2005, 832 p.
20. *Kozlov V.N.* Sistemnyy analiz, optimizatsiya i prinyatie resheniy: ucheb. posobie [System analysis, optimization and decision-making: study manual]. St. Petersburg: Izd-vo politekhn. un-ta, 2011, 244 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.А. Петров.

Образцов Иван Викторович – ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия»; e-mail: lion-jan@ya.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 89119293044; к.т.н.; докторант.

Шкодывев Вячеслав Петрович – СПбПУ, НТК «Математическое моделирование и интеллектуальные системы управления»; e-mail: shkodyrev@spbstu.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 892194377-96; д.т.н., профессор; директор.

Obraztsov Ivan Viktorovich – VUNC Navy "Naval Academy"; e-mail: lion-jan@ya.ru; St. Petersburg, Russia; phone: +79119293044; cand. of eng. sc.; doctoral student.

Shkodyrev Vyacheslav Petrovich – SPbPU, NTK "Mathematical modeling and intelligent control systems"; e-mail: shkodyrev@spbstu.ru; St. Petersburg, Russia; phone: +79219437796; dr. of eng. sc.; professor; director.

Раздел III. Системы энергетики, приводная и датчиковая аппаратура

УДК 007.52:62.523.2:62.526

DOI 10.18522/2311-3103-2023-1-198-215

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

МОДУЛЬНЫЙ ШАРНИР С ПЕРЕМЕННОЙ ЖЕСТКОСТЬЮ ДЛЯ МАНИПУЛЯТОРОВ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ*

Рассматриваются вопросы построения шарниров манипуляторов, обладающих привнесённой упругостью и снабжённых при этом механизмом изменения величины этой упругости (регулируемой жёсткости). На сегодняшний день работоспособные шарниры с переменной упругостью (ШПУ) в России отсутствуют. В то же время в мире ведутся интенсивные исследования по различным типам таких шарниров и манипуляторов на их основе. Хотя до настоящего времени все созданные изделия по большей части носили экспериментальный и исследовательский характер, в ближайшее время можно ожидать появления и внедрения за рубежом опытных образцов ШПУ для решения конкретных практических задач, позволяющих строить манипуляторы с новыми качествами и повышенными техническими характеристиками. Такие манипуляторы будут востребованы при решении задач, связанных с контактными операциями, требующими повышенной точности, корректности и безопасности выполнения, например, в ситуациях нахождения робота и человека в едином операционном пространстве. Целью предлагаемого исследования является создание научно-технического задела в области построения шарниров с регулируемой жёсткостью в виде разработки методических рекомендаций по проектированию ШПУ под требуемые конкретные задачи и по применению их в составе манипуляционных систем. Для этого на начальном этапе исследования решаются задачи анализа и систематизации существующих технических решений механизмов регулирования жёсткости и построения собственного ШПУ для проведения впоследствии физических экспериментов. На сегодняшний момент существует огромное количество различных вариантов реализации ШПУ, имеющих свои преимущества для конкретных областей применения. Оптимальных устройств для всех типов задач одновременно не существует. Исходя из этого предлагается вести исследование ШПУ по трём наиболее перспективным на взгляд авторов направлениям, предполагающим принципиально различные варианты реализации переменной упругости. Объединение совершенно разных вариантов в рамках единой конструкции предложено реализовывать на основе модульного подхода к построению исследовательского ШПУ, что позволяет достаточно легко и без применения специальных инструментов реконфигурировать шарнир с одного варианта на другой, используя в то же время ряд общих (типовых) модулей, что существенно экономит ресурсы на создание и исследование такого шарнира. В статье приводится краткое описание принципа построения и конструктивных особенностей предлагаемого модульного исследовательского ШПУ и модулей регулирования жёсткости. Полученные результаты позволяют перейти к этапу изготовления макета и постановки физических экспериментов по исследованию ШПУ различных типов.

Роботы; манипуляторы; упругие манипуляторы; шарниры с переменной упругостью; модульность; конструкции упругих шарниров.

* Работа выполнена в рамках государственного задания на 2023 г. № 075-01595-23-00 на тему «Исследование конструкций и разработка методов управления мехатронными узлами с переменной жёсткостью» (FNRG-2022-0009, регистрационный номер 1021060307688-8-2.2.2).

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

**VARIABLE RIGIDITY MODULAR JOINT
FOR MANIPULATORS OF ROBOTIC SYSTEM**

The article considers the actuated joint designs with added elasticity and equipped with a mechanism for changing the value of this elasticity (adjustable stiffness) for robotic manipulators. To date, there are no workable joint actuators with variable stiffness (VSA) in Russia. At the same time, intensive research is being carried out around the world on various types of such joint actuators and manipulators based on them. Although until now all the products created have mostly been of an experimental and research nature, in the near future we can expect the appearance and implementation of prototypes of VSA to solve specific practical problems that make it possible to build manipulators with new qualities and improved technical characteristics. Such manipulators will be in demand when solving tasks related to contact operations that require increased accuracy, correctness and safety of execution, for example, in situations where a robot and a person are in a single operating space. The aim of the proposed study is to form a scientific and technical groundwork in the field of manipulator actuators design with adjustable stiffness in the form of developing methodological recommendations for designing VSAs for the required specific tasks and for using them as part of manipulation systems. To do this, at the initial stage of the study, the tasks of analyzing and systematizing the existing technical solutions for stiffness control mechanisms and constructing our own VSA for subsequent physical experiments are solved. To date, there are a huge number of different options for the implementation of VSAs, which have their own advantages for specific areas of application. There are no optimal devices for all types of tasks. Proceeding from this, it is proposed to conduct a study of VSAs in the three most perspective trends, in the opinion of the authors, using fundamentally different options for implementing the variable stiffness. The combination of completely different options within a single design is proposed to be implemented on the basis of a modular approach to constructing a research VSA, which makes it quite easy and without the use of any special tools to reconfigure the actuator joint from one option to another, using at the same time a number of common (typical) modules, which significantly saves resources for the development and study of such an actuator. The article provides a brief description of the design features of the proposed modular research VSA and stiffness control modules. The results obtained allow us to proceed to the stage of making a mockup VSA model and setting up physical experiments to study various types of VSAs.

Robots; manipulators; elastic joint manipulators; variable stiffness actuators; variable stiffness joints; modularity; compliant robotics.

Введение. На рубеже 1990-х и 2000-х годов в области робототехники сформировалось два основных подхода к построению механических систем: жёсткие манипуляторы и податливые (упругие) манипуляторы. Жёсткие манипуляторы включают лишь жёсткие приводные шарниры (в зарубежной литературе используется термин актуаторы), в то время как податливые содержат один или более податливый (упругий) шарнир. Жёсткий шарнир – это устройство, способное перемещаться в заданное положение либо следовать по заданной траектории, таким образом, что по достижении целевого положения такой шарнир остаётся в нём, какие бы внешние силы на него не воздействовали. Упругий шарнир, напротив, допускает отклонение от заданного положения равновесия, зависящее от приложенного внешнего усилия. Положением равновесия упругого шарнира является положение, которое он занимает при отсутствии внешнего воздействия.

Жёсткие манипуляторы получили широкое распространение в промышленной робототехнике [1, 2], в то время как упругие манипуляторы – в большом числе менее массовых областей, таких как создание антропоморфных и гуманоидных роботов [3], экзоскелеты различных типов [4, 5], манипуляторы для экстремальных условий [6], коллаборативные манипуляторы [7] и т.д. Одной из востребованных областей потенциального применения упругих шарниров являются манипуляторы роботов-ассистентов для людей с ограниченными возможностями [8]. Критически важным

требованием к таким манипуляторам является обеспечение безусловной безопасности при его взаимодействии с человеком как при нормальной работе, так и при сбоях, при одновременных точности и скорости выполнения операций, и упругие манипуляторы гораздо в более полной степени отвечают этим критериям [9].

Свойства податливости «традиционному» манипулятору можно придать и посредством системы управления (т.е. программно), что получило название «активной податливости» [10, 11]. Это не относится напрямую к подходам конструирования и может применяться в любых типах робототехнических систем из перечисленных выше, при наличии необходимых датчиков. Однако, несмотря на гибкость в применении, данный подход сам по себе обладает существенным недостатком: невозможностью обеспечить безопасность (а в общем случае – желаемое взаимодействие) в случае высокочастотных (импульсных) столкновений или существенно быстрых изменений внешней нагрузки, так как система управления обладает ограниченной и сравнительно низкой полосой пропускания относительно таких воздействий.

Применение «пассивной податливости», то есть, реализация её механическим способом, позволяет обеспечить требуемые свойства естественным образом. Полоса пропускания системы по отношению к быстро меняющимся внешним воздействиям определяется, в этом случае, преимущественно её механическими характеристиками. Это явление выражено тем сильнее, чем ниже механическая жёсткость системы. Отправной точкой в этом подходе считается публикация MIT (Massachusetts Institute of Technology) [12], где исследовались вопросы оценки полосы пропускания, устойчивости и законов управления для шарнира, в цепи передачи движения которого был установлен упругий элемент. С точки зрения обмена энергией и импульсом с внешним объектом при ударе, упругий элемент обеспечивает «расцепление» инерций двигателя с редуктором и инерции выходного звена, закреплённого после упругого элемента, то есть, в этот момент в обмене энергией и импульсом участвует только выходное звено, чья инерция и воспринимается внешним объектом, а воздействие на двигатель и редуктор практически не передаётся.

Кроме того, упругий элемент переводит микродеформации, возникающие при приложении нагрузки к жёстким манипуляторам и измеримые только при помощи специальных средств (тензорезисторов), в макродеформации, которые можно измерить датчиками положения. Для этого требуется минимум два датчика положения на шарнир, расположенных до и после упругого элемента (при чём датчиком до упругого элемента чаще всего выступает собственный датчик положения ротора двигателя). Следовательно, упругие шарниры позволяют достаточно точно и с высокой надёжностью измерять момент нагрузки, что в свою очередь позволяет реализовывать управление по моменту, в частности, изменять характер активной (программной) податливости. Однако, в момент столкновения процессы по-прежнему определяются механическими свойствами шарнира, которые являются постоянными.

Другой положительной стороной упругости является возможность запасать энергию, что полезно при циклических движениях, таких, как ходьба или бег, позволяя расходовать энергию более экономно. Однако, высокую эффективность такой подход будет показывать лишь вблизи резонанса, который опять-таки определяется механическими характеристиками и будет находиться на конкретной частоте (периодичности движений).

Итак, механическая упругость в шарнирах даёт следующие преимущества:

- ♦ смягчение удара при столкновении благодаря повышенной полосе пропускания до собственных механических характеристик,
- ♦ снижение инерции, участвующей в столкновении, и ударных нагрузок, передаваемых на элементы приводной части шарнира,
- ♦ повышение энергоэффективности при циклических движениях.

В то же время, с математической точки зрения, разный характер взаимодействий при контакте с различными объектами требует различных значений собственной жёсткости шарнира. Поэтому для того, чтобы в полной мере реализовать и максимизировать преимущества упругих шарниров, постоянной жёсткости оказывается уже недостаточно. Причём изменять жёсткость лучше не программными методами, а иметь возможность управления именно механической жёсткостью системы. Так возникла и была реализована идея шарниров с переменной упругостью (ШПУ), известных в англоязычной литературе как *variable stiffness actuators (VSA)* [13].

Так как идея применения ШПУ во многом основывается на природных чертах и способностях человека, важно рассмотреть, как с контактными воздействиями справляется человек. В целом, соударения можно разделить на две группы: детерминированные (*known*) и недетерминированные (*unknown*) [14]. В случае детерминированных соударений, таких как в случае ловли мяча, человек предугадывает величину энергии столкновения и, исходя из этого значения, адаптирует жёсткость суставов, чтобы рассеять эту энергию и избежать как достижения крайних положений в суставах, так и повреждения мышц. При недетерминированных соударениях, таких как падения при катании на лыжах, человек использует стратегию максимальных совместных сокращений (*maximum cocontraction*), рассеивая как можно больше энергии посредством мышц и предотвращая достижение крайних положений суставов. Это связано с тем, что последствия повреждения мышц опасны, но достижение крайних положений суставов гораздо более опасно, так как восстановление после таких травм гораздо сложнее.

ШПУ, по аналогии с этим, активно рассеивает энергию столкновения, увеличивая длительность процесса в сравнении с жёсткими шарнирами, так как масса звена и упругость шарнира образуют механический низкочастотный фильтр [15]. ШПУ как техническая система может изменять свой импеданс непосредственно на физическом уровне, вследствие чего, накладывая поверх данной возможности активное управление, т.е. регулятор шарнира, можно достичь более широкого диапазона эффективного импеданса, чем упругим шарниром с постоянной жёсткостью. Принцип изменения механического импеданса приводных систем заимствуется напрямую из природных опорно-двигательных систем, которые зачастую обладают таковой особенностью. ШПУ могут независимо изменять точку равновесия движущегося звена и жёсткость упругого взаимодействия.

Применение ШПУ позволяет преодолеть ряд недостатков шарниров с постоянной упругостью. Управление жёсткостью в ШПУ даёт возможность управлять резонансной частотой, приближая её к частоте желаемого циклического движения, минимизируя тем самым затраты энергии и фактически воплощая желаемое поведение в механических свойствах системы. Регулирование жёсткости при постоянном усилии в контурных задачах позволяет обеспечить повышенное качество отработки заданного усилия контакта. Движениям взрывного характера свойственны высокие скорости звеньев, набираемые за короткие интервалы времени, что требует больших ускорений. Чтобы разогнать выходной вал шарнира до значительной скорости, можно применить способ, заключающийся в блокировке выхода и работе привода на создание преднатяга в пружине, после чего резкая разблокировка приведёт к резкому разжатию пружины.

Технически переменная упругость реализуется посредством установки ещё одного привода той или иной природы с целью реализации того или иного механизма (принципа) регулировки жёсткости – отдельным модулем или совместно в составе единой приводной системы. Сегодня создано множество лабораторных образцов шарниров и манипуляторов с переменной упругостью, но, несмотря на это, практически нет информации как о применении подобных систем в хозяйственной жизни, так и о коммерчески доступных образцах.

Первые разработки ШПУ можно встретить ещё в публикациях 1990-х [16, 17], но достаточно активно они начали разрабатываться в 2000-е гг. [18, 19]. В 2013-2015 гг. вышла серия обзорно-аналитических статей, обобщившая накопленный опыт [20–22]. За последующие годы количество созданных ШПУ выросло ещё более значительно, при этом фокус по их разработке сместился из США и Европы в Юго-Восточную Азию, в первую очередь, Китай. Также на протяжении последних десяти лет велись работы по анализу данного класса шарниров, в том числе, определение ключевых параметров для сравнения, разработка методик проектирования и оптимизации, абстрактное описание ШПУ для различных задач.

Классификация шарниров с переменной упругостью. Обзор научно-технической информации по разработкам и исследованиям в области создания и развития ШПУ позволяет сделать ряд обобщений, помогающих систематизировать существующее многообразие их конструктивных реализаций и выделить наиболее интересные направления для проведения собственных исследований.

Прежде всего, можно отметить, что ШПУ могут быть разделены по физическому принципу механизма регулировки жёсткости на несколько классов, из которых в данной работе для нас интерес представляют механические и магнитные системы, отмеченные на рис. 1. По способу регулирования жёсткости можно выделить три группы: 1) использующие преднатяг пружины, создаваемый тем или иным способом, 2) использующие изменение передаточного отношения между пружиной и точкой приложения нагрузки, 3) использующие изменение физических параметров пружины в соответствии с известной формулой Гука

$$F = \frac{E \cdot A}{L_0} \Delta L, \quad (1)$$

где E – модуль упругости, A – площадь сечения упругого элемента, L – длина упругого элемента.

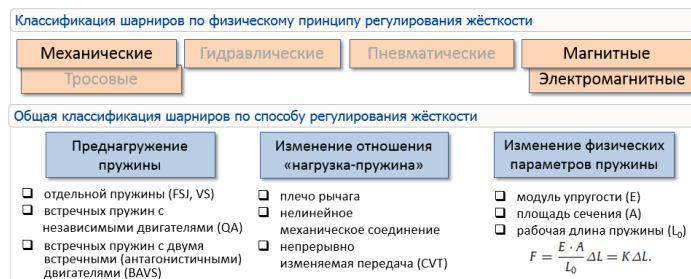


Рис. 1. Классификация ШПУ по физическому принципу механизма регулировки жёсткости и по способу регулирования

По принципу организации приводной системы можно выделить две большие группы ШПУ, наиболее часто реализуемые (рис. 2), – это шарниры со встречными (антагонистичными) приводами, где, чаще всего, используется система из двух одинаковых двигателей, работающих совместно, и шарниры последовательной (или независимой) схемы с функциональным разделением двигателей на основной приводной и регулировочный.

При дальнейшем углублении в конструктивные особенности построения механизмов регулировки жёсткости мы сможем отметить различные варианты реализации этих двух групп механизмов, примеры которых схематично приведены на рис. 3.

Так, механизмы с переменным рычагом могут быть реализованы тремя способами (во всех случаях свойства пружины не меняются): 1) изменением положения пружины, но расстояние от точки приложения силы до точки опоры постоян-

ное; 2) изменением точки приложения силы, но расстояние от пружины до точки опоры рычага постоянное; 3) изменением положения точки опоры от точки приложения силы до пружины, так что жёсткость механизма теоретически может меняться от нуля до бесконечности.

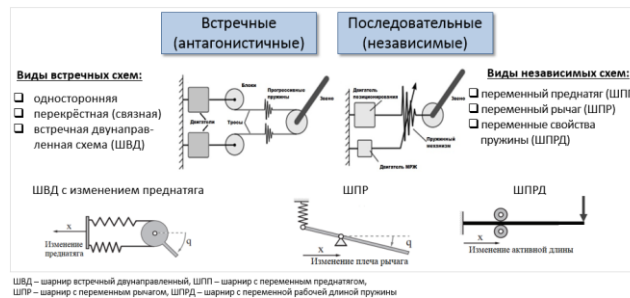


Рис. 2. Виды ШПУ по принципу организации приводной системы

Существуют также и различные варианты построения антагонистичных схем: 1) односторонняя, при которой каждый из двух приводных двигателей работает только на одно направление вращения шарнира; 2) двунаправленная, в которой оба двигателя работают совместно в каждом из направлений движения; 3) связанная, занимающая промежуточное положение между первыми двумя.

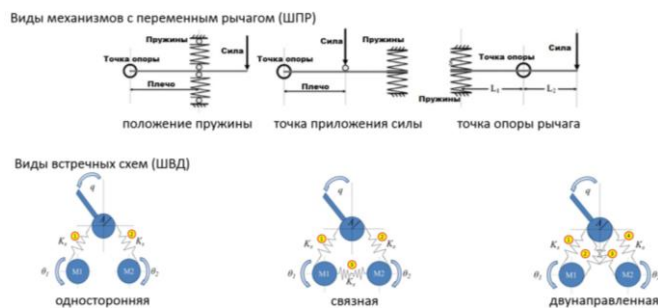


Рис. 3. Принципиальные схемы реализации механизмов с переменным рычагом (сверху) и механизмов с антагонистичными приводами (снизу)

Постановка задачи и выбор направления исследования. По результатам обзора литературных источников и анализа ШПУ как технической системы можно отметить следующее:

- ♦ интерес к разработке ШПУ в мире высок, что свидетельствует об актуальности данной тематики и востребованности для практической робототехники,
- ♦ наиболее перспективными областями применения ШПУ являются ноги шагающих роботов, манипуляторы для контактных и динамических задач, коллаборативные роботы, а также подвеска мобильных роботов для экстремальных сред, например, планетоходов,
- ♦ не существует единого технического решения построения ШПУ, оптимального для всех классов задач и областей применения, что требует отдельного изучения в плане оценки их преимуществ/недостатков и разработки, в конечном итоге, методики проектирования ШПУ под конкретные требования.

Научной проблемой, не позволяющей в настоящее время внедрять подобные шарниры в отечественные робототехнические системы, является отсутствие методики проектирования и отработанных методов и алгоритмов управления ШПУ, ис-

пользующих различные принципы регулирования жёсткости. Для решения данной проблемы методами компьютерного моделирования и физических экспериментальных исследований, необходима разработка соответствующих математических и компьютерных моделей ШПУ различных типов, разработка конструкции и создание экспериментальных образцов ШПУ, проведение компьютерных и физических исследований разработанных алгоритмов и способов управления ШПУ, реализующих различные принципы регулировки жёсткости, анализ достоинств и недостатков различных подходов к изменению жёсткости ШПУ. Выполнение данных шагов позволит получить компетенции, опыт и научно-технический задел по проектированию и применению отечественных ШПУ и манипуляционных систем на их основе.

Для определённости в качестве объекта для исследований рассматривается шарнир манипулятора, сравнимый по силовыми и мощностным параметрам с шарниром плеча известного и широко используемого робота типа Universal Robotics UR5e. В качестве исходных данных для исследуемого ШПУ принят выходной момент не менее 100 Нм и потребляемая мощность не более 450 Вт.

В виду огромного количества возможных вариантов построения ШПУ, представленных в научной литературе, невозможности разработки единой конструкции под все задачи и, по большей части, фундаментального характера выполняемого исследования были приняты три направления исследований по трём типам ШПУ, отличающимся принципом регулирования жёсткости.

В соответствии с представленными классификациями это:

1) шарнир встречного (зависимого) типа с антагонистичными приводами (работающими совместно как на внешнюю нагрузку, так и на изменение величины жёсткости) – ШПУ с механической регулировкой жёсткости, с преднагружением пружины, со встречными пружинами и двумя встречными (антагонистичными) двигателями (ШВД),

2) шарнир последовательного типа с независимыми приводами (один из которых играет роль основного привода, второй – привода регулировки величины жёсткости) и механизма регулировки жёсткости (МРЖ) на основе кулачкового механизма с плавающей пружиной – ШПУ с механической регулировкой жёсткости, с преднагружением пружины, с отдельной пружиной и двумя независимыми двигателями, т.е., шарнир с переменным преднатягом (ШПП),

3) шарнир последовательного типа с магнитной муфтой с регулируемой величиной жёсткости (упругости) передачи момента на выходной вал – ШПУ с применением магнитного МРЖ с электромеханическим приводом настройки жёсткости.

Теоретические основы проектирования ШПУ. Для того, чтобы анализировать и в дальнейшем управлять ШПУ, а также проектировать ШПУ с достижением желаемых характеристик, необходимо описать их характеристики посредством математической модели, учитывающей как статическое, так и динамическое поведение.

В первую очередь необходимо последовательно определить некоторые понятия, которые используются при математическом описании ШПУ. Так, наиболее простым случаем механического импеданса является линейная пружина, т.е., кусок материала, обеспечивающий пропорциональную зависимость между приложенной силой f и смещением от положения равновесия $y = cf$. Коэффициент пропорциональности c называется податливостью. Обратное отношение, то есть $f = ky$ вводит понятие жёсткости пружины $k = c^{-1}$. Пружина запасает потенциальную энергию упругости U , первая производная которой по смещению представляет собой силу, а вторая производная – коэффициент жёсткости (константу).

Понятия податливости и жёсткости можно обобщить, перейдя от статического случая (положения равновесия) к динамическому, через понятия адмиттанса (admittance) и импеданса (impedance) соответственно. Для этого необходимо рассмотреть

демпфирующий элемент (амортизатор), имеющий вязкую природу, и противодействующий смещению пропорционально скорости, соответствующий созданию ускорения для деформируемой массы. В случае простой системы «масса-пружина-амортизатор» импеданс описывается линейным дифференциальным уравнением

$$f = m\ddot{y} + b\dot{y} + ky, \quad (2)$$

описывающим отношение двух функций времени: $y(t)$ и $f(t)$. Такое уравнение описывает динамическую систему. Переходя к преобразованию Лапласа, импеданс определяется как оператор, связывающий функции усилия и скорости:

$$Z(s) = \frac{F(s)}{V(s)} = \frac{ms^2 + bs + k}{s}. \quad (3)$$

Взаимно обратный оператор представляет собой адмиттанс $A(s)$.

Схема последовательного ШПУ представлена на рис.4 [15].

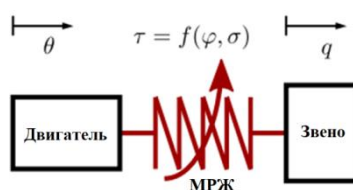


Рис. 4. Структурная схема последовательного ШПУ

Вывод модели традиционно выполняется через Лагранжиан:

$$L(x, \dot{x}) = T(x, \dot{x}) + U(x), \quad (4)$$

$$x = \begin{pmatrix} q \\ \theta \\ \sigma \end{pmatrix} \in R^3, \quad (5)$$

$$\frac{d}{dx} \frac{\partial L(x, \dot{x})}{\partial \dot{x}} - \frac{\partial L(x, \dot{x})}{\partial x} = Q, \quad (6)$$

где T и U – кинетическая и потенциальная энергии системы, q – положение выходного звена, θ – положение двигателя, σ – положение настроечного двигателя, Q – обобщённая равнодействующая внешних сил.

В развёрнутом виде модель последовательного ШПУ записывается следующим образом [23]:

$$\begin{cases} M\ddot{q} + b_j\dot{q} + \tau_E(\sigma, \varphi) = \tau_{ext} + g(q) \\ B_\theta\ddot{\theta} + b_\theta\dot{\theta} - \tau_E(\sigma, \varphi) = u_\theta \\ B_\sigma\ddot{\sigma} + b_\sigma\dot{\sigma} + \tau_r(\sigma, \varphi) = u_\sigma \end{cases}, \quad (7)$$

где M – момент инерции нагрузки, b_j , b_θ , b_σ – коэффициенты вязкого трения, g – момент от действия силы тяжести на нагрузку, B_θ , B_σ – момент инерции роторов двигателей, τ_E – момент на выходе шарнира, τ_{ext} – момент, приложенный внешним объектом, τ_r – момент реакции на приводе регулирования жёсткости, u_θ , u_σ – задающие моменты на двигателях.

Первое уравнение отражает твердотельную механику (выход шарнира), второе – уравнение основного двигателя, отвечающего за поворот шарнира, а третье – уравнение двигателя, отвечающего за изменение жёсткости. При этом распространено допущение, что можно пренебречь динамикой привода регулирования жёсткости [15].

Аналогично можно представить модель ШПУ со встречными антагонистичными приводами. Если обозначить $\varphi_1 = \theta_{m1} - q$, $\varphi_2 = \theta_{m2} - q$, где θ_{m1} , θ_{m2} – углы поворота двигателей 1 и 2, то при общепринятых допущениях, модель будет иметь вид

$$\begin{cases} M\ddot{q} = \tau_{e1}(\varphi_1) + \tau_{e2}(\varphi_2) \\ B_1\ddot{\theta}_{m1} + D_{m1}\dot{\theta}_{m1} + \tau_{e1}(\varphi_1) = \tau_1, \\ B_2\ddot{\theta}_{m2} + D_{m2}\dot{\theta}_{m2} + \tau_{e2}(\varphi_2) = \tau_2 \end{cases} \quad (8)$$

где τ_{e1} и τ_{e2} – моменты на пружинах каждого привода, являющиеся нелинейными функциями от упругой деформации пружин. Общий упругий момент на выходе шарнира и моменты на отдельных упругих элементах определяются соответственно как

$$\tau_e = \tau_{e1}(\varphi_1) + \tau_e(\varphi_2) \quad (9)$$

$$\tau_{ek} = \left(\frac{\partial U_e}{\partial \varphi_k} \right)^T. \quad (10)$$

Модульный принцип построения шарнира. В настоящей работе стоит задача создания исследовательского ШПУ в трёх вариантах исполнения механизма реализации переменной упругости. В связи с этим, с точки зрения удобства реконфигурации шарнира с одного на другой вариант, установки его на исследовательский стенд, обслуживания, возможной последующей модификации/модернизации, целесообразным представляется построение ШПУ в виде модульной конструкции. Такой подход с другой стороны, очевидно, приведёт к избыточности конструкции с ухудшением её массогабаритных характеристик, что представляется менее существенным обстоятельством в сравнении с отмеченными достоинствами, с учётом чисто исследовательских целей проекта.

ШПУ для исследований предполагается создавать на базе нескольких модулей, часть которых являются общими для всех конструкций:

модуль основного двигателя (общий) – 2 шт.,

модуль редуктора (общий) – 2 шт.,

модуль тормоза (общий) – 2 шт.,

модуль датчика положения (общий) – 3 шт.,

модули реализации переменной упругости: оппозитного привода, пружинного механизма регулируемой жёсткости или магнитной упругой муфты.

Таким образом, используя перечисленные модули предполагается построение ШПУ в трёх вариантах:

ШПУ встречного типа с антагонистичными приводами,

ШПУ последовательного типа с независимыми приводами,

ШПУ с магнитной регулируемой упругой муфтой.

Все модули выполняются с полым валом, что позволяет стыковать их вдоль оси, комбинируя несколько однотипных модулей (например, электродвигателей или редукторов) в одном шарнире. Стыковка модулей друг с другом осуществляется с помощью накладных стяжных хомутов, устанавливаемых на конусные фланцы, что позволяет быстро заменить один модуль на другой без применения специального инструмента.

На рис. 5–7 представлены блок-схемы возможных компоновок модулей при построении ШПУ трёх типов. На этих рисунках приняты следующие обозначения: Д1, Д2 – модули основного двигателя, ДВВ – датчик выходного вала, ДР – двигатель привода регулировки упругости, ЛП – модуль механизма линейного перемещения привода регулировки магнитной муфты, ММ – модуль магнитной муфты, ОУ – объект управления, Р – модуль редуктора, Т – модуль тормоза, У1 – модуль упругости ШПУ встречного (зависимого) типа, У2 – модуль упругости ШПУ последовательного (независимого) типа.

Исследовательские цели проекта требуют оснащения ШПУ несколькими датчиками положения. Руководствуясь модульным принципом, изначально рассматривались варианты выполнения датчика для измерения абсолютного углового положения вала (ДВВ на схемах) в виде модуля с типовыми интерфейсами соединения аналогично остальным модулям шарнира. Такие схемы соответствуют вариантам А1 на рис. 5–7.

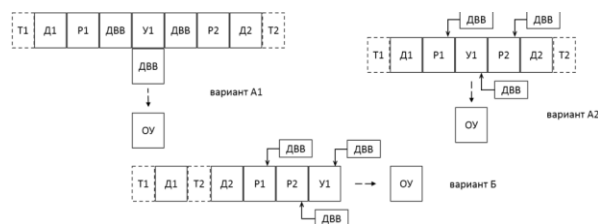


Рис. 5. Схемы построения ШПУ встречного (зависимого) типа



Рис. 6. Схемы построения ШПУ последовательного (независимого) типа

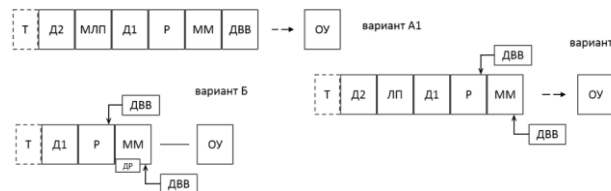


Рис. 7. Схемы построения ШПУ с магнитной регулируемой муфтой

Однако, даже на уровне схем видно, что подобное решение вызывает чрезмерную избыточность и громоздкость конструкции, неоправданную даже с учётом исследовательской специфики разрабатываемых шарниров. Учитывая, что используемый датчик положения может быть достаточно компактным, более целесообразным представляется отход в этом случае от концепции однотипных модулей и выполнение модуля датчика положения ДВВ в виде отдельного небольшого модуля, пристыковываемого в требуемом месте. Поэтому варианты А1 заменены на более компактные варианты А2 и далее не рассматриваются. При этом для ШПУ встречного типа (рис. 5) и ШПУ с магнитной муфтой (рис. 7) помимо варианта А2 приведены альтернативные варианты Б.

Вариант А2 ШПУ встречного типа (рис.5) построен по Т-образной схеме. В этом случае модуль упругости У1, выполняющий роль суммирующего дифференциального механизма, должен иметь два входа и один выход, расположенный под углом 90° относительно входов. В то же время исполнение модулей с полым валом даёт возможность более простой линейной компоновки ШПУ встречного типа по варианту Б, который и принят в качестве рабочего.

Вариант А2 ШПУ с магнитной муфтой (рис. 7) также имеет линейную компоновку. Недостатком этого варианта является то, что модуль магнитной муфты ММ конструктивно отделён от модуля механизма линейного перемещения ЛП, приводом которого служит модуль основного двигателя Д2, мощность которого избыточна для данной функции. Преимуществом этого варианта является использование однотипных модулей. В то же время, вариант Б предлагает более компактную компоновку, предполагая модификацию модуля магнитной муфты ММ путём интеграции в единый модуль самой магнитной муфты и механизма линейного перемещения вместе с отдельным маломощным приводом регулировки. В этом случае данный вариант по компактности становится сравним с наиболее компактным из представленных схем – вариантом А2 ШПУ последовательного типа (см. рис. 6). На первом этапе в качестве рабочего принят более простой вариант А2 ШПУ с магнитной муфтой с возможной реализацией впоследствии более компактного варианта Б этого шарнира.

Краткое описание конструкции исследовательского шарнира с переменной упругостью. ШПУ в каждом из трёх исполнений включает типовые модули электродвигателя, редуктора, тормоза и датчика положения вала, которые объединяются с тем или иным модулем реализации переменной упругости.

На рис. 8–10 показаны конструктивно-компоновочные схемы шарнира в трёх вариантах исполнения. Цифрами на рисунках обозначены: 1 – модуль приводного двигателя, 2 – модуль редуктора, 3 – модуль тормоза, 4 – модуль датчика положения, 5 – модуль регулировки упругости с суммирующим дифференциалом, 6 – модуль регулировки упругости на основе пружинно-кулачкового механизма, 7 – модуль магнитной муфты с регулируемой упругостью, 8 – хомут накидной.

Соединение модулей между собой, за исключением модуля датчика положения вала 4, осуществляется с помощью накидных хомутов 8 двух типоразмеров. Модуль датчика положения вала выполнен на основе оптического абсолютного углового энкодера типа ЛИР-ДА119А производства АО «СКБ ИС» [24], имеющего компактные размеры, и устанавливается на винтах на корпусе в соответствии со схемами на рис. 5–7.

Приводные модули выполнены на основе бесколлекторного встраиваемого вентильного электродвигателя типа FL70BL19 со встроенным датчиком Холла для измерения углового положения вала [25] и волнового редуктора «Сервосила» с передаточным отношением 160 [26]. Модуль тормоза реализован таким образом, что электроэнергия требуется только для его переключения, в результате чего не происходит перегрева обмоток актуатора тормоза. Такая схема недостаточно надёжна, когда важна немедленная фиксация шарнира при внезапном отключении питания, однако в лабораторных условиях обеспечивает экономную и надёжную эксплуатацию. Для привода тормоза выбран двигатель с осевым направлением магнитного потока [27–30], фиксация ротора тормоза производится с помощью механизма типа «винт-гайка». Корпусные детали модулей выполняются из пластика методом 3D-печати. В качестве материала используется полиэтилентерефталатгликоль (PETG), что обосновывается сочетанием прочности и технологичности, а также эстетическими свойствами поверхности.

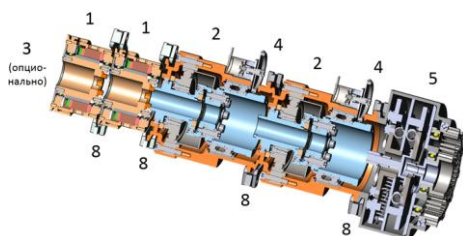


Рис. 8. Компоновка ШПУ встречного (зависимого) типа с антагонистичными приводами

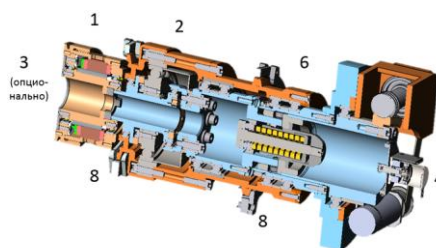


Рис. 9. Компоновка ШПУ последовательного типа с независимыми приводами

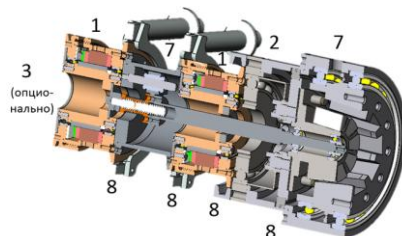
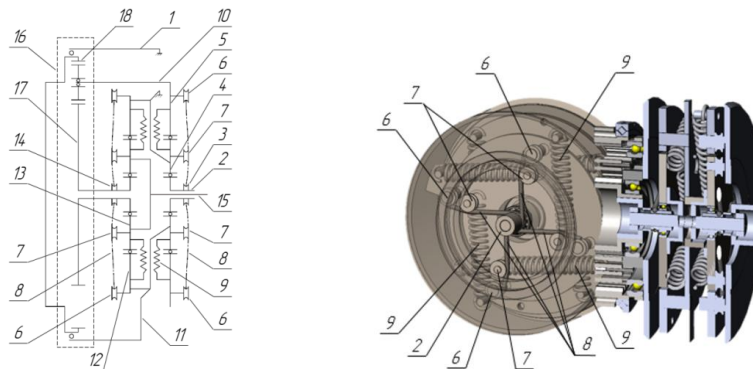


Рис. 10. Компоновка ШПУ с магнитной регулируемой упругой муфтой

Наиболее интересными частями ШПУ являются модули реализации переменной упругости, на которых остановимся подробнее.

Кинематическая и конструктивная схемы модуля упругости с суммирующим дифференциалом для построения ШПУ встречного типа с антагонистичными приводами показаны на рис. 11. Модуль включает две основные части: дифференциальный суммирующий механизм (позиция 16) на основе планетарной передачи и модуль нелинейной упругости на основе системы тросово-блочных механизмов.



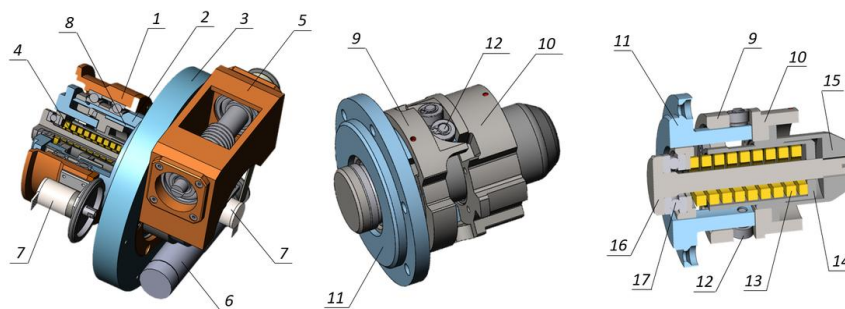
1 – корпус, 2 – приводной вал 1, 3 – барабан 1 намотки тросов, 4 – диск внутренний 1 с направляющими роликами, 5 – диск внешний 1 с опорными роликами, 6 – ролик опорный, 7 – ролик направляющий, 8 – трос, 9 – пружина, 10 – звено выходное ряда 1 (водило суммирующего дифференциала), 11 – диск промежуточный (корпус), 12 – диск внешний 2 с опорными роликами, 13 – диск внутренний 2 с направляющими роликами, 14 – барабан 2 намотки тросов, 15 – приводной вал 2, 16 – суммирующий дифференциал, 17 – солнечная шестерня, 18 – эпицикл (выходное звено модуля)

Рис. 11. Кинематическая схема (слева) и конструкция (справа) тросово-блочного механизма модуля нелинейной упругости с суммирующим дифференциалом

Реализация нелинейной упругости осуществляется в блочном механизме, включающем две системы (два идущих друг за другом ряда) из четырёх тросов 8, наматываемых на центральный барабан 2 или 14 с одного конца, закреплённых с другого конца на опорных роликах 6 и перекинутых через направляющие ролики 7. Скручиванию внешних дисков 5 и 12 относительно внутренних дисков 4 и 13 препятствуют пружины растяжения 9. При этом внешний диск 5 первого ряда механизма соединён с водилом 10 планетарного механизма суммирующего дифференциала, внутренний диск 4 первого ряда соединён с внешним диском 12 второго ряда и корпусом 1 (т.е. неподвижны), барабан 14 намотки тросов второго ряда соединён с солнечной шестерней планетарного механизма. Механизм имеет два входных приводных вала (позиции 2 и 15), первый из которых приводит во вращение барабан 3 намотки тросов первого ряда, второй – внутренний диск 13 второго ряда. Вращение приводных валов 2 и 15 в одном направлении приводит к работе планетарного механизма в режиме блокировки с вращением всех звеньев с одинаковой скоростью (как одно целое). Вращение приводных валов в противоположных направлениях приводит к взведению упругих механизмов и повышению жёсткости модуля.

Общая конструкция модуля пружинного механизма регулируемой жёсткости представлена на рис. 12. Модуль включает пластиковый корпус 1 с фланцем крепления под накидной хомут, в котором на подшипниковых опорах установлен подвижный корпус 2, связанный с выходным фланцем 3. На выходном фланце установлен привод регулировки жёсткости 5, включающий коллекторный электродви-

гатель 6 в сборе с планетарным редуктором, соединённый через ременную зубчатую передачу с червячным редуктором. Внутри подвижного корпуса установлен кулачковый механизм регулировки жёсткости 4. Угловое положение подвижного корпуса 2 относительно неподвижного корпуса 1 измеряется модулем датчика положения вала 7. Ещё один модуль датчика положения измеряет поворот вала привода регулировки жёсткости 8 относительно корпуса привода (т.е., выходного фланца модуля).



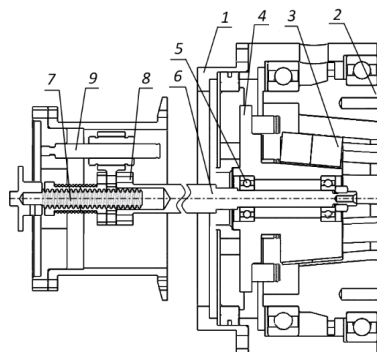
1 – корпус неподвижный, 2 – корпус подвижный, 3 – выходной фланец, 4 – механизм регулировки жёсткости, 5 – привод механизма регулировки жёсткости, 6 – двигатель привода механизма регулировки, 7 – модуль датчика положения вала, 8 – вал привода регулировки, 9 – кулачковый диск первый (ведущий), 10 – кулачковый диск второй (регулируемый), 11 – водило с присоединительным фланцем, 12 – ролик, 13 – пружина, 14 – стакан первого кулачкового диска, 15 – стакан второго кулачкового диска, 16 – винт, 17 – подшипник упорный

Рис. 12. Устройство модуля регулировки жёсткости на основе пружинно-кулачкового механизма

Механизм регулировки жёсткости состоит из двух кулачковых дисков 9 и 10, стягиваемых между собой пружиной 11 посредством стаканов 14 и 15 и регулировочного винта 16. По профилированным рабочим поверхностям кулачковых дисков перемещаются ролики 12, установленные на водиле 11, закреплённом на выходном элементе модуля редуктора шарнира. Профиль рабочих поверхностей кулачковых дисков имеет вид экспоненциальной зависимости. Включение привода регулировки на неподвижном шарнире, находящемся в состоянии равновесия, приводит к относительному закручиванию кулачковых дисков 9 и 10 с одновременным осевым смещением кулачкового диска 9 в сторону фланца водила 11 благодаря распиранью дисков роликами, находящимися на неподвижном в этот момент водиле. Такая ситуация приводит к сжатию пружины 11 и соответствует увеличению жёсткости механизма.

Общее устройство модуля магнитной регулируемой упругой муфты показано на рис. 13. Статор и ротор муфты (позиции 2 и 3) снабжены постоянными NdFe-магнитами. Регулировочный винт 7 приводится во вращение от двигателя регулировки жёсткости, а гайка с упорной резьбой 8, входящая в зацепление с резьбой винта регулировки жёсткости, способна перемещаться линейно по своим направляющим, и присоединена к регулировочному штоку 6. Перемещаясь, регулировочный шток через подшипниковые опоры толкает втулку ротора, в которой установлены магниты ротора муфты 3. Втулка ротора соединяется с предыдущим модулем шарнира (модулем редуктора) штифтами по скользящей посадке, что обеспечивает передачу вращательного момента на ротор, позволяя ему перемещаться вдоль оси. При смещении ротора вдоль оси изменяется воздушный зазор между магнитами ротора и статора, в результате чего изменяется абсолютная величина

магнитной силы между ними. При повороте ротора внутри статора возникает возвращающая сила, пропорциональная силе притяжения между полюсами ротора и статора, и при малых отклонениях (менее половины ширины полюса) примерно пропорциональная углу поворота ротора. Таким образом, изменение воздушного зазора меняет коэффициент пропорциональности возвращающей силы углу поворота, что эквивалентно изменению жёсткости шарнира. Для регулировки жёсткости шарнира используется базовый модуль основного двигателя, что не является оптимальным с точки зрения массогабаритных характеристик, но позволяет сократить затраты на разработку и изготовление макета для отработки шарнира, что приоритетно на текущем этапе исследований.



1 – корпус, 2 – статор муфты, 3 – ротор муфты,
4 – втулка ротора, 5 – опоры втулки, 6 – регулировочный
шток, 7 – регулировочный винт, 8 – гайка с упорной резьбой,
9 – направляющие гайки

Рис. 13. Модуль магнитной регулируемой упругой муфты

Заключение. Направления дальнейших исследований. Главные целью проводимого исследования является создание научно-технического задела в области создания шарниров с регулируемой жёсткостью, разработка методических рекомендаций по проектированию ШПУ под требуемые конкретные задачи и по применению их для выполнения этих задач в составе манипуляционных систем, обладающих новыми качествами и повышенными техническими характеристиками. На сегодняшний день работоспособные ШПУ в России отсутствуют. В мире ведутся интенсивные исследования по разработке различных типов ШПУ и манипуляторов на их основе. В то же время до настоящего времени все созданные изделия по большей части носят экспериментальный и исследовательский характер, хотя, благодаря существенной и продолжительной активности зарубежных исследователей в этом направлении, в ближайшее время уже можно ожидать появления и внедрения опытных образцов для решения конкретных практических задач.

Выполненные авторами первоначальные исследования выявили большой интерес в мире к данной тематике, что позволяет говорить об её актуальности. Анализ большого массива источников, посвящённых проблеме создания ШПУ, позволил сделать обобщения по их типам, сделать выводы о сильных и слабых сторонах некоторых технических решений и выделить ряд перспективных, по мнению авторов, направлений исследований, которые решено было сфокусировать на ШПУ с тремя различными типами механизмов регулирования жёсткости. Такой подход связан с тем, что ни одно из применяемых при построении ШПУ технических решений не является идеальным, имея свои особенности, из которых следуют достоинства и недостатки в конкретных условиях, определяющие целесообразную область (нишу) их потенциального применения. Научная значимость полученных на

данном этапе результатов также заключается в предложенной модульной архитектуре шарнира, позволяющей исследовать разные типы ШПУ в рамках одной конструкции. В настоящее время разработаны предварительные имитационные модели ШПУ в трёх вариантах исполнения, описание которых вышло за рамки настоящей статьи, проведено компьютерное моделирование динамики и прочности шарнира в трёх исследуемых вариантах ШПУ. Схожесть результатов моделирования с ожиданиями на основе физических законов и логики показывает принципиальную достоверность разработанных компьютерных моделей.

Дальнейшие направления исследований направлены на создание действующего макетного образца модульного исследовательского шарнира с регулируемой упругостью, разработку алгоритмов управления таким шарниром и манипулятором, реализующих различные подходы к регулированию жёсткости, уточнение моделей динамики подобных шарниров, проведение физических исследований ШПУ различных типов и формирование рекомендаций по проектированию и применению ШПУ и манипуляторов на их основе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hu J. [et al.]. Robotic deburring and chamfering of complex geometries in high-mix/low-volume production applications // 2020 IEEE 16th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). – IEEE, 2020. – P. 1155-1160.
2. Sága M. [et al.]. Case study: Performance analysis and development of robotized screwing application with integrated vision sensing system for automotive industry // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2020. – Vol. 17, No. 3. – P. 1729881420923997.
3. Ott C. [et al.]. A humanoid two-arm system for dexterous manipulation // 2006 6th IEEE-RAS international conference on humanoid robots. – IEEE, 2006. – P. 276-283.
4. Zhou L. [et al.]. A Novel Portable Lower Limb Exoskeleton for Gravity Compensation during Walking // 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – IEEE, 2020. – P. 768-773.
5. Zimmermann Y. [et al.]. ANYexo: A versatile and dynamic upper-limb rehabilitation robot // IEEE Robotics and Automation Letters. – 2019. – Vol. 4, No. 4. – P. 3649-3656.
6. Jaekel S. [et al.]. Design and operational elements of the robotic subsystem for the e. deorbit debris removal mission // Frontiers in Robotics and AI. – 2018. – Vol. 5. – P. 100.
7. AlAttar A., Rouillard L., Kormushev P. Autonomous air-hockey playing cobot using optimal control and vision-based bayesian tracking // Annual Conference Towards Autonomous Robotic Systems. – Springer, Cham, 2019. – P. 358-369.
8. Groothuis S.S., Stramigioli S., Carloni R. Lending a helping hand: Toward novel assistive robotic arms // IEEE robotics & automation magazine. – 2013. – Vol. 20, No. 1. – P. 20-29.
9. Bicchi A. et al. Variable stiffness actuators for fast and safe motion control // Robotics research. The eleventh international symposium. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2005. – P. 527-536.
10. Albu-Schäffer A. [et al.]. The DLR lightweight robot: design and control concepts for robots in human environments // Industrial Robot: an international journal. – 2007.
11. Al-Shuka H.F.N. [et al.]. Active impedance control of bioinspired motion robotic manipulators: An overview // Applied bionics and biomechanics. – 2018. – Vol. 2018.
12. Pratt G.A., Williamson M.M. Series elastic actuators // Proceedings 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human Robot Interaction and Cooperative Robots. – IEEE, 1995. – Vol. 1. – P. 399-406.
13. Höppner H. Analysis of human intrinsic stiffness modulation and its use in variable-stiffness robots: diss. – Technische Universität München, 2016.
14. Grebenstein M. The awiwi hand: An artificial hand for the dlr hand arm system // Approaching Human Performance. – Springer, Cham, 2014. – P. 65-130.
15. Petit F. Analysis and control of variable stiffness robots: дис. – ETH-Zürich, 2014.
16. Morita T., Sugano S. Design and development of a new robot joint using a mechanical impedance adjuster // Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation. – IEEE, 1995. – Vol. 3. – P. 2469-2475.
17. Morita VOL., Sugano S. Development of an anthropomorphic force-controlled manipulator WAM-10 // 1997 8th International Conference on Advanced Robotics. Proceedings. ICAR'97. – IEEE, 1997. – P. 701-706.

18. Tonietti G., Schiavi R., Bicchi A. Design and control of a variable stiffness actuator for safe and fast physical human/robot interaction // *Proceedings of the 2005 IEEE international conference on robotics and automation*. – IEEE, 2005. – P. 526-531.
19. Wolf S., Hirzinger G. A new variable stiffness design: Matching requirements of the next robot generation // *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. – IEEE, 2008. – P. 1741-1746.
20. Vanderborght B. [et al.]. Variable impedance actuators: A review // *Robotics and autonomous systems*. – 2013. – Vol. 61, No. 12. – P. 1601-1614.
21. Grioli G. [et al.]. Variable stiffness actuators: The user's point of view // *The International Journal of Robotics Research*. – 2015. – Vol. 34, No. 6. – P. 727-743.
22. Wolf S. [et al.]. Variable stiffness actuators: Review on design and components // *IEEE/ASME transactions on mechatronics*. – 2015. – Vol. 21, No. 5. – P. 2418-2430.
23. Sardellitti I. [et al.]. Gain scheduling control for a class of variable stiffness actuators based on lever mechanisms // *IEEE Transactions on Robotics*. – 2013. – Vol. 29, No. 3. – P. 791-798.
24. Абсолютные преобразователи угловых перемещений (угловые абсолютные энкодеры). ОАО «СКБ ИС» – URL: <https://skbis.ru/catalog/rotary/absolute-rotary-encoders> (дата обращения: 08.02.2023).
25. FL70BL19 / Fulling Motor. – URL: <https://fullingmotor.com/EN/product/proServoDetail.aspx?mtt=551> (дата обращения: 08.02.2023).
26. Волновые редукторы Сервосила. – URL: <https://www.servosila.com/ru/harmonic/index.shtml> (дата обращения: 08.02.2023).
27. Патент RU189796U1: МПК F16B7/02. Торцевой моментный электродвигатель. СП6ГМТУ. – Заявл. 2003122143/09, зарег.: 15.07.2003; Опубл.: 10.07.2005, Бюл. №19. / Сеньков А.П., Сеньков А.А. – 12 с. – URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/6d/6e/dd/4ee1b882ffb214/RU2256276C2.pdf> (дата обращения: 06.02.2023).
28. YASA P400 R Series. – URL: <https://www.yasa.com/products/yasa-p400/> (дата обращения: 06.02.2023).
29. P400R Electric Motors Product Sheet. – URL: <https://www.yasa.com/wp-content/uploads/2021/05/YASA-P400RDatasheet-Rev-14.pdf> (дата обращения: 06.02.2023).
30. Phi-Range: A new generation of Axial Flux Motor. – URL: <https://www.phi-power.com/en/phi-power-motor-series/> (дата обращения: 06.02.2023).

REFERENCES

1. Hu J. [et al.]. Robotic deburring and chamfering of complex geometries in high-mix/low-volume production applications, *2020 IEEE 16th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*. IEEE, 2020, pp. 1155-1160.
2. Sága M. [et al.]. Case study: Performance analysis and development of robotized screwing application with integrated vision sensing system for automotive industry, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2020, Vol. 17, No. 3, pp. 1729881420923997.
3. Ott C. [et al.]. A humanoid two-arm system for dexterous manipulation, *2006 6th IEEE-RAS international conference on humanoid robots*. IEEE, 2006, pp. 276-283.
4. Zhou L. [et al.]. A Novel Portable Lower Limb Exoskeleton for Gravity Compensation during Walking, *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2020, pp. 768-773.
5. Zimmermann Y. [et al.]. ANYexo: A versatile and dynamic upper-limb rehabilitation robot, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2019, Vol. 4, No. 4, pp. 3649-3656.
6. Jaekel S. [et al.]. Design and operational elements of the robotic subsystem for the e. deorbit debris removal mission, *Frontiers in Robotics and AI*, 2018, Vol. 5, pp. 100.
7. AlAttar A., Rouillard L., Kormushev P. Autonomous air-hockey playing cobot using optimal control and vision-based bayesian tracking, *Annual Conference Towards Autonomous Robotic Systems*. Springer, Cham, 2019, pp. 358-369.
8. Groothuis S.S., Stramigioli S., Carloni R. Lending a helping hand: Toward novel assistive robotic arms, *IEEE robotics & automation magazine*, 2013, Vol. 20, No. 1, pp. 20-29.
9. Bicchi A. et al. Variable stiffness actuators for fast and safe motion control, *Robotics research. The eleventh international symposium*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2005, pp. 527-536.
10. Albu-Schäffer A. [et al.]. The DLR lightweight robot: design and control concepts for robots in human environments, *Industrial Robot: an international journal*, 2007.

11. Al-Shuka H.F.N. [et al.]. Active impedance control of bioinspired motion robotic manipulators: An overview, *Applied bionics and biomechanics*, 2018, Vol. 2018.
12. Pratt G.A., Williamson M.M. Series elastic actuators, *Proceedings 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human Robot Interaction and Cooperative Robots*. IEEE, 1995, Vol. 1, pp. 399-406.
13. Höppner H. Analysis of human intrinsic stiffness modulation and its use in variable-stiffness robots: diss. Technische Universität München, 2016.
14. Grebenstein M. The awiwi hand: An artificial hand for the dlr hand arm system, *Approaching Human Performance*. Springer, Cham, 2014, pp. 65-130.
15. Petit F. Analysis and control of variable stiffness robots: diss. ETH-Zürich, 2014.
16. Morita T., Sugano S. Design and development of a new robot joint using a mechanical impedance adjuster, *Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 1995, Vol. 3, pp. 2469-2475.
17. Morita VOL., Sugano S. Development of an anthropomorphic force-controlled manipulator WAM-10, 1997 8th International Conference on Advanced Robotics. *Proceedings. ICAR'97*. IEEE, 1997, pp. 701-706.
18. Tonietti G., Schiavi R., Bicchi A. Design and control of a variable stiffness actuator for safe and fast physical human/robot interaction, *Proceedings of the 2005 IEEE international conference on robotics and automation*. IEEE, 2005, pp. 526-531.
19. Wolf S., Hirzinger G. A new variable stiffness design: Matching requirements of the next robot generation, 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2008, pp. 1741-1746.
20. Vanderborght B. [et al.]. Variable impedance actuators: A review, *Robotics and autonomous systems*, 2013, Vol. 61, No. 12, pp. 1601-1614.
21. Grioli G. [et al.]. Variable stiffness actuators: The user's point of view, *The International Journal of Robotics Research*, 2015, Vol. 34, No. 6, pp. 727-743.
22. Wolf S. [et al.]. Variable stiffness actuators: Review on design and components, *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, 2015, Vol. 21, No. 5, pp. 2418-2430.
23. Sardellitti I. [et al.]. Gain scheduling control for a class of variable stiffness actuators based on lever mechanisms, *IEEE Transactions on Robotics*, 2013, Vol. 29, No. 3, pp. 791-798.
24. Absolyutnye preobrazovateli uglovykh peremeshcheniy (uglovyie absolyutnye enkodery) [Absolute angular displacement converters (angular absolute encoders)]. OAO «SKB IS». Available at: <https://skbis.ru/catalog/rotary/absolute-rotary-encoders> (accessed 08 February 2023).
25. FL70BL19, Fulling Motor. Available at: <https://fullingmotor.com/EN/product/proServoDetail.aspx?mtt=551> (accessed 08 February 2023).
26. Volnovye reduktory Servosila [Servosil wave reducers]. Available at: <https://www.servosila.com/ru/harmonic/index.shtml> (accessed 08 February 2023).
27. Sen'kov A.P., Sen'kov A.A. Patent RU189796U1: MPK F16B7/02. Tortsevoy momentnyy elektrodvigatel' [Patent RU189796U1: IPC F16B7/02. End torque electric motor]. SPbGMTU. Prov. app. 2003122143/09, Filed: 15.07.2003; Pub.: 10.07.2005, Bull. No. 19, 12 p. Available at: <https://patentimages.storage.googleapis.com/6d/6e/dd/4ee1b882ffb214/RU2256276C2.pdf> (accessed 06 February 2023).
28. YASA P400 R Series. Available at: <https://www.yasa.com/products/yasa-p400/> (accessed 06 February 2023).
29. P400R Electric Motors Product Sheet. Available at: <https://www.yasa.com/wp-content/uploads/2021/05/YASA-P400RDataSheet-Rev-14.pdf> (accessed 06 February 2023).
30. Phi-Range: A new generation of Axial Flux Motor. Available at: <https://www.phipower.com/en/phi-power-motor-series/> (accessed 06 February 2023).

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. И.Ю. Даляев.

Васильев Андрей Викторович – Государственный научный центр РФ – Федеральное государственное автономное научное учреждение «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ЦНИИ РТК); e-mail: andrey@rtc.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +78125526093; к.т.н.; ведущий конструктор.

Шардыко Игорь Вячеславович – e-mail: i.shardyko@rtc.ru; тел.: +78125526093; научный сотрудник.

Копылов Владислав Маркович – e-mail: v.kopylov@rtc.ru; тел.: +78125526093; ведущий инженер.

Vasiliev Andrey Viktorovich – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics (RTC); e-mail: andrey@rtc.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +78125526093; cand. of eng. sc.; leading designer.

Shardyko Igor Vyacheslavovich – e-mail: i.shardyko@rtc.ru; phone: +78125526093; researcher.

Kopylov Vladislav Markovich – e-mail: v.kopylov@rtc.ru; phone: +78125526093; leading engineer.

УДК 621.317.39.084.2

DOI 10.18522/2311-3103-2023-1-215-226

Р.А. Жигалов, С.А. Матюнин, А.А. Иголкин

БЕСКОНТАКТНЫЙ ФЕРРОЗОНДОВЫЙ ДАТЧИК ПОЛОЖЕНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ КЛАПАНА

Целью исследования является разработка бесконтактного феррозондового датчика положения для контроля открытого/закрытого состояния клапана. Существует множество примеров использования в современной техники элементов или устройств, взаимодействующих с магнитным полем. Одной из актуальнейших задач является использование влияния магнитного поля в качестве средства контроля или составляющей управляющей среды. Применение магнитооптических датчиков для контроля функционирования технических объектов обусловлено их бесконтактным способом измерения, возможностью измерения не только магнитных, но и других различных физических величин, относительной простотой, надежностью и дешевизной конструкции чувствительного элемента, гибкостью в применении, эксплуатацией в низкотемпературных и высокотемпературных средах. Одним из датчиков подобного типа является феррозондовый преобразователь магнитного поля. Примером объекта внедрения феррозондового датчика являются клапаны различных пневмогидравлических систем. Сущность поставленной задачи заключается в создании бесконтактного концевого переключателя золотника клапана, сигнализирующего о закрытом или открытом состоянии клапана и передающего эту информацию в систему контроля. Предлагается разбиение данной задачи на этапы и последовательное их выполнение. Сначала производится поиск и анализ уже существующих решений, литературы, посвященной теме исследования магнитных преобразователей. Далее, разрабатывается модельная конструкция датчика, согласно которой создаются геометрические 3D-модель и 2D-модель чувствительного элемента, выбирается предполагаемый материал составляющих элементов датчика. С помощью численных методов компьютерного моделирования и математических моделей моделируется работа датчика и определяются его выходные характеристики при различных режимах работы. По расчетным характеристикам выбирается и рассчитывается оптимальная конструкция и конфигурация чувствительного элемента датчика. По итогам моделирования разрабатываются сборочные и рабочие чертежи датчика. Предложенный способ решения задачи характеризуется сложностью изучения нелинейных магнитных систем и их моделирования. Результаты данного исследования могут быть рекомендованы для разработки магнитооптических датчиков подобного или иного типа и изучения материалов с нелинейными магнитными свойствами.

Феррозондовый датчик; магнитный датчик; численное моделирование; индукция; напряженность; клапан.

R.A. Zhigalov, S.A. Matyunin, A.A. Igolkin

NON-CONTACT FLUXGATE POSITION SENSOR FOR MONITORING THE STATE OF THE VALVE

The aim of the study is to develop a non-contact fluxgate position sensor to control the open / closed state of the valve. There are many examples of the use in modern technology of elements or devices that interact with a magnetic field. One of the most urgent tasks is to use the influence of the magnetic field as a means of control or as a component of the control environment. The use of magneto-optical sensors for monitoring the functioning of technical objects is due to their non-contact measure-

ment method, the ability to measure not only magnetic, but also various other physical quantities, the relative simplicity, reliability and low cost of the design of the sensitive element, flexibility in use, operation in low-temperature and high-temperature environments. One of the sensors of this type is a fluxgate magnetic field converter. Valves of various pneumohydraulic systems are an example of the object of introduction of a fluxgate sensor. The essence of the task is to create a non-contact limit switch of the valve spool, signaling the closed or open state of the valve and transmitting this information to the control system. It is proposed to divide this task into stages and their sequential implementation. First, a search and analysis of existing solutions, literature on the topic of research of magnetic transducers is carried out. Next, a model design of the sensor is developed, according to which a geometric 3D model and a 2D model of the sensing element are created, and the proposed material of the constituent elements of the sensor is selected. With the help of numerical methods of computer simulation and mathematical models, the operation of the sensor is simulated and its output characteristics are determined under various operating modes. According to the design characteristics, the optimal design and configuration of the sensor's sensing element is selected and calculated. As a result of the simulation, assembly and working drawings of the sensor are developed. The proposed method for solving the problem is characterized by the complexity of studying nonlinear magnetic systems and their modeling. The results of this study can be recommended for the development of magneto-optical sensors of this or another type and for the study of materials with nonlinear magnetic properties.

Fluxgate sensor; magnetic sensor; numerical simulation; induction; tension; valve.

Введение. В настоящее время датчики магнитного поля широко используются в различных областях науки и техники. Например, датчики магнитного поля позволяют бесконтактно и очень точно измерять расстояние до объектов, на которых размещен миниатюрный постоянный магнит. Данный принцип регистрации линейных и угловых перемещений и положений объектов в пространстве применяется в авто- и авиатехнике, автоматизированных станках и сборочных линиях в промышленности, системах ориентации стабилизации.

При разработке датчиков магнитного поля все чаще приходится решать задачи повышения их чувствительности, надежности, уменьшения массы, потребляемой мощности и снижения себестоимости.

Для многих практических применений важным является дистанционное бесконтактное измерение магнитного поля, и, в принципе, такие измерения можно осуществлять с помощью феррозондовых датчиков.

Феррозондовые магнитные преобразователи отличаются компактностью, дешевой конструкцией, гибкостью применения, высокой чувствительностью.

Постановка научной задачи. Требуется разработать бесконтактный феррозондовый датчик положения для контроля состояния клапана. На рис. 1. изображена модельная схема клапана и датчика.

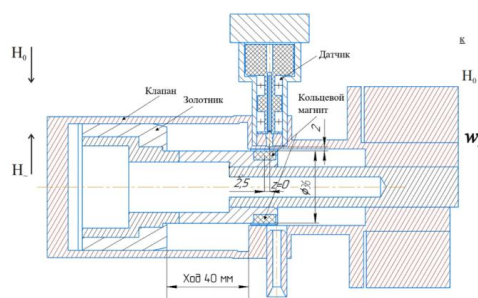


Рис. 1. Схема модели клапана и чувствительного элемента датчика

Основные элементы схемы – это корпус, золотник клапана и корпус размещаемого чувствительного элемента (ЧЭ). Золотник совершает поступательные перемещения, в крайнем левом положении клапан закрыт, в крайнем правом положении клапан открыт. Сущность задачи заключается в контроле текущего положения золотника клапана.

Литературно-патентный обзор. В настоящее время феррозондовые датчики широко используются для измерения магнитного поля Земли, измерения и индикации постоянно и медленно меняющихся магнитных полей. Феррозондовые датчики так же, как и другие магнитооптические датчики могут быть применены в системах контроля, слежения за технологическим объектом.

При проведении литературно-патентного исследования были найдены устройства, использующие феррозондовый преобразователь магнитного поля для контроля состояния объекта, локализации магнитопроводящих элементов и измерения магнитных величин. Также были найдены статьи и справочники, посвященные изучению магнитных преобразователей.

Преимущества датчика на феррозондовом методе заключаются в простоте, дешевизне и малогабаритности конструкции, отсутствии механической связи между контролируемым объектом и чувствительным элементом, возможности эксплуатации в условиях высоких и низких температур.

В учебнике Бараночников М.Л. Микромагнитоэлектроника описаны различные преобразователи магнитного поля, в том числе и феррозондовые датчики [1–2]. Существует типовые варианты конструкции феррозондовых датчиков: одноэлементный стержневой датчик, дифференциальный датчик с разомкнутым сердечником, дифференциальный датчик с замкнутым сердечником.

На рис. 2 изображены различные варианты исполнения феррозондовых датчиков.

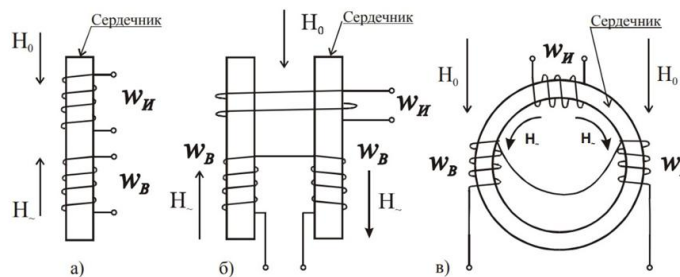


Рис. 2. Варианты конструкции феррозондов: а – одноэлементный стержневой; б – дифференциальный с разомкнутым сердечником; в – дифференциальный с замкнутым сердечником

Действие феррозонда основано на изменении магнитного состояния ферромагнетика под воздействием двух магнитных полей разных частот.

В простейшем варианте феррозонд состоит из ферромагнитного сердечника и находящихся на нем двух катушек: катушки возбуждения (ω_B), питаемой переменным током, и измерительной (сигнальной) катушки (ω_H).

Сердечник феррозонда выполняется из материалов с высокой магнитной проницаемостью.

На катушку возбуждения от специального генератора подается переменное напряжение с частотой от 1 кГц до 300 кГц. (в зависимости от уровня параметров и назначения прибора).

В отсутствие измеряемого магнитного поля сердечник под действием переменного магнитного поля ($H_{\sim}$), создаваемого током в катушке возбуждения, перемагничивается по симметричному циклу. Изменение магнитного поля, вызванное перемагничиванием сердечника по симметричной кривой, индуцирует в сигнальной катушке ЭДС, изменяющуюся по гармоническому закону. Если одновременно на сердечник действует измеряемое постоянное или медленно меняющееся магнитное поле (H_0), то кривая перемагничивания меняет свои размеры и форму и

становится несимметричной. При этом изменяется величина и гармонический состав ЭДС в сигнальной катушке. В частности, появляются четные гармонические составляющие ЭДС, величина которых пропорциональна напряженности измеряемого поля и которые отсутствуют при симметричном цикле перемагничивания.

Феррозонды подразделяются на: стержневые одноэлементные (рис. 2,а), дифференциальные с разомкнутым сердечником (рис. 2,б) и дифференциальные с замкнутым (кольцевым) сердечником (рис. 2,в).

Дифференциальный феррозонд (рис. 2,б,в), как правило, состоит из двух сердечников с обмотками, которые соединены так, что нечетные гармонические составляющие практически компенсируются. Тем самым упрощается измерительная аппаратура и повышается чувствительность феррозонда.

Дифференциальный феррозонд (рис. 2,б,в) состоит из двух сердечников с обмотками, которые соединены так, что нечетные гармонические составляющие практически компенсируются, что упрощает измерительную аппаратуру.

Феррозонды отличаются очень высокой чувствительностью к магнитному полю. Они способны регистрировать магнитные поля с напряженностью до $10^{-4} - 10^{-5}$ А/м ($\sim 10^{-10} - 10^{-11}$ Тл).

Современные конструкции феррозондов отличаются компактностью. Объем феррозонда, которым комплектуются отечественные магнитометры Г73, составляет менее 1 см^3 , а для магнитометра Г74 трехкомпонентный феррозонд вписывается в куб со стороной 15 мм.

На рис. 3 приведена конструкция и габариты миниатюрного стержневого феррозонда.

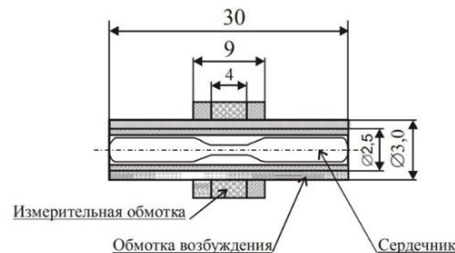


Рис. 3. Конструкция и габариты стержневого феррозонда

Сердечник феррозонда изготовлен из пермаллоя. Он имеет переменное по длине поперечное сечение, уменьшающееся примерно в 10 раз в центральной части сердечника, на которую нанесена измерительная обмотка. Такая конструкция обеспечивает при сравнительно небольшой длине (30 мм) высокую магнитную проницаемость ($1,5 \times 10^5$) и малое значение напряженности поля насыщения в центральной части сердечника, что приводит к увеличению фазовой и временной чувствительности феррозонда.

Диапазон измерения феррозондовых преобразователей типовой конструкции составляет от ± 50 А/м до ± 100 А/м (от $\pm 0,06$ до $\pm 0,126$ мТл).

В диссертации Барановой В. Е. описаны датчики магнитных полей на различных эффектах, в том числе и феррозондовые датчики [3]. Основное внимание в работе уделено описанию математической модели феррозондового преобразователя, расчетам и изготовлению системы катушек калибровки магнитных датчиков и феррозондового магнитометра.

Наибольшее распространение получили дифференциальные феррозонды как с разомкнутым сердечником (двухстержневой), так и с замкнутым (тороидальным) сердечником. Их внешний вид приведен на рис. 4.

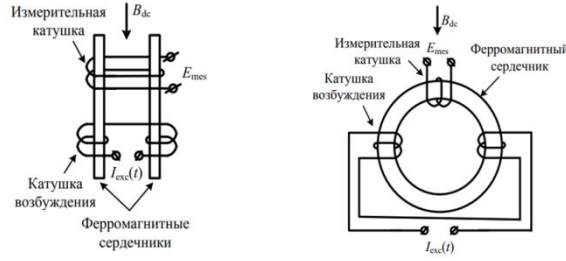


Рис. 4. Дифференциальные феррозонды с разомкнутым (слева) и с замкнутым сердечником (справа)

Дифференциальный феррозонд с разомкнутым сердечником содержит две обмотки, включенные встречно. Протекающий по ним ток возбуждения $I_{exc}(t)$ создает в объеме каждого сердечника напряженность магнитного поля возбуждения $H_{exc}(t)$. Эти поля характеризуются одинаковой амплитудой, но в противофазе. При наличии измеряемого постоянного поля H_{dc} , направленного вдоль сердечника, в объеме сердечников действуют суперпозиции напряженностей этих полей:

Суперпозиции напряженностей полей:

$$H_{\Sigma 1}(t) = H_{dc} + H_{exc}(t), \quad (1)$$

$$H_{\Sigma 2}(t) = H_{dc} - H_{exc}(t). \quad (2)$$

Индукции магнитного поля в идентичных сердечниках:

$$B_1(t) = f(H_{\Sigma 1}(t)) = f(H_{dc} + H_{exc}(t)), \quad (3)$$

$$B_2(t) = f(H_{\Sigma 2}(t)) = f(H_{dc} - H_{exc}(t)). \quad (4)$$

ЭДС, индуцированная в измерительной обмотке феррозонда, охватывающая оба сердечника:

$$E_{mes}(t) = -sw_2 \left(\frac{d}{dt} (B_1(t) + B_2(t)) \right). \quad (5)$$

Зависимость индукции магнитного поля в сердечниках:

$$B_1(t) = a_1 H_{dc} + a_1 H_{exc}(t) + a_3 H_{dc}^3 + 3a_3 H_{dc}^2 H_{exc}(t) + 3a_3 H_{dc} H_{exc}^2(t) + a_3 H_{exc}^3(t), \quad (6)$$

$$B_2(t) = a_1 H_{dc} - a_1 H_{exc}(t) + a_3 H_{dc}^3 - 3a_3 H_{dc}^2 H_{exc}(t) + 3a_3 H_{dc} H_{exc}^2(t) - a_3 H_{exc}^3(t). \quad (7)$$

Если феррозонд возбуждается переменным током синусоидальной формы $I_{exc}(t) = I_{exc.m} \sin(\omega t)$, то напряженность поля возбуждения:

$$H_{exc}(t) = H_{exc.m} \sin(\omega t) = \frac{w_1}{l} I_{exc.m} \sin(\omega t), \quad (8)$$

где $I_{exc.m}$ — амплитуда тока возбуждения, А,

w_1 — число витков в обмотке возбуждения феррозонда,

l — длина намотки обмотки возбуждения феррозонда, м,

ω — частота тока возбуждения, рад/с.

ЭДС в измерительной обмотке дифференциального феррозонда:

$$E_{mes}(t) = 6sw_2 a_3 \omega H_{dc} H_{exc.m}^2 \sin(2\omega t). \quad (9)$$

В справочнике под редакцией Пятин Ю. М. Постоянные магниты описаны изменения магнитных свойств различных марок магнитов и ферритов при изменении температуры окружающей среды [4]. Приведены температурные коэффициенты обратимых изменений характеристик магнитотвердых материалов и магнитного поля магнитных систем, а также математические модели для расчета изменения магнитных свойств.

При проведении патентного поиска наиболее близкими к разрабатываемому устройству по принципу действия и применению являются следующие патенты [5–14].

Известен патент RU0002457476 опубликован 27.07.2012., в котором раскрыт феррозондовый датчик для слежения за стыком свариваемых деталей [5]. На рис. 5 схематически изображена конструкция заявленного устройства.

Феррозондовый датчик содержит источник питания 1 сварочного тока, блок ввода магнитного поля, в который входят два токосъема 2 и 3, встроенные параллельно в цепь сварочного тока через электрод 8, и блок регистрации магнитного поля, состоящий из дифференциального феррозонда 9, содержащего обмотку возбуждения 11 и выходные обмотки 12. Обмотка возбуждения 11 подключена к задающему генератору 13 через делитель частоты на два 14. Феррозонд 9 жестко связан со сварочной головкой 10 и расположен над заваренным участком стыка и усилительного-преобразовательного тракта.

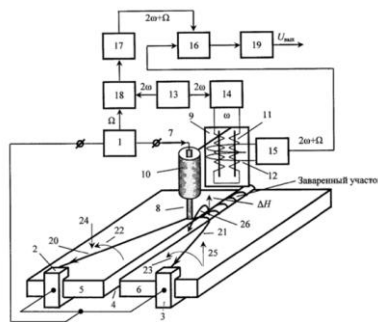


Рис. 5. Конструкция феррозондового датчика слежения за стыком свариваемых деталей

Усилительного-преобразовательный тракт содержит последовательно соединенные: избирательный усилитель 15, настроенный в резонанс на частоту $2\omega + \Omega$ (ω – частота возбуждения феррозонда, Ω – частота сварочного тока); фазовый дискриминатор 16, опорное напряжение которого формируется вторым избирательным усилителем 17, связанным с выходом модулятора 18, входы которого соединены с источником сварочного тока 1 и задающим генератором 13 частоты 2ω ; сглаживающий фильтр 19. В предлагаемом устройстве осуществляется выделение сигнала, пропорционального рассогласованию положений электрода и стыка на частоте $2\omega + \Omega$, что увеличивает помехозащищенность, а следовательно, и устойчивость слежения за стыком.

Феррозондовый датчик работает следующим образом. В процессе сварки сварочный ток, подводимый от источника 1 на электрод 8, разделяется на две составляющие 20 и 21, которые наводят магнитные поля 22 и 23 над свариваемыми деталями 5, 6.

При расположении электрода 8 точно над стыком 4 составляющие 20 и 21 сварочного тока не протекают через заваренный участок стыка 4. В связи с тем, что токосъемы расположены симметрично относительно стыка 4, вертикальные составляющие 24, 25 магнитных полей 22 и 23 равны по величине и противоположно направлены. Магнитное поле над свариваемыми деталями определяется горизонтальными составляющими полей 22 и 23 и полем сварочного тока, создаваемого электродом 8 в горизонтальной плоскости. Следовательно, проекция напряженности суммарного магнитного поля над заваренным участком стыка на ось чувствительности феррозонда 9 равна нулю, и выходной сигнал дифференциального феррозонда отсутствует.

При отклонении электрода 8 от стыка 4 составляющая 21 сварочного тока протекает через заваренный участок стыка 4 и проекция напряженности ΔH магнитного поля 26 (поле от тока, протекающего по заваренному участку) на ось чувствительности дифференциального феррозонда 9 характеризует величину и направление отклонения электрода 8 от стыка 4. Под действием этой составляющей (ΔH) напряженности магнитного поля в выходной обмотке 12 феррозонда 9 возникает э.д.с., в спектре которой присутствует составляющая с частотой $(2\omega + \Omega)$, величина и фаза которой несут информацию о величине и направлении отклонения электрода от стыка.

Преимущество данного устройства заключается в бесконтактном способе контроля и увеличении помехозащищенности за счет сведения к минимуму вероятности электромагнитных помех на комбинированной частоте $(2\omega + \Omega)$.

Также были найдены статьи, посвященные изучению феррозондовых преобразователей [15–18].

В статье Баранова П.Ф. Моделирование феррозондового датчика для описывается процесс создания модели датчика измерения остаточной намагниченности в программной среде численного моделирования COMSOL Multiphysics [15].

COMSOL Multiphysics – это программная среда для конечно-элементного анализа и мультифизического моделирования, она позволяет решать электрические, механические, гидродинамические, акустические и магнитные задачи [19–0].

В статье приводится создание и моделирование дифференциального феррозондового датчика, схема его конструкции приведена на рис. 6.

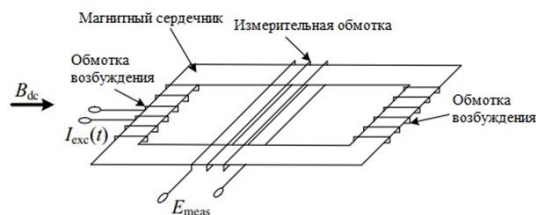


Рис. 6. Геометрия дифференциального феррозонда

Авторы статьи подробно описывают работу и настройку модели в программной среде для встроенного физического интерфейса и решателя. Даны рекомендации по оптимизации геометрии элемента и настройки материалов и конечного элемента сетки.

Проведенный литературно-патентный поиск подтверждает актуальность использования феррозондовых магнитных преобразователей для решения поставленной задачи.

За основу разрабатываемого феррозондового датчика для контроля состояния клапана предполагается выбрать дифференциальный тип датчика с единственным общим каркасом [1].

Разработка и моделирование конструкции датчика. Была разработана первоначальная конструкция датчика, сборочный чертеж катушки, чертеж корпуса чувствительного элемента, каркаса катушки и магнитопроводящей ленты, 2D и 3D модели чувствительного элемента.

Сначала предполагается провести моделирование магниточувствительного элемента, то есть самого феррозонда. На рис. 7 изображена модельная схема чувствительного элемента, расположенного в клапане.

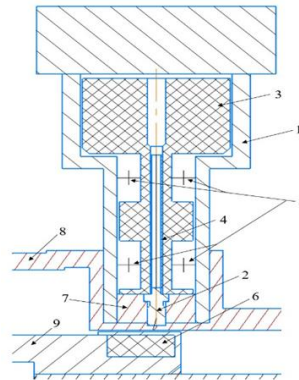


Рис. 7. Модельная схема феррозонда

Согласно рисунку, датчик состоит из корпуса 1, магнитного концентратора из магнитомягкого материала 2, повышающего чувствительность датчика, катушки 3, пермаллоевой ленты 4, измерительных обмоток и обмоток возбуждения 5 (условное обозначение), кольцевого магнита 6. Позициями 7, 8 и 9 обозначены крышки торцевые, корпус клапана и золотник.

В качестве среды моделирования феррозонда использовалась среда численного моделирования FEMM методом конечных элементов. Сущность моделирования конструкции датчика с помощью среды FEMM заключается в определении позиционных и температурных характеристик датчика, то есть зависимости величины магнитного поля, измеряемого чувствительным элементом, от изменения температуры в месте установки датчика.

Данная среда численного моделирования используется при решении линейных и нелинейных магнитостатических задач [21].

В первом приближении ставится задача определения изменения магнитного поля, создаваемого постоянным магнитом, от температуры. Для моделирования объекта в магнитном поле требуется указать материал, из которого состоит объект, или его магнитные свойства. На рис. 8 приведена конструкция с обозначением на ней материала, и кривая намагничивания стали 16Х. Как показано на рисунке, корпус датчика и магнитный концентратор изготовлены из магнитомягкой ферромагнитной стали 16Х, то есть связь между напряженностью поля и магнитной индукцией нелинейная. Сталь 12Х18Н10Т и 10Х11Н23Т3МР, из которых выполнены стенки клапана и золотник немагнитные, их магнитная проницаемость равна 1.

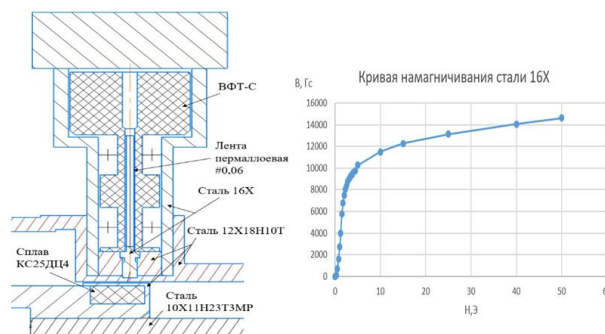


Рис. 8. Материал элементов датчика

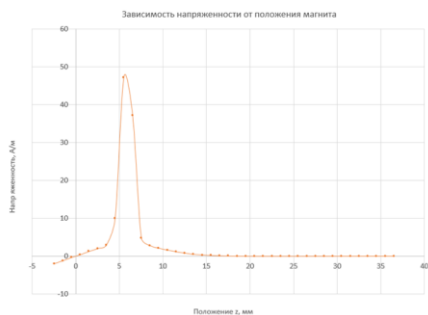
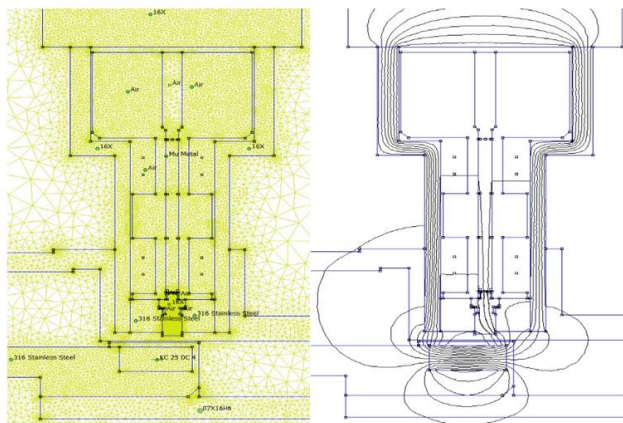


Рис. 10. Зависимость напряженности магнитного поля от положения магнита

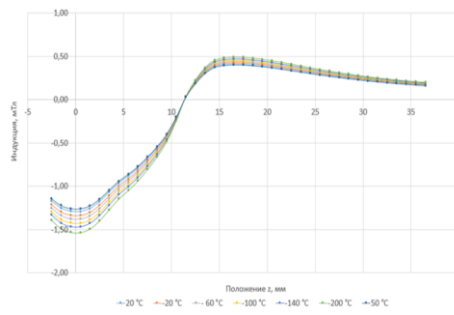


Рис. 11. Отклонение индукции при различных значениях температуры

пакетов COMSOL и FEMM [15, 19–21], результаты расчетов позиционных характеристик для напряженности и индукции магнитного поля в зависимости от температуры среды в месте установки датчика могут быть рекомендованы для разработки и расчета параметров феррозондовых или других магнитных датчиков.

Полученные результаты моделирования подтверждают работоспособность предложенного решения и дают возможность разработки оптимальной конструкции бесконтактного датчика желаемой чувствительности и величины выходного сигнала.

Результаты исследования были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России в области научной деятельности (Проект № FSSS-2023-0008).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бараночников М.Л. Микромагнитоэлектроника. Т. 1. – ДМК ПРЕСС, 2001. – 544 с.
2. Бараночников М.Л. Микромагнитоэлектроника. Т. 2. – ДМК ПРЕСС, 2002. – 691 с.
3. Баранова В.Е. Измерение слабого магнитного поля на основе феррозондового датчика: дис. ... канд. техн. наук: защищена 12.01.16. / Муравьев Сергей Васильевич. – Т., 2015. – 134 с.
4. Постоянные магниты: Справочник / под ред. Ю.М. Пяа. – М.: Энергия. 1971. – 486 с.
5. Пат. 0002457476 Российская Федерация МПК⁷ G 01 N 27/82. Феррозондовый датчик для слежения за стыком свариваемых деталей / Браверман В.Я., Белозерцев В.С., Лелеков А.Т.; заявитель и патентообладатель гос. образовательное учреждение высшего профессионального образования СибГАУ. – № 2010144736/28; заявл. 01.11.10; опубл. 27.07.12.
6. Пат. 0000197484 Российская Федерация МПК⁷ G 01 R 33/00. Датчик феррозондовый в магнитном экране / Цыбин Ю.Н., Брезинский А.А., Николаенко О.С.; заявитель и патентообладатель Акционерное общество «Научно-исследовательский институт командных приборов». – №2020100561; заявл. 09.01.20; опубл. 30.04.20.
7. Пат. 02123303 Российская Федерация МПК⁷ A 61 B 17/50, A 61 B 5/06. Феррозондовый полюсоискатель // Пудов В.И., Реутов Ю.Я., Коротких С.А.; заявитель и патентообладатель Институт физики металлов Уральского отделения РАН. – №96120296/14; заявл. 08.10.96; опубл. 20.12.98.
8. Пат. 02315991 Российская Федерация МПК⁷ G 01 N 27/83. Модульный датчик для систем автоматизированного магнитного контроля рельсов / Горделий В.И. – №2006125395/28; заявл. 17.07.06; опубл. 27.01.2008.
9. Пат. 108983124 Китай МПК⁷ G 01 R 33/04. Магнитный датчик с обратной связью по состоянию насыщения / Ван Яньчжан, Ли Цзинци, Ши Цзякин; заявитель и патентообладатель JILIN UNIVERSITY. – №201811118866.7; заявл. 25.09.18; опубл. 11.12.18.
10. Пат. 210605010 Китай МПК⁷ G 01 V 3/08. Ферромагнитное устройство обнаружения для контроля ферромагнитных веществ в режиме пространственного позиционирования / Lyu Dongliang, Li Zhiming; заявитель и патентообладатель SHENZHEN NIMAGE TECHNOLOGY CO., LTD. – №201921468161.8; заявл. 05.09.2019; опубл. 22.05.20.
11. Пат. 210775814 Китай МПК⁷ G 01 R 33/04. Феррозондовый массив датчиков с возможностью обнаружения ориентации корабельных грузов / Luo Yubiao, Yang Lei, Xia Yuechun, Huang Xinglong, Liu Feibiao, Xiang Biao, Zeng Jiheng; заявитель и патентообладатель SHENZHEN LEILI TECHNOLOGY CO., LTD. – №201921549087.2; заявл. 18.09.2019; опубл. 16.06.2020.
12. Пат. 210981760 Китай МПК⁷ G 01 M 13/00. Устройство измерения механических характеристик автоматического выключателя на основе феррозондового датчика / Li Zhiguang; заявитель и патентообладатель SHIJIAZHANG HANDY ELECTRICAL INSTRUMENTS CO., LTD. – № 201922172017.6; заявл. 06.12.2019; опубл. 10.07.2020.
13. Пат. 206270508 Китай МПК⁷ G 01 V 3/08. Устройство обнаружения металла / Yu Runqiao, Cheng Dongfang, Hu Bo, Xia Guisuo, Cheng Qiangqiang; заявитель и патентообладатель NINGBO YINZHOU CITAI ELECTRONIC SCIENCE & TECHNOLOGY CO., LTD. – №201621459612.8; заявл. 28.12.2016; опубл. 20.06.2017.
14. Пат. 6456069 США МПК⁷ G 01 33/04. Феррозондовый датчик магнитного поля, содержащий ферромагнитный исследуемый материал, в его магнитную цепь / Scarzello. John F., Holmes. John J., O'Keefe. Edward C.; заявитель и патентообладатель The United States of America as represented by the Secretary of the Navy. – №09517559; заявл. 02.03.2000; опубл. 24.09.2002.
15. Баранов П., Коломейцев А., Затонов И. Моделирование феррозондового датчика // Materials Science and Engineering. – Томск, 2018.

16. Танг С.К. Схема возбуждения феррозондового датчика с использованием насыщающегося индуктора // *Sensors and Actuators A: Physical* / Департамент электронной техники, Исследовательский центр силовой электроники, Национальный университет Ирландии, Голуэй, Ирландия, 2004. – С. 156-165.
17. Санков О.В., Легкий В.Н. Исследование феррозондовых магнитных объектов для систем ближней локализации // *Вестн. Моск. гос. тех. ун-та им. Н.Э. Баумана*. – 2009. – № 2 (75). – С. 90-101.
18. Волков А.В., Реутов В.Я. Феррозондовый компьютерный магнитометр. – Екатеринбург: Институт физики металлов Уро РАН, 2015. – С. 322-327.
19. Янкин С. Основы электротехнических расчетов в COMSOL Multiphysics // COMSOL Co. – Свободный режим доступа: <https://www.comsol.ru/video/intro-to-ac-dc-modeling-in-comsol-webinar-ru> (дата обращения: 30.01.2022).
20. Davies N. Modeling Transformers and inductors in COMSOL Multiphysics // COMSOL Co. – Свободный режим доступа: <https://cn.comsol.com/video/modeling-transformers-and-inductors-in-comsol-multiphysics> (дата обращения: 01.02.2022).
21. Байда, Е.И. Расчет электромагнитных и тепловых полей с помощью программы FEMM. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2015. – 94 с.

REFERENCES

1. Baranochnikov M.L. Mikromagnitoelektronika [Micromagnetoelctronics]. Vol. 1. DMK PRESS, 2001, 544 p.
2. Baranochnikov M.L. Mikromagnitoelektronika [Micromagnetoelctronics]. Vol. 2. DMK PRESS, 2002, 691 p.
3. Baranova V.E. Izmerenie slabogo magnitnogo polya na osnove ferrozondovogo datchika: dis. ... kand. tekhn. nauk [Measurement of a weak magnetic field based on a fluxgate sensor: cand. of eng. sc. diss.]; defended 12.01.16., Murav'ev Sergey Vasil'evich. T., 2015, 134 p.
4. Postoyannye magnity: Spravochnik [Permanent magnets: Handbook], ed. by Yu.M. Pyaa. Moscow: Energiya. 1971, 486 p.
5. Braverman V.YA., Belozertsev V.S., Lelekov A.T. Pat. 0002457476 Rossiyskaya Federatsiya MPK7 G 01 N 27/82. Ferrozondovyy datchik dlya slezheniya za stykom svariyaemykh detaley [Patent 0002457476 Russian Federation MPK7 G 01 N 27/82. Ferroprobe sensor for monitoring the joint of welded parts]; applicant and patent holder educational institution of higher professional education SibGAU. No. 2010144736/28; dec. 01.11.10; publ. 07/27/12.
6. Tsybin Yu.N., Brezinskiy A.A., Nikolaenko O.S. Pat. 0000197484 Rossiyskaya Federatsiya MPK7 G 01 R 33/00. Datchik ferrozondovyy v magnitnom ekrane [Patent 0000197484 Russian Federation MPK7 G 01 R 33/00. Ferroprobe sensor in a magnetic screen]; applicant and patent holder Joint-Stock Company Scientific Research Institute of Command Devices. No. 2020100561; dec. 01/09/20; publ. 04/30/20.
7. Pudov V.I., Reutov Yu.Ya., Korotkikh S.A. Pat. 02123303 Rossiyskaya Federatsiya MPK7 A 61 B 17/50, A 61 B 5/06. Ferrozondovyy polyusoiskatel' [Patent 02123303 Russian Federation MPK7 A 61 B 17/50, A 61 B 5/06. Ferroprobe pole detector]; applicant and patent holder Institute of Physics of Metals, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. No. 96120296/14; dec. 08.10.96; publ. 12/20/98.
8. Gordeliy V.I. Pat. 02315991 Rossiyskaya Federatsiya MPK7 G 01 N 27/83. Modul'nyy datchik dlya sistem avtomatizirovannogo magnitnogo kontrolya rel'sov [Patent 02315991 Russian Federation MPK7 G 01 N 27/83. Modular sensor for systems of automated magnetic control of rails]. No. 2006125395/28; dec. 07/17/06; publ. 01/27/2008.
9. Van Yan'chzhan, Li TSzintszi, Shi Tsyakin. Pat. 108983124 Kitay MPK7 G 01 R 33/04. Magnitnyy datchik s obratnoy svyaz'yu po sostoyaniyu nasyshcheniya [Pat. 108983124 China MPK7 G 01 R 33/04. Saturation Feedback Magnetic Sensor]; applicant and Patent Holder of JILIN UNIVERSITY. No. 201811118866.7; dec. 09/25/18; publ. 12/11/18.
10. Lyu Dongliang, Li Zhimingю Pat. 210605010 Kitay MPK7 G 01 V 3/08. Ferromagnitnoe ustroystvo obnaruzheniya dlya kontrolya ferromagnitnykh veshchestv v rezhime prostranstvennogo pozitsionirovaniya [Patent 210605010 China IPC7 G 01 V 3/08. Ferromagnetic Detection Device for Inspection of Ferromagnetic Substances in Spatial Positioning Mode]; applicant and Patentee of SHENZHEN NIMAGE TECHNOLOGY CO., LTD. No. 201921468161.8; dec. 09/05/2019; publ. 05/22/20.
11. Luo Yubiao, Yang Lei, Xia Yuechun, Huang Xinglong, Liu Feibiao, Xiang Biao, Zeng Jiheng. Pat. 210775814 Kitay MPK7 G 01 R 33/04. Ferrozondovyy massiv datchikov s vozmozhnost'yu obnaruzheniya orientatsii korabel'nykh gruzov [Patent 210775814 China MPK7 G 01 R 33/04. Ferroprobe sensor array capable of detecting ship cargo orientation]; applicant and patent holder SHENZHEN LEILI TECHNOLOGY CO., LTD. No. 201921549087.2; dec. 09/18/2019; publ. 06/16/2020.

12. Li Zhiguang. Pat. 210981760 Kitay MPK7 G 01 M 13/00. Ustroystvo izmereniya mekhanicheskikh kharakteristik avtomaticheskogo vyklyuchatelya na osnove ferrozondovogo datchika [Patent 210981760 China MPK7 G 01 M 13/00. Fluorescent probe based circuit breaker mechanical measurement device]; Applicant and Patent Holder of SHIJIAZHANG HANDY ELECTRICAL INSTRUMENTS CO., LTD. No. 201922172017.6; dec. 12/06/2019; publ. 07/10/2020.
13. Yu Runqiao, Cheng Dongfang, Hu Bo, Xia Guisuo, Cheng Qiangqiang. Pat. 206270508 Kitay MPK7 G 01 V 3/08. Ustroystvo obnaruzheniya metalla [Patent 206270508 China IPC7 G 01 V 3/08. Metal detection device]; applicant and patentee NINGBO YINZHOU CITAI ELECTRONIC SCIENCE & TECHNOLOGY CO., LTD. No. 201621459612.8; dec. 12/28/2016; publ. 06/20/2017.
14. Scarzello. John F., Holmes. John J., O'Keefe. Edward C. Pat. 6456069 SSHA MPK7 G 01 33/04. Ferrozondovyy datchik magnitnogo polya, soderzhashchiy ferromagnitnyy issleduemyy material, v ego magnitnyuyu tsep' [Patent US 6456069 MPK7 G 01 33/04. Ferroprobe magnetic field sensor containing a ferromagnetic test material into its magnetic circuit]; applicant and Patentee of The United States of America as represented by the Secretary of the Navy. No. 09517559; dec. 03/02/2000; publ. 09/24/2002.
15. Baranov P., Kolomeyts A., Zatonov I. Modelirovanie ferrozondovogo datchika [Modeling a fluxgate sensor], *Materials Science and Engineering*. Tomsk, 2018.
16. Tang S.K. Skhema возбуждения ferrozondovogo datchika s ispol'zovaniem nasyschayushchegosya induktora [Excitation circuit for a fluxgate sensor using a saturable inductor], *Sensors and Actuators A: Physical*. Departament elektronnoy tekhniki, Issledovatel'skiy tsentr silovoy elektroniki, Natsional'nyy universitet Irlandii, Goluey, Irlandiya, 2004, pp. 156-165.
17. Sankov O.V., Legkiy V.N. Issledovanie ferrozondovykh magnitnykh ob'ektov dlya sistem blizhney lokatsii [Investigation of fluxgate magnetic objects for systems of near location], *Vestn. Mosk. gos. tekhn. un-ta im. N.E. Bauman* [Vestn. Moscow state those. un-ta im. N.E. Bauman], 2009, No. 2 (75), pp. 90-101.
18. Volkov A.V., Reutov V.Ya. Ferrozondovyy komp'yuternyy magnitometr [Ferrosonde computer magnetometer]. Ekaterinburg: Institut fiziki metallov Uro RAN, 2015, pp. 322-327.
19. Yankin S. Osnovy elektrotekhnicheskikh raschetov v COMSOL Multiphysics [Fundamentals of electrical calculations in COMSOL Multiphysics], *COMSOL Co.* Free access mode: <https://www.comsol.ru/video/intro-to-ac-dc-modeling-in-comsol-webinar-ru> (accessed 30 January 2022).
20. Davies N. Modeling Transformers and inductors in COMSOL Multiphysics, *COMSOL Co.* Free access mode: <https://cn.comsol.com/video/modeling-transformers-and-inductors-in-comsol-multiphysics> (accessed 01 February 2022).
21. Bayda, E.I. Raschet elektromagnitnykh i teplovykh poley s pomoshch'yu programmy FEMM [Calculation of electromagnetic and thermal fields using the FEMM program]. Khar'kov: NTU «KHPI», 2015, 94 p.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. С.А. Борминский.

Матюнин Сергей Александрович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»; e-mail: S.A.Matyunin@yandex.ru; г. Самара, Россия; тел.: +78462674443; д.т.н.; профессор; г.н.с.

Иголкин Александр Алексеевич – e-mail: igolkin97@gmail.com; тел.: + 79171620062; д.т.н.; профессор; ведущий научный сотрудник.

Жигалов Роман Александрович – e-mail: zhigalovroman9@mail.ru; тел.: +79171516449.

Matyunin Sergey Alexandrovich – Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Samara National Research University named after Academician S.P. Queen"; e-mail: S.A.Matyunin@yandex.ru; Samara, Russia; phone: +78462674443; dr. of eng. sc.; professor; chief researcher.

Igolkin Alexander Alekseevich – e-mail: igolkin97@gmail.com; phone: + 79171620062; dr. of eng. sc.; professor; leading researcher.

Zhigalov Roman Aleksandrovich – e-mail: zhigalovroman9@mail.ru; phone: +79171516449.

Раздел IV. Связь, навигация и наведение

УДК 681.518.3

DOI 10.18522/2311-3103-2023-1-227-240

Д.А. Юхимец, А.С. Губанков

НАВИГАЦИОННАЯ СИСТЕМА АВТОНОМНОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ, ПЕРЕДАВАЕМЫХ ПО АКУСТИЧЕСКОМУ КАНАЛУ ОТ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ*

Предложен метод построения навигационной системы автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА), использующей ограниченный набор бортовых датчиков и принимающей данные о положении АНПА по акустическим каналам связи от гидроакустической станции освещения подводной обстановки (ГАСО). Предложенный метод формирует оценки положения и скоростей АНПА на основе его динамической модели в предположении, что угловые скорости, углы ориентации и глубина АНПА определяются с помощью его бортовых датчиков. Линейные скорости непосредственно не измеряются. Для реализации навигационного алгоритма используется фильтр Калмана. При этом особенность этого алгоритма заключается в реализации двухступенчатой процедуры коррекции оценок координат и линейных скоростей АНПА, полученных на основе его динамической модели. Указанная коррекция осуществляется в двух вариантах в зависимости от того, какие данные доступны на текущем шаге работы системы. Первый вариант предполагает коррекцию указанных оценок только на основе данных от датчика глубины, обновление которых происходит на каждом шаге работы системы. А второй вариант используется, когда приходят данные от ГАСО по акустическим каналам связи. Эти данные приходят с задержкой из-за ограниченной скорости распространения акустических сигналов в водной среде, а также могут периодически искажаться и пропадать. В работе предложен метод компенсации указанных задержек, за счет сохранения массива ранее рассчитанных данных и оценки необходимых поправок за счет сравнения пришедших данных с оценками, полученными ранее. Предложенная схема построения навигационной системы позволяет обеспечить коррекцию ее показаний в условиях нерегулярного обновления данных от ГАСО. Результаты моделирования с использованием модели, описывающей все основные особенности работы ГАСО и ее взаимодействия с АНПА (задержки в получении информации, наличие шумов измерений и дискретизация данных ГАСО) показали достаточно высокую эффективность предложенного решения. При этом в качестве основного преимущества можно указать возможность использования минимального количества бортовых датчиков и возможность быстрого развертывания ГАСО для взаимодействия с АНПА.

Автономный необитаемый подводный аппарат; навигация; гидроакустическая станция освещения подводной обстановки; акустические каналы связи; инерциальное-измерительное устройство; фильтр Калмана; динамическая модель.

D.A. Yukhimets, A.S. Gubankov

NAVIGATION SYSTEM OF AN AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE BASED ON DATA TRANSMITTED VIA AN ACOUSTIC CHANNEL FROM A HYDROACOUSTIC STATION

The paper proposes a method for constructing a navigation system of an autonomous underwater vehicle (AUV) using a limited set of onboard sensors and receiving position data of the AUV via acoustic communication channels from a hydroacoustic underwater monitoring station (HUMS). The proposed method obtains estimates of the position and velocities of the AUV based on its dynam-

* Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 29-22-01156).

ic model, assuming that the angular velocities, orientation angles and depth of the AUV are determined using its onboard sensors. Linear velocities are not directly measured. The Kalman filter is used to implement the navigation algorithm. At the same time, the feature of this algorithm is the implementation of a two-stage procedure for correcting estimates of coordinates and linear velocities of the AUV obtained on the basis of its dynamic model. This correction is carried out in two ways, depending on what data is available at the current step of the system. The first option assumes the correction of these estimates only on the basis of data from the depth sensor, which is updated at each step of the system. And the second option is used when data comes from HUMS via acoustic communication channels. This data comes with a delay due to the limited speed of propagation of acoustic signals in the aquatic environment, and may also periodically be distorted and disappear. The paper proposes a method for compensating for these delays by saving an array of previously calculated data and evaluating the necessary corrections by comparing the received data with the estimates obtained earlier. The proposed scheme for the construction of the navigation system allows for the correction of its readings in the conditions of irregular data updates from the HUMS. The results of modeling using a model describing all the main features of the HUMS operation and its interaction with the AUV (delays in obtaining information, the presence of measurement noise and sampling of HUMS data) showed a sufficiently high efficiency of the proposed solution. At the same time, the main advantage can be indicated by the possibility of using a minimum number of on-board sensors and the possibility of fast deployment of HUMS for interaction with AUV.

Autonomous underwater vehicle; navigation; hydroacoustic underwater monitoring station; acoustic communication channels; inertial measuring unit; Kalman filter; dynamic model.

Введение. В настоящее время АНПА являются одним из самых эффективных инструментов выполнения большого количества подводных операций: картографирования, поиска подводных объектов, мониторинга окружающей среды и т.д. [1–3]. При этом недостатками, существенно ограничивающими использование АНПА, является их высокая стоимость, обусловленная необходимостью установки дорогостоящих акустических бортовых датчиков, формирующих необходимую навигационную информацию, требующуюся системе управления для формирования сигналов управления движителями.

Существует большое количество подходов к построению навигационных систем АНПА. Традиционным подходом является использование гидроакустических навигационных систем с длинной базой, которая состоит из нескольких заранее выставленных маяков-ответчиков [4, 5]. Этот подход требует длительных работ по установке и позиционированию маяков, а также для точности определения координат требуется иметь на борту дополнительно измеритель скорости звука и высокоточные синхронизированные часы. Кроме того, в таких системах происходит кратное увеличение периода обновления, если одновременно работает несколько АНПА. Вариантом таких систем являются разностно-дальномерные системы, которые могут быть использованы для реализации навигационных систем групп АНПА [6–8]. В этих системах маяки излучают сигналы, а АНПА их принимают и определяют время прохождения сигналов от маяков. Это позволяет определять положения всем АНПА группы одновременно, но требует присутствия на борту АНПА высокоточных синхронизированных часов, что является сложной задачей и приводит к существенному удорожанию АНПА [9, 10].

Также используют системы с короткой и ультракороткой базой, которые обычно устанавливаются на корабле-носителе и используются для определения положения телеуправляемых подводных аппаратов [11]. В качестве решения для быстроразвертываемой навигационной системы АНПА многими авторами предлагается использовать системы одномаяковой навигации [12–15]. В этих системах безэкипажный катер перемещает маяк, двигаясь за АНПА, и передает координаты этого маяка по акустическим каналам связи. Однако такое решение требует использования синхронизированных часов, для точного определения дистанции до маяка [16].

Так как данные от гидроакустических навигационных систем обновляются с достаточно большим периодом, что неприемлемо для работы системы управления, то в АНПА дополнительно используется инерциальная система навигации, которая основана на использовании датчиков, измеряющих параметры движения АНПА. Данные от этой инерциальной навигационной системы комплексируются с данными, полученными от гидроакустических навигационных систем, на основе различных алгоритмов [17–19]. При этом важной частью этой инерциальной системы является доплеровский лаг, позволяющий измерять линейные скорости АНПА. Доплеровский лаг имеет достаточно высокую цену и габариты, что существенно увеличивает стоимость АНПА.

Для решения указанных проблем в работе рассматривается подход к построению навигационной системы, построенной на основе гидроакустических станций освещения подводной обстановки (ГАСО), которые позволяют определять положение АНПА и передать полученную информацию по акустическим каналам связи. При этом особенностью предлагаемого подхода является замена реального доплеровского лага виртуальным, что позволит снизить стоимость системы, а также учет задержек при поступлении данных о текущем положении АНПА, а также отсутствие необходимости использовать высокоточные синхронизированные часы на борту АНПА.

Постановка задачи. В работе рассматривается АНПА, имеющий следующее бортовое оборудование:

- ♦ инерциальное измерительное устройство на основе MEMS-датчиков (трехосевой акселерометр, трехосевой датчик угловых скоростей, трехосевой магнетометр), формирующее информацию об угловых скоростях АНПА в связанной с ним системе координат (ССК) и углах ориентации в абсолютной системе координат (АСК);
- ♦ датчик глубины;
- ♦ акустический модем, получающий данные от гидроакустической станции, содержащие информацию о положении АНПА относительно станции (пеленг и дистанция);
- ♦ движительный комплекс, формирующий управляющие силы по осям x (движение вперед), z (движение вверх) и моменты вокруг осей y (управление по углу дифферента) и z (управление по углу курса) ССК;
- ♦ маяк ответчик, который формирует акустический импульс в ответ на импульс от ГАСО.

Также предполагается, что в процессе выполнения миссии АНПА находится в зоне действия ГАСО, которая способна определять его положение относительно себя, формируя дистанцию D_g до АНПА и пеленг α_g .

Движение АНПА описывается следующей динамической моделью [20]:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + (\mathbf{C}(\mathbf{M}, \mathbf{v}) + \mathbf{D}(d_1, d_2, \mathbf{v}))\mathbf{v} + \mathbf{g}(\xi) &= \boldsymbol{\tau}, \\ \dot{\boldsymbol{\eta}} &= \mathbf{J}(\xi)\mathbf{v}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\mathbf{M} = \mathbf{M}_R + \mathbf{M}_A \in R^{6 \times 6}$; $\mathbf{M}_R \in R^{6 \times 6}$ – матрица инерции АНПА; $\mathbf{M}_A \in R^{6 \times 6}$ – матрица инерции присоединенных масс жидкости и их моментов инерции; $\mathbf{C}(\mathbf{M}, \mathbf{v}) \in R^{6 \times 6}$ – матрица кориолисовых и центробежных сил и моментов; $\mathbf{D}(d_1, d_2, \mathbf{v}) \in R^{6 \times 6}$ – матрица гидродинамических сил и моментов; $\mathbf{g}(\xi) \in R^6$ – вектор гидростатических сил и моментов; $\boldsymbol{\eta} = [x, y, z, \varphi, \theta, \psi]^T \in R^6$ – вектор положения и углов ориентации АНПА в АСК; $\xi = [\varphi, \theta, \psi]^T$; $\boldsymbol{\tau} = [T_x, T_y, T_z, M_x, M_y, M_z]^T \in R^6$ – вектор сил тяг и моментов, развиваемых движительным комплексом в связанной с АНПА ССК; $\mathbf{v} = [v_x, v_y, v_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z]^T \in R^6$ – вектор линейных и угловых скоростей АНПА в ССК.

Матрица кориолисовых и центробежных сил и моментов, входящая в уравнения (1), описывается выражениями [20]:

$$\mathbf{C}(\mathbf{M}, \mathbf{v}) = \mathbf{C}_{RB}(\mathbf{M}_R, \mathbf{v}) + \mathbf{C}_A(\mathbf{M}_A, \mathbf{v}), \quad (2)$$

$$\mathbf{C}_{RB}(\mathbf{M}_R, \mathbf{v}) = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & -S(M_{11}v_1 + M_{12}v_2) \\ -S(M_{11}v_1 + M_{12}v_2) & -S(M_{21}v_1 + M_{22}v_2) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}_A(\mathbf{M}_A, \mathbf{v}) = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & -S(A_{11}v_1 + A_{12}v_2) \\ -S(A_{11}v_1 + A_{12}v_2) & -S(A_{21}v_1 + A_{22}v_2) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{M}_R = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}, \mathbf{M}_A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix},$$

где $v_1 = [v_x \ v_y \ v_z]^T$, $v_2 = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$, а оператор $S(\cdot)$ - выражениями:

$$S(\boldsymbol{\beta}) = \begin{bmatrix} 0 & -\beta_3 & \beta_2 \\ \beta_3 & 0 & -\beta_1 \\ -\beta_2 & \beta_1 & 0 \end{bmatrix}, \boldsymbol{\beta} = [\beta_1 \ \beta_2 \ \beta_3]^T.$$

Матрица гидродинамических сил и моментов является диагональной и ее элементы имеют вид [20]:

$$D_{ii} = d_{1i} + d_{2i}|v_i|, i = (\overline{1,6}), \quad (3)$$

где d_{1i} и d_{2i} – гидродинамические коэффициенты.

Гидростатические силы и моменты, действующие на АНПА, описываются следующими выражениями:

$$\mathbf{g}(\xi) = \begin{bmatrix} P \sin \theta \\ -P \cos \theta \sin \varphi \\ -P \cos \theta \cos \varphi \\ -B_y \cos \theta \cos \varphi + B_z \cos \theta \sin \varphi \\ B_z \sin \theta + B_x \cos \theta \cos \varphi \\ -B_x \cos \theta \sin \varphi - B_y \sin \theta \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $P = W_a - B_a$ – остаточная плавучесть АНПА; W_a – сила тяжести; B_a – Архимедова сила; $B_x = W_a x_G - B_a x_B$, $B_y = W_a y_G - B_a y_B$, $B_z = W_a z_G - B_a z_B$; x_G, y_G, z_G и x_B, y_B, z_B – соответственно, координаты центров тяжести и плавучести АНПА в ССК.

В работе считается, что параметры математической модели (1) (присоединенные массы и моменты инерции, гидродинамические коэффициенты) известны с определенной точностью в результате выполненных теоретических расчетов на основе известной геометрической формы АНПА [21] или выполненной процедуры идентификации с использованием экспериментальных данных [22–24].

Указанная модель может быть использована для получения оценок линейных скоростей движения АНПА в ССК, что позволяет в определенных условиях обойтись без использования доплеровского лага, являющегося дорогостоящим и габаритным устройством. Очевидно, что такой подход не может обеспечить точный расчет линейных скоростей из-за неизбежной неопределенности в параметрах модели АНПА и характеристиках движительного комплекса и, следовательно, приведет к накоплению ошибок в оценке положения АНПА в АСК. Однако использование модели (1) для оценки скоростей АНПА позволяет обеспечить физическую корректность этой оценки (АНПА не движется, если не приложена сила тяги от движительного комплекса), а для коррекции ошибок оценки линейных скоростей в ССК и координат в АСК можно использовать данные о положении АНПА формируемые ГАСО.

В процессе работы ГАСО излучает импульс, который доходит до маяка ответчика, расположенного на АНПА. Маяк, получив импульс, излучает ответный, который принимает ГАСО и определяет направление и дальность до АНПА. Эти данные ГАСО передает через акустический канал связи для АНПА. То есть данные о своем положении относительно ГАСО АНПА получает с задержкой, которая будет влиять на точность коррекции положения и скорости движения АНПА, которые, в свою очередь, требуются для функционирования его системы управления. При этом, так как данные передаются по акустическим каналам связи, то они могут приходиться с искажениями, что не позволит восстановить информацию о положении АНПА. Структура ГАСО описана в работе [25].

Таким образом, в работе ставится следующая задача. Необходимо разработать метод построения навигационной системы АНПА, на основе минимального необходимого набора бортовых инерциальных датчиков и данных, поступающих от ГАСО о положении АНПА, с учетом задержек их поступления и периодических потерях указанных данных.

Описание алгоритма работы навигационной системы. Алгоритм функционирования навигационной системы АНПА предлагается реализовать на основе фильтра Калмана, с учетом поступления данных о положении АНПА с переменным периодом из-за потери данных, и переменными задержками, зависящими от дистанции между АНПА и ГАСО. Данные о положении АНПА поступают от двух источников информации:

- ♦ датчик глубины формирует данные о положении АНПА по координате z с периодом, равным периоду работы навигационной системы;
- ♦ акустический модем, получающий данные о дистанции и пеленге АНПА относительно ГАСО, с периодом значительно превышающим период работы навигационной системы. При этом указанный период из-за возможной потери данных может быть переменным и заранее не прогнозируемым. Также указанные данные поступают с задержкой, зависящей от дистанции от АНПА до ГАСО.

Работа навигационной системы организуется следующим образом (рис. 1). На основе данных бортовых датчиков вычисляются оценки положения АНПА с желаемым периодом обновления. Для этого в качестве исходных данных для расчета используются показания инерциально-измерительного устройства (вектор угловых скоростей в ССК и углы ориентации в АСК) и управляющие сигналы, формируемые системой управления и подаваемые на движительный комплекс АНПА.

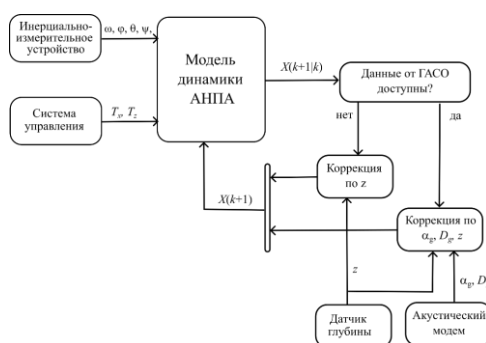


Рис. 1. Структура навигационной системы, использующей данные от ГАСО

Далее полученные на этапе оценки по динамической модели АНПА данные о линейных скоростях и координатах АНПА корректируются с использованием данных полученных от датчика глубины и ГАСО. При этом указанная коррекция в

зависимости от доступных данных может выполняться в двух вариантах: если новые данные от ГАСО не доступны, то коррекция происходит только с помощью показаний датчика глубины, а если пришли новые данные от ГАСО, то коррекция выполняется на основе этих данных и показаний датчика глубины с учетом задержки в поступлении данных от ГАСО. То есть в этом случае удастся учесть переменный и заранее неизвестный период поступления данных от ГАСО.

Расчет положения АНПА на основе инерциально-измерительного устройства и управляющих сигналов происходит с помощью динамической модели (1). В этой модели используются только уравнения, описывающие изменения линейных скоростей АНПА в ССК и его координат в АСК, с учетом того, что известны величины угловых скоростей в ССК и углов ориентации в АСК, а также развиваемые движительным комплексом силы тяги. То есть из модели (1) формируется следующая модель оценки указанных скоростей и координат в предположении, что угловые ускорения АНПА малы и ими можно пренебречь, а матрица присоединенных масс и моментов инерции имеет диагональный вид:

$$\begin{aligned}(m_a - \lambda_{11})\dot{v}_x + (d_{1x} + d_{2x}|v_x|)v_x - (m_a - \lambda_{22})\omega_z v_y + (m_a - \lambda_{33})\omega_y v_z + P s_\theta &= T_x, \\ (m_a - \lambda_{22})\dot{v}_y + (m_a - \lambda_{11})\omega_z v_x + (d_{1y} + d_{2y}|v_y|)v_y - (m_a - \lambda_{33})\omega_x v_z - P c_\theta s_\varphi &= 0 \\ (m_a - \lambda_{33})\dot{v}_z - (m_a - \lambda_{11})\omega_y v_x + (m_a - \lambda_{22})\omega_x v_y + (d_{1z} + d_{2z}|v_z|)v_z - P c_\theta c_\varphi &= T_z \\ \dot{x} &= s_\psi c_\theta v_x + (c_\psi s_\theta s_\varphi - s_\psi c_\varphi)v_y + (s_\psi s_\varphi + c_\psi c_\varphi s_\theta)v_z \\ \dot{y} &= s_\psi c_\theta v_x + (c_\psi c_\varphi + s_\varphi s_\theta s_\psi)v_y + (s_\theta s_\psi c_\varphi - c_\psi s_\varphi)v_z \\ \dot{z} &= -s_\theta v_x + c_\theta s_\varphi v_y + c_\theta c_\varphi v_z\end{aligned}\quad (5)$$

где m_a – масса АНПА; λ_{ii} – присоединенные массы жидкости; c_ξ, s_ξ – обозначение функций $\cos$ и $\sin$ соответствующего угла.

В модели (5) предполагается, что динамические параметры АНПА известны с некоторой точностью. А также известны характеристики движительного комплекса, то есть известны зависимости силы тяги, которые формирует каждый движитель, от скорости вращения винта.

Модель (5) в дискретном виде можно представить как:

$$X(k+1) = A(\omega, \varphi, \theta, \psi)X(k) + BF(k), \quad (6)$$

$$A = h^{-1} \begin{bmatrix} \frac{h^{-1} - (d_{1x} + d_{2x}|v_x|)}{m_a - \lambda_{11}} & \frac{(m_a - \lambda_{22})\omega_z}{m_a - \lambda_{11}} & \frac{-(m_a - \lambda_{33})\omega_y}{m_a - \lambda_{11}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-(m_a - \lambda_{11})\omega_z}{m_a - \lambda_{22}} & \frac{h^{-1} - (d_{1y} + d_{2y}|v_y|)}{m_a - \lambda_{22}} & \frac{(m_a - \lambda_{33})\omega_x}{m_a - \lambda_{22}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{(m_a - \lambda_{11})\omega_y}{m_a - \lambda_{33}} & \frac{-(m_a - \lambda_{22})\omega_x}{m_a - \lambda_{33}} & \frac{h^{-1} - (d_{1z} + d_{2z}|v_z|)}{m_a - \lambda_{33}} & h^{-1} & 0 & 0 \\ s_\psi c_\theta & c_\psi s_\theta s_\varphi - s_\psi c_\varphi & s_\psi s_\varphi + c_\psi c_\varphi s_\theta & 0 & h^{-1} & 0 \\ s_\psi c_\theta & c_\psi c_\varphi + s_\varphi s_\theta s_\psi & s_\theta s_\psi c_\varphi - c_\psi s_\varphi & 0 & 0 & h^{-1} \\ -s_\theta & c_\theta s_\varphi & c_\theta c_\varphi & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} h & 0 & 0 \\ 0 & h & 0 \\ 0 & 0 & h \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} T_x + P a s_\theta / (m_a - \lambda_{11}) \\ -P a c_\theta s_\varphi / (m_a - \lambda_{22}) \\ T_z - P a c_\theta c_\varphi / (m_a - \lambda_{33}) \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ x \\ y \\ z \end{bmatrix},$$

где h – шаг дискретизации системы.

Модель (6) может быть использована в фильтре Калмана для оценки вектора линейных скоростей в ССК и вектора координат в АСК на этапе прогнозирования. Следует отметить, что из-за того, что угловые скорости и углы ориентации не требуют дополнительной оценки, модель (6) является линейной и не приводит к увеличению сложности реализации фильтра.

Таким образом, этап прогнозирования выполняется с помощью следующих формул [26]:

$$\begin{aligned} X(k+1|k) &= A(k)X(k) + BF(k) \\ P(k+1|k) &= A(k)P(k)A(k)^T + Q, \end{aligned} \quad (7)$$

где $X(k+1|k)$ – прогнозируемое значение вектора состояния; $P(k+1|k) \in R^{6 \times 6}$ – прогнозируемое значение матрицы ковариации ошибок оценки вектора состояния; $Q \in R^{6 \times 6}$ – матрица ковариации шумов системы.

Этап коррекции в фильтре реализован в двух вариантах. Если данных от ГАСО не поступило, то коррекция происходит с использованием данных от датчика глубины. В этом случае этап коррекции осуществляется на каждом шаге расчета фильтра по следующим формулам:

$$\begin{aligned} K_{Gz} &= P(k+1|k)H_z^T(H_zP(k+1|k)H_z^T + R_z)^{-1} \\ X(k+1) &= X(k+1|k) + K_{Gz}(Y_z - H_zX(k+1|k)), \\ P(k+1) &= (I - K_{Gz}H_z)P(k+1|k), \\ Y_z &= z_s, H_z = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1], \end{aligned} \quad (8)$$

где $K_{Gz} \in R^6$ – вектор коэффициентов фильтра в случае, когда коррекция осуществляется на основе только показаний датчика глубины; R_z – матрица ковариации шумов измерения; Y_z и H_z – вектор и матрица измерения; z_s – показания датчика глубины; $I \in R^{6 \times 6}$ – единичная диагональная матрица.

Второй вариант используется в случае, когда приходят данные от ГАСО с информацией о дистанции и пеленге АНПА относительно ГАСО. В этом случае коррекция выполняется за несколько последовательных шагов.

На первом шаге необходимо пересчитать данные от ГАСО в значения координат x, y АНПА в АСК, при этом считается, что положение и ориентация ГАСО в АСК известна. Это делается по следующим формулам.

$$\begin{aligned} x_{sg} &= \left(D_g^2 - (z_g - z_s)^2\right)^{\frac{1}{2}} \cos \alpha_g, \quad y_{sg} = \left(D_g^2 - (z_g - z_s)^2\right)^{\frac{1}{2}} \sin \alpha_g, \\ x_s &= x_{sg} \cos \psi_g + y_{sg} \sin \psi_g + x_g, \\ y_s &= -x_{sg} \sin \psi_g + y_{sg} \cos \psi_g + y_g, \end{aligned} \quad (9)$$

где D_g – измеренная дистанция от ГАСО до АНПА; (x_g, y_g, z_g) – координаты ГАСО в АСК; α_g – угол пеленга на АНПА, относительно ГАСО; ψ_g – ориентация ГАСО по углу курса.

Из выражений (9) видно, что в работе для простоты считается, что ориентация ГАСО по углам крена и дифферента равна 0, что обычно выполняется. При этом если указанные углы отличны от 0, то это можно учесть, используя полную матрицу поворота по трем углам ориентации.

На втором шаге происходит компенсация временной задержки, которая возникает из-за конечной скорости распространения акустических сигналов в воде. Указанная задержка рассчитывается по следующим формулам:

$$t_\Delta = \frac{3D_g}{v_s} + \frac{N_G}{B_r}, \quad (10)$$

где v_s – скорость звука в воде; N_G – количество байт в пакете данных, пересылаемых от ГАСО к АНПА; B_r – скорость передачи данных по акустическим каналам связи.

В выражении (10) используется утроенная величина дистанции между ГАСО и АНПА, так как акустический сигнал в процессе измерения проходит расстояние от ГАСО до АНПА и обратно, а затем в процессе передачи данных по акустическому каналу от ГАСО до АНПА. При этом учет указанной задержки не только позволит увеличить точность определения координат АНПА, но и увеличить точность определения линейных скоростей движения АНПА, что существенно влияет на качество работы бортовой системы управления.

Учет указанной задержки будет происходить следующим образом (рис. 2). В процессе работы навигационной системы происходит сохранение рассчитанных векторов $X(k)$ в буфер типа FIFO (First Input First Output), в котором новые данные записываются в начало буфера, наиболее старые из буфера убираются, а все остальные сдвигаются на одну позицию назад. Так как вычисления вектора $X(k)$ происходят с постоянным шагом h , то каждая ячейка хранит данные, отстоящее от текущего шага на промежуток времени nh , где n – номер ячейки буфера.

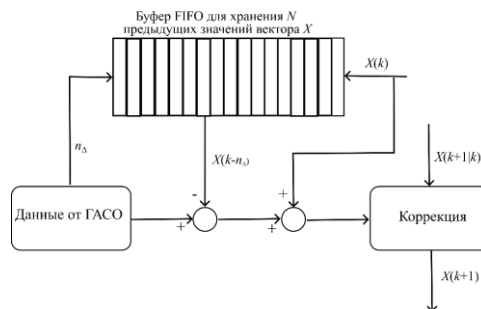


Рис. 2. Схема учета задержек получения навигационных данных от ГАСО

После расчета величины t_{Δ} в буфере ищется ячейка, соответствующая этой задержке, то есть:

$$n_{\Delta} = \text{mod} \left(\frac{t_{\Delta}}{h} \right),$$

где n_{Δ} – номер ячейки буфера, в которой хранятся оценки вектора $X(k - n_{\Delta})$, сформированного в момент когда ГАСО произвела измерение; $\text{mod}()$ – операция взятия целой части от частного.

Далее формируется вектор измерений для коррекции показаний навигационной системы:

$$Y_{xyz} = \begin{bmatrix} x(k) + (x_s - x(k - n_{\Delta})) \\ y(k) + (y_s - y(k - n_{\Delta})) \\ z_s \end{bmatrix}, \quad (11)$$

где $x(k - n_{\Delta}), y(k - n_{\Delta})$ – соответствующие компоненты вектора $X(k - n_{\Delta})$, хранящегося в буфере.

После формирования вектора измерений Y_{xyz} происходит коррекция текущей оценки вектора $X(k + 1|k)$:

$$\begin{aligned} K_{Gxyz} &= P(k + 1|k) H_{xyz}^T (H_{xyz} P(k + 1|k) H_{xyz}^T + R_{xyz})^{-1}, \\ X(k + 1) &= X(k + 1|k) + K_{Gxyz} (Y_{xyz} - H_{xyz} X(k + 1|k)), \\ P(k + 1) &= (I - K_{Gxyz} H_{xyz}) P(k + 1|k), \\ H_{xyz} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (12)$$

где $K_{Gxyz} \in R^{6 \times 3}$ – матрица коэффициентов фильтра для случая, когда коррекция происходит по данным, полученным от ГАСО; $R_{xyz} \in R^{3 \times 3}$ – ковариационная матрица шумов измерений для случая, когда коррекция происходит по данным, полученным от ГАСО.

В результате предложенная система навигации АНПА обеспечивает коррекцию оценок линейных скоростей и координат АНПА на основе нерегулярно поступающих от ГАСО данных с учетом переменных задержек этих данных.

Результаты моделирования. Для исследования предложенного метода построения навигационной системы было проведено математическое моделирование. Для этого была разработана модель, описывающая формирование данных о положении АНПА с помощью ГАСО. Эта модель на основе текущих координат ГАСО и АНПА, вычисляет дистанцию D_g и пеленг α_g АНПА относительно ГАСО. К рассчитанным величинам добавлялась случайная погрешность, амплитуда которой, составляла заданную долю от измеренной величины, а затем полученные зашумленные данные дискретизировались с заданным шагом по дистанции и углу пеленга, соответственно. Сформированные данные, которые имитируют навигационные данные от ГАСО передаются с задержкой, зависящей от дистанции между АНПА и ГАСО и скорости передачи данных по акустическому каналу, в модель навигационной системы АНПА, которая реализуется с помощью выражений (6)-(12). При этом передача указанных данных в модель навигационной системы АНПА происходит с заданной вероятностью, что позволяет моделировать случайный процесс искажения и потери информации при передаче данных по акустическим каналам связи.

В процессе исследования моделировалось движение АНПА с помощью модели (1). На вход этой модели подавались следующие, изменяющиеся во времени, силы и моменты: $T_x = 10H, M_z = 5\sin(0.01t), T_z = 0, M_y = 0$, что имитировало движение АНПА в горизонтальной плоскости при движении по сложной криволинейной траектории.

Параметры математической модели АНПА имели следующие значения:

- ♦ матрица инерции АНПА $M_R = \text{diag}(100 \text{ кг}, 100 \text{ кг}, 100 \text{ кг}, 10.2 \text{ кгм}^2, 23.4 \text{ кгм}^2, 23.4 \text{ кгм}^2)$;
- ♦ матрица инерции присоединенных масс и моментов инерции $M_A = \text{diag}(-15 \text{ кг}, -185 \text{ кг}, -185 \text{ кг}, 5 \text{ кгм}^2, 9.6 \text{ кгм}^2, 9.6 \text{ кгм}^2)$;
- ♦ гидродинамические коэффициенты $d_1 = (18 \text{ Нс/м}, 105 \text{ Нс/м}, 105 \text{ Нс/м}, 20 \text{ Нмс}, 80 \text{ Нмс}, 80 \text{ Нмс}), d_2 = (18 \text{ Нс}^2/\text{м}^2, 105 \text{ Нс}^2/\text{м}^2, 105 \text{ Нс}^2/\text{м}^2, 20 \text{ Нмс}^2, 80 \text{ Нмс}^2, 80 \text{ Нмс}^2)$.

При реализации навигационной системы АНПА в модели (6) использовались параметры, отличающиеся от параметров модели (1) и имеющие следующие значения:

$$m_a = 100 \text{ кг}, \lambda_{11} = -13 \text{ кг}, \lambda_{22} = -165 \text{ кг}, \lambda_{33} = -205 \text{ кг}, d_{1x} = 16.0 \frac{\text{Нс}}{\text{м}},$$

$$d_{2x} = \frac{19.0 \text{ Нс}^2}{\text{м}^2}, \quad d_{1y} = 115.0 \frac{\text{Нс}}{\text{м}}, \quad d_{2y} = \frac{100.0 \text{ Нс}^2}{\text{м}^2}, \quad d_{1z} = 107.0 \frac{\text{Нс}}{\text{м}},$$

$$d_{2z} = 115.0 \text{ Нс}^2/\text{м}^2, P_a = 0.6H.$$

Шаг расчета навигационной системы был $h = 0.05 \text{ с}$.

Величины угловых скоростей, углов ориентации и координаты z (глубины), поступающие от соответствующих датчиков были зашумлены в соответствии с типовыми характеристиками указанных датчиков: величины угловой скорости 0.01 с^{-1} , величины углов 0.02 рад , глубина 0.1 м .

Модель ГАСО имела следующие параметры: погрешность определения дистанции 0.5% от измеренной величины; погрешность определения угла пеленга – 0.5° ; шаг дискретизации по дистанции – 0.5 м ; шаг дискретизации по углу пеленга – 0.5° ; вероятность успешной передачи данных от ГАСО к АНПА – 0.7 ; скорость звука в воде – 1500 м/с ; скорость передачи данных – 9600 бит/с ; длина навигационного пакета 172 бит .

Результаты работы навигационной системы, реализованной с помощью выражений (6)-(12) показаны на рис. 3-5.

На рис. 3,а,б показан процесс восстановления предложенной навигационной системой координат x и y АНПА в АСК.

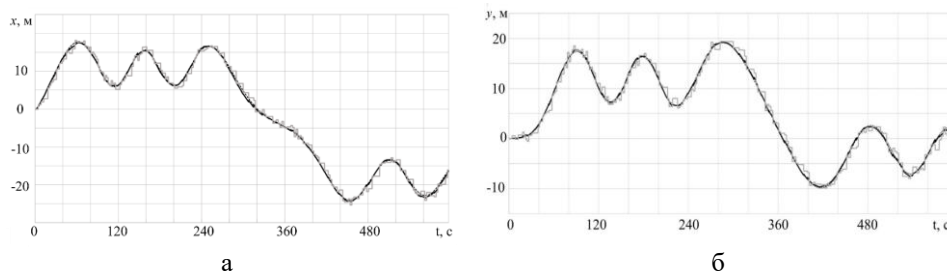


Рис. 3. Результат восстановления координат x и y с помощью предложенной навигационной системы АНПА

На этих рисунках черной сплошной линией показаны изменение оценки координат x и y с помощью предложенного алгоритма, черной пунктирной линией – изменение реальных координат АНПА, серой линией – величины координат АНПА, полученные от ГАСО. Из рисунков видно, что данные от ГАСО приходят с различным периодом, а также имеют достаточно большие ошибки и задержки.

Ошибки восстановления координат показаны на рис. 4,а,б. На этих рисунках черная кривая соответствует ошибке предложенной в работе навигационной системы, а серая кривая – ошибке определения координат с помощью ГАСО.

Как видно из представленных рисунков точность восстановления координат АНПА с помощью предложенного алгоритма увеличивается более чем в три раза по сравнению с использованием данных от ГАСО. При использовании ГАСО ошибка определения координат может достигать 3м, а при использовании предложенного алгоритма не превышает 0.9 м. При этом обновление данных от навигационной системы происходит с периодом 0.05 с, при периоде обновления данных от ГАСО не менее, чем 1.5 с. Это позволяет реализовывать высокоточные системы управления движением АНПА и решать большинство традиционных задач, стоящих перед АНПА.

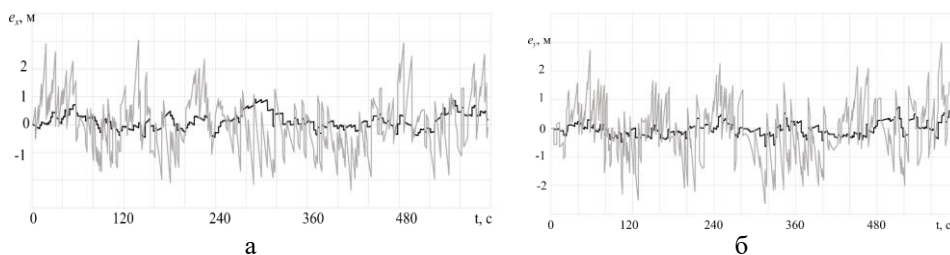


Рис. 4. Ошибка восстановления координат x и y АНПА с помощью предложенной навигационной системы

На рис. 5 представлен процесс восстановления скоростей движения АНПА в ССК: черная линия – v_x , серая линия – v_y .

Как видно из представленного рисунка, погрешность восстановления линейных скоростей движения АНПА с помощью предложенного алгоритма не превышает 0.05 м/с, что достаточно для выполнения большинства подводных операций. При этом становится возможным восстанавливать даже небольшие значения скоростей.

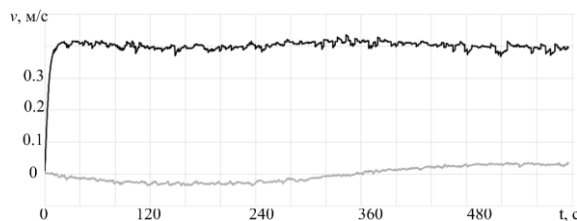


Рис. 5. Процесс восстановления скоростей АНПА в ССК

Заключение. В работе предложен метод построения навигационной системы АНПА, использующей ограниченный набор бортовых датчиков и получающей данные по акустическим каналам связи о положении АНПА от гидроакустической станции освещения подводной обстановки. Предложенный алгоритм формирует оценки положения и скоростей АНПА на основе его динамической модели в предположении, что угловые скорости, углы ориентации и глубина АНПА определяются с помощью его бортовых датчиков. Для реализации навигационного алгоритма используется фильтр Калмана. При этом особенность этого алгоритма заключается в реализации двухступенчатой процедуры коррекции оценок координат и линейных скоростей АНПА, полученных на основе его динамической модели. Указанная коррекция осуществляется в двух вариантах в зависимости от того, какие данные доступны на текущем шаге работы системы. Первый вариант предполагает коррекцию указанных оценок только на основе данных от датчика глубины, обновление которых происходит на каждом шаге работы системы. А второй вариант используется, когда приходят данные от ГАСО по акустическим каналам связи. Эти данные приходят с задержкой из-за ограниченной скорости распространения акустических сигналов в водной среде, а также могут периодически искажаться и пропадать. В работе предложен метод компенсации указанных задержек, за счет сохранения массива ранее рассчитанных данных и оценки необходимых поправок за счет сравнения пришедших данных с оценками, полученными ранее. Предложенная схема построения навигационной системы позволяет обеспечить коррекцию ее показаний в условиях нерегулярного обновления данных от ГАСО. Результаты моделирования с использованием модели, описывающей все основные особенности работы ГАСО и ее взаимодействия с АНПА (задержки в получении информации, наличие шумов измерений и дискретизация данных ГАСО) показали достаточно высокую эффективность предложенного решения. При этом в качестве основного преимущества можно указать возможность использования минимального количества бортовых датчиков и возможность быстрого развертывания навигационного оборудования для взаимодействия с АНПА.

При этом в качестве дальнейшего развития предложенного подхода является адаптивная подстройка параметров динамической модели АНПА в процессе его функционирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Yuh J., Marani G., Blidberg R. Applications of marine robotic vehicles // *Intellegent Service Robotics*. – 2011. – No. 4. – P. 221-231.
2. Yu L. et al. Inspection Robots in Oil and Gas Industry: a Review of Current Solutions and Future Trends // *2019 25th International Conference on Automation and Computing (ICAC)*. Lancaster, United Kingdom. – 2019. – P. 1-6.
3. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А. и др. Особенности синтеза высокоточных систем управления скоростным движением и стабилизацией подводных аппаратов в пространстве. – Владивосток: Дальнаука, 2016. – 400 с.

4. Inzartsev A.V., Kamornyi A.V., Kiselev L.V. et al. The Integrated Navigation System of an Autonomous Underwater Vehicle and the Experience from Its Application in High Arctic Latitudes // *Gyroscopy and Navigation*. – 2010. – Vol. 1, No. 2. – P. 107-112.
5. Ваулин Ю.В., Дубровин Ф.С., Щербатюк А.Ф. Интегрированная система навигации и связи АНПА «ММТ-3000» и опыт ее использования в работах на глубоководных протяженных трассах // *Подводные исследования и робототехника*. – 2017. – № 2 (24). – С. 14-19.
6. Eustice R.M., Whitcomb L.L., Singh H., Grund M. Experimental Results in Synchronous-Clock One-Way-Travel-Time Acoustic Navigation for Autonomous Underwater Vehicles // *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*. Rome, Italy. – 2007. – P. 4257-4264.
7. Dubrovina F.S., Scherbatyuk A.F., Scherbatyuk D.A., Rodionov A.Yu., Vaulin Yu.V. Some algorithms of differential-ranging acoustic positioning system intended for AUV group navigation // *Proc. of the OCEANS 2020 MTS/IEEE Conference*, Singapore-U.S. Gulf Coast. – 2020. – P. 1-4.
8. Ваулин Ю.В., Дубровин Ф.С., Щербатюк А.Ф., Щербатюк Д.А. Разностно-дальномерная система навигации для обеспечения групповой работы морских робототехнических комплексов // *Подводные исследования и робототехника*. – 2020. – № 2 (32). – С. 22-33.
9. Cario G., Casavola A., Djapic V., Gjanci P., Lupia M., Petrioli C., Spaccini D. Clock Synchronization and Ranging Estimation for Control and Cooperation of Multiple UUVs // *Proc. of the MTS/IEEE Int. Conf. OCEANS 2016*. Shanghai, China. – 2016. – P. 1-9.
10. Antonelli G., Caffaz A., Casalino G., Pollini L. The Widely scalable Mobile Underwater Sonar Technology (WiMUST) H2020 project: First year status // *Proc. of OCEANS 2016*. Shanghai, China. – 2016. – P. 1-8.
11. Caiti A., Calabrò V., Fabbri T., Fenucci D., Munafò A. Underwater communication and distributed localization of AUV teams // *Proc. of the 2013 MTS/IEEE OCEANS – Bergen*. Bergen, Norway. – 2013. – P. 1-8.
12. Fallon M., Papadopoulos G., Leonard J. Cooperative AUV Navigation using a Single Surface Craft // *Field and Service Robotics: Results of the 7th Int. Conf.* – 2009. – P. 331-340.
13. Fallon M., Papadopoulos G., Leonard J., Patrikalakis N. Cooperative AUV Navigation using a Single Maneuvering Surface Craft // *The Int. J. of Robotics Research*. – 2010. – Vol. 29, No. 12. – P. 1-27.
14. Papadopoulos G., Fallon M., Leonard J., Patrikalakis N. Cooperative Localization of Marine Vehicles using Nonlinear State Estimation // *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*. – 2010. – P. 1-6.
15. Дубровин Ф.С., Щербатюк А.Ф. О методе оценивания точности работы одномаяковой мобильной навигационной системы подводного аппарата с помощью водного аппарата, оснащенного DGPS // *Подводные исследования и робототехника*. – 2016. – № 1. – С. 31-40.
16. Кебал К.Г. и др. Гидроакустические модемы с интегрированными цезиевыми часами для задач подводного позиционирования автономных необитаемых подводных аппаратов // *Подводные исследования и робототехника*. – 2019. – № 2 (28). – С. 4-12.
17. Donovan G.T. Position Error Correction for an Autonomous Underwater Vehicle Inertial Navigation System (INS) Using a Particle Filter // *IEEE Journal of oceanic engineering*. – 2012. – Vol. 37, No. 3. – P. 431-445.
18. Menna B.V., Villar S.A., Acosta G.G. Particle filter based autonomous underwater vehicle navigation system aided thru acoustic communication ranging // *Proc. of the OCEANS 2020 MTS/IEEE Conf.*, Singapore-U.S. Gulf Coast. – 2020. – P. 1-10.
19. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А., Мурсалимов Э.Ш. Метод комплексирования данных с навигационных датчиков подводного аппарата с использованием нелинейного фильтра Калмана // *Мехатроника, автоматизация и управление*. – 2012. – № 8. – С. 64-70.
20. Fossen T. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. – John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2011. – 582 p.
21. Пантов Е.Н., Махин Е.Е., Шереметов Б.Б. Основы теории движения подводных аппаратов. – Л.: Судостроение, 1973. – 209 с.
22. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А., Мурсалимов Э.Ш. Метод идентификации параметров математической модели подводного аппарата // *Мехатроника, автоматизация и управление*. – 2012. – № 10. – С. 64-70.
23. Ikonen E., Najim K. Advanced process identification and control. – Marsel Dekker Inc, 2002. – 310 p.
24. Golding B., Ross A., Fossen T. Identification of nonlinear viscous damping for marine vessels // 14th IFAC Symposium on System Identification. Newcastle, Australia. – 2006. – P. 332-337.

25. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А., Зуев А.В., Губанков А.С., Минаев Д.Д. Цифровая платформа для реализации распределенных систем управления и навигации для подводных робототехнических комплексов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 1. – С. 81-93.
26. Haykin S. Kalman filtering and neural networks. – John Wiley and Sons, 2001. – 298 p.

REFERENCES

1. Yuh J., Marani G., Blidberg R. Applications of marine robotic vehicles, *Intelligent Service Robotics*, 2011, No. 4, pp. 221-231.
2. Yu L. et al. Inspection Robots in Oil and Gas Industry: a Review of Current Solutions and Future Trends, *2019 25th International Conference on Automation and Computing (ICAC)*. Lancaster, United Kingdom, 2019, pp. 1-6.
3. Filaretov V.F., Yukhimets D.A. i dr. Osobennosti sinteza vysokotochnykh sistem upravleniya skorostnym dvizheniem i stabilizatsiei podvodnykh apparatov v prostranstve [Features of synthesis of high-precision control systems for high-speed movement and stabilization of underwater vehicles in space]. Vladivostok: Dal'nauka, 2016, 400 p.
4. Inzartsev A.V., Kamornyi A.V., Kiselev L.V. et al. The Integrated Navigation System of an Autonomous Underwater Vehicle and the Experience from Its Application in High Arctic Latitudes, *Gyroscopy and Navigation*, 2010, Vol. 1, No. 2, pp. 107-112.
5. Vaulin Yu.V., Dubrovin F.S., Shcherbatyuk A.F. Integrirovannaya sistema navigatsii i svyazi ANPA «MMT-3000» i opyt ee ispol'zovaniya v rabotakh na glubokovodnykh protyazhennykh trassakh [Integrated navigation and communication system of the AUV "MMT-3000" and experience of its use in work on deep-water extended routes], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater Investigations and Robotics], 2017, No. 2 (24), pp. 14-19.
6. Eustice R.M., Whitcomb L.L., Singh H., Grund M. Experimental Results in Synchronous-Clock One-Way-Travel-Time Acoustic Navigation for Autonomous Underwater Vehicles, *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. Rome, Italy*, 2007, pp. 4257-4264.
7. Dubrovin F.S., Shcherbatyuk A.F., Shcherbatyuk D.A., Rodionov A.Yu., Vaulin Yu.V. Some algorithms of differential-ranging acoustic positioning system intended for AUV group navigation, *Proc. of the OCEANS 2020 MTS/IEEE Conference, Singapore-U.S. Gulf Coast*, 2020, pp. 1-4.
8. Vaulin Yu.V., Dubrovin F.S., Shcherbatyuk A.F., Shcherbatyuk D.A. Raznostno-dal'nomernaya sistema navigatsii dlya obespecheniya gruppovoy raboty morskikh robototekhnicheskikh kompleksov [Differential-ranging navigation system for group work of marine robotic complexes], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater Investigations and Robotics], 2020, No. 2 (32), pp. 22-33.
9. Cario G., Casavola A., Djapic V., Gjanci P., Lupia M., Petrioli C., Spaccini D. Clock Synchronization and Ranging Estimation for Control and Cooperation of Multiple UUVs, *Proc. of the MTS/IEEE Int. Conf. OCEANS 2016. Shanghai, China*, 2016, pp. 1-9.
10. Antonelli G., Caffaz A., Casalino G., Pollini L. The Widely scalable Mobile Underwater Sonar Technology (WiMUST) H2020 project: First year status, *Proc. of OCEANS 2016. Shanghai, China*, 2016, pp. 1-8.
11. Caiti A., Calabrò V., Fabbri T., Fenucci D., Munafò A. Underwater communication and distributed localization of AUV teams, *Proc. of the 2013 MTS/IEEE OCEANS – Bergen. Bergen, Norway*, 2013, pp. 1-8.
12. Fallon M., Papadopoulos G., Leonard J. Cooperative AUV Navigation using a Single Surface Craft, *Field and Service Robotics: Results of the 7th Int. Conf.*, 2009, pp. 331-340.
13. Fallon M., Papadopoulos G., Leonard J., Patrikalakis N. Cooperative AUV Navigation using a Single Maneuvering Surface Craft, *The Int. J. of Robotics Research*, 2010, Vol. 29, No. 12, pp. 1-27.
14. Papadopoulos G., Fallon M., Leonard J., Patrikalakis N. Cooperative Localization of Marine Vehicles using Nonlinear State Estimation, *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 2010, pp. 1-6.
15. Dubrovin F.S., Shcherbatyuk A.F. O metode otsenivaniya tochnosti raboty odnomayakovoy mobil'noy navigatsionnoy sistemy podvodnogo apparata s pomoshch'yu vodnogo apparata, osnashchennogo DGPS [About the method of evaluating the accuracy of the operation of a single-beacon mobile navigation system of an underwater vehicle using a water vehicle equipped with DGPS], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater Investigations and Robotics], 2016, No. 1, pp. 31-40.

16. *Kebkal K.G. i dr. Hidroakusticheskie modemy s integrirovannymi tsezievymi chasami dlya zadach podvodnogo pozitsionirovaniya avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov* [Hydroacoustic modems with integrated cesium clocks for underwater positioning tasks of autonomous uninhabited underwater vehicles], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater Investigations and Robotics], 2019, No. 2 (28), pp. 4–12.
17. *Donovan G.T. Position Error Correction for an Autonomous Underwater Vehicle Inertial Navigation System (INS) Using a Particle Filter*, *EEE Journal of oceanic engineering*, 2012, Vol. 37, No. 3, pp. 431-445.
18. *Menna B.V., Villar S.A., Acosta G.G. Particle filter based autonomous underwater vehicle navigation system aided thru acoustic communication ranging*, *Proc. of the OCEANS 2020 MTS/IEEE Conf., Singapore-U.S. Gulf Coast*, 2020, pp. 1-10.
19. *Filaretov V.F., Yukhimets D.A., Mursalimov E.Sh. Metod kompleksirovaniya dannykh s navigatsionnykh datchikov podvodnogo apparata s ispol'zovaniem nelineynogo fil'tra Kalmana* [Method of Data Fusion from Navigation Sensors of Under-water Vehicle with Using Nonlinear Kalman Filter], *Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravlenie* [Mechatronics, automation and control], 2012, No. 8, pp. 64-70.
20. *Fossen T. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*. Jonh Willey & Sons, Chichester, UK, 2011, 582 p.
21. *Pantov E.N., Makhin E.E., Sheremetov B.B. Osnovy teorii dvizheniya podvodnykh apparatov* [Fundamentals of the theory of motion of underwater vehicles]. Leningrad: Sudostroenie, 1973, 209 p.
22. *Filaretov V.F., YUkhimets D.A., Mursalimov E.Sh. Metod identifikatsii parametrov matematicheskoy modeli podvodnogo apparata* [Method of Parameters Identification of Mathematical Model of Underwater Vehicle], *Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravlenie* [Mechatronics, automation and control], 2012, No. 10, pp. 64-70.
23. *Ikonen E., Najim K. Advanced process identification and control*. Marsel Dekker Inc, 2002, 310 p.
24. *Golding B., Ross A., Fossen T. Identification of nonlinear viscous damping for marine vessels*, *14th IFAC Symposium on System Identification. Newcastle, Australia*, 2006, pp. 332-337.
25. *Filaretov V.F., Yukhimets D.A., Zuev A.V., Gubankov A.S., Minaev D.D. Tsifrovaya plat-forma dlya realizatsii raspredelennykh sistem upravleniya i navigatsii dlya podvodnykh robototekhnicheskikh kompleksov* [Digital platform for the creation of distributed control and navigation systems for underwater vehicles], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFEDU. Engineering sciences], 2021, No. 1, pp. 81-93.
26. *Haykin S. Kalman filtering and neural networks*. John Wiley and Sons, 2001, 298 p.

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

Юхимец Дмитрий Александрович – Дальневосточный Федеральный университет, Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН; e-mail: yukhimets.da@dvfu.ru; г. Владивосток, Россия; д.т.н.; в.н.с.

Губанков Антон Сергеевич – Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Морской государственный университет им. адмирала Г.И. Невельского; e-mail: gubankov@dvo.ru; г. Владивосток, Россия; к.т.н.; с.н.с.

Yukhimets Dmitry Aleksandrovich – Far Eastern Federal University, Institute of Automation and Control Processes of FEB RAS; e-mail: yukhimets.da@dvfu.ru; Vladivostok, Russia; dr. of eng. sc.; leading researcher.

Gubankov Anton Sergeevich – Institute of Automation and Control Processes of FEB RAS, Maritime State University, e-mail: gubankov@dvo.ru; Vladivostok, Russia; cand. of eng. sc.; senior researcher.

В.А. Головской

**ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПОДСИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
РЕСУРСАМИ КОГНИТИВНОЙ РАДИОСИСТЕМЫ
РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА**

Исследование посвящено повышению эффективности функционирования робототехнических комплексов (РТК) за счет повышения конфликтной устойчивости их радиосистем передачи данных (РС). Наличие устойчивой тенденции к усложнению условий функционирования РТК обуславливает ужесточение требований к характеристикам РС РТК. Также на эти возрастающие требования накладывает ограничения необходимость функционирования в условиях сложного радиозлектронного конфликта, под которым понимается одновременное наличие антагонистического, коалиционного и индифферентного конфликтных электромагнитных взаимодействий. Предлагается для обеспечения требуемой конфликтной устойчивости наделить РС РТК когнитивными способностями, которые позволят осуществлять адаптацию ресурсов РС РТК к динамично изменяющимся условиям среды функционирования, в том числе – к перспективным. Цель работы – разработка функциональной модели подсистемы управления ресурсами когнитивной РС РТК, формализация которой позволит анализировать взаимосвязь структуры модели и свойств моделируемой системы. Приведена функциональная модель предлагаемой подсистемы управления телекоммуникационными ресурсами когнитивной РС РТК. Предложенная декомпозиция общей модели позволяет с конструктивистских позиций рассматривать алгоритм управления рассматриваемой подсистемой. Предложенный подход к построению указанного алгоритма базируется на теории финитных комбинаторных процессов Поста, эквивалентной другим известным подходам к формализации алгоритмов. Выбор указанной модели обоснован и согласован с актуальными подходами к построению баз знаний, предлагаемых для использования в развиваемой подсистеме. Выдвинутая гипотеза о потенциальной конфликтной устойчивости РС РТК подтверждена примером, в качестве которого рассмотрен конфликт с информационно-технической системой, способной осуществлять целевые электромагнитные воздействия. При этом рассмотрение комплексного понятия конфликтная устойчивость ограничено анализом одной из его ключевых составляющих – радиозлектронной защищенности. Предложено рассмотрение указанного конфликта как экземпляра массовой проблемы. Доказана неразрешимость предложенной массовой проблемы прогнозирования путем сведения к ней известной проблемы останова детерминированной машины Тьюринга.

Функциональная модель; алгоритм; робототехнический комплекс; массовая проблема; когнитивное радио; радиосистема; радиозлектронный конфликт.

V.A. Golovskoy

**THE FUNCTIONAL MODEL OF THE RESOURCE MANAGEMENT
SUBSYSTEM OF THE COGNITIVE RADIO SYSTEM
OF THE ROBOTIC COMPLEX**

The study is devoted to improving the efficiency of the functioning of robotic complexes (RTCs) by increasing the conflict stability of their data transmission radio systems (RS). The presence of a stable tendency to complicate the operating conditions of the RTK causes stricter requirements for the characteristics of the RTK RS. Also, these increasing requirements are limited by the need to function in conditions of a complex electronic conflict, which means the simultaneous presence of antagonistic, coalition and indifferent conflicting electro-magnetic interactions. In order to ensure the required conflict stability, it is proposed to endow the RTK RS with cognitive abilities that will allow the adaptation of the RTK RS resources to dynamically changing conditions of the functioning environment, including promising ones. The purpose of the work is to develop a functional model of the resource management subsystem of the cognitive RS RTK, the formalization of which will allow analyzing the relationship between the structure of the model and the properties of the simulated system. The functional model of the proposed subsystem for the

management of telecommunication resources of the cognitive RS RTK is given. The proposed decomposition of the general model allows us to consider the control algorithm of the subsystem under consideration from a constructivist perspective. The proposed approach to the construction of this algorithm is based on the theory of finite combinatorial Post processes, equivalent to other well-known approaches to the formalization of algorithms. The choice of this model is justified and consistent with the current approaches to the construction of knowledge bases proposed for use in the developed subsystem. The hypothesis put forward about the potential conflict stability of the RTK RS is confirmed by the example, as which the conflict with an information technology system capable of carrying out targeted electromagnetic effects is considered. At the same time, consideration of the complex concept of conflict stability is limited to the analysis of one of its key components – electronic security. It is proposed to consider this conflict as an instance of a mass problem. The unsolvability of the proposed mass prediction problem is proved by reducing to it the well-known problem of stopping a deterministic Turing machine.

Functional model; algorithm; robotic complex; problem; cognitive radio; radio system; electronic conflict.

Введение. Настоящий технологический уклад характеризуется увеличением роли интеллектуализированных технических средств в различных сферах жизнедеятельности общества. К указанным средствам относятся и робототехнические комплексы (РТК), используемые, в том числе, для нужд обороны и обеспечения безопасности государства [1–6].

Радиоэлектронный конфликт (РЭК), заключающийся в ведении его участниками радиоэлектронной борьбы и разведки, становится все более актуальной стороной активного противоборства [7–11], что обуславливает ужесточение условий функционирования РТК и, соответственно, требований к их характеристикам. Примерами таких, иногда противоречивых, характеристик могут быть автономность РТК, ресурсные ограничения и конфликтная устойчивость радиосистем передачи данных (РС) РТК [2, 3, 12].

Каналы РС являются наиболее уязвимым местом РТК при рассмотрении неогневых воздействий, следовательно характеристики РС определяют состояние защищенности ресурсов РТК и способность выполнять поставленные задачи [8].

Под РТК в работе понимается киберфизическая система, включающая в себя:

- ◆ группу выполняющих специальные задачи робототехнических средств (РТС), в общем случае гетерогенных;
- ◆ пункт управления, осуществляющий управление и обработку информации;
- ◆ РС и подсистемы обеспечения.

Будем полагать по аналогии с [8], что являющаяся объектом исследования РС РТК обеспечивает:

- ◆ обмен разнородными данными между РТС и пунктом управления, а также между РТС в группе;
- ◆ ретрансляцию сигналов как для нужд РТК, так и для коалиционных систем.

Постановка задачи. В целях обеспечения требуемых характеристик РС РТК ранее предлагалось [13, 14 и др.] наделение подсистем управления ресурсами РС РТК когнитивными способностями, заключающимися в возможностях получения знаний о среде эксплуатации и о своем внутреннем состоянии, динамически и автономно корректировать свои эксплуатационные параметры и протоколы согласно формируемым знаниям для достижения поставленных целей, а также позволяющие системе учиться на основе полученных результатов [15].

Принципы функционирования когнитивных радиосистем (КРС) впервые были предложены применительно к задачам более эффективного использования радиочастотного спектра [16]. При последующем развитии этой тематики сформировались следующие основные направления исследований: оценивание радиочастотного спектра [17–19] и оптимизация функционирования КРС [20, 21].

В настоящее время исследования, посвященные использованию принципов когнитивного радио для обеспечения комплексной безопасности РС, функционирующих в условиях РЭК, активно проводятся всеми технологически развитыми государствами [11, 22–25]. Причиной такой активности является потенциальная возможность обеспечения электромагнитного превосходства за счет использования КРС в фиксированной пространственной области в условиях сложного РЭК [11, 26, 27], под которым понимается одновременное наличие антагонистического, коалиционного и индифферентного конфликтных электромагнитных взаимодействий [8]. Необходимо отметить, что в настоящее время имеет место тенденция к постоянному обострению РЭК, обусловленная усложнением содержания и увеличением его динамики [8].

В работах [14, 28] были предложены принципы функционирования подсистемы управления ресурсами КРС РТК, однако они не были достаточно обоснованы и не было показано их влияние на конфликтную устойчивость РС РТК.

Цель работы – разработка функциональной модели подсистемы управления телекоммуникационными ресурсами когнитивной РС РТК, формализация которой позволит анализировать взаимосвязь структуры модели и свойств моделируемой системы.

Предлагаемая функциональная модель подсистемы управления телекоммуникационными ресурсами когнитивной конфликтно-устойчивой РС РТК представлена на рис. 1 с использованием нотации IDEF0.



Рис. 1. Модель функционирования рассматриваемой подсистемы

В качестве телекоммуникационных ресурсов КРС рассматриваются диапазоны частот, ширина спектра сигналов, тип сигнально-кодовой конструкции, тип мультиплексирования, режим работы, типы пакета и другие, позволяющие в системном единстве обеспечивать требуемые характеристики РС РТК [14].

Принимая в качестве допущения, что входящий в диаграмму поток «Аппаратное обеспечение», выполняющий роль нерасходуемого ресурса моделируемой системы, реализуем и полностью удовлетворяет предъявляемым требованиям, рассмотрим содержание потоков «Данные», «Целевые установки», «Принятые решения» и «Программное обеспечение».

С учетом того, что для РС необходимы знания о среде эксплуатации, включающие данные о распространении радиоволн, необходимые для прогнозирования изменений характеристик среды и выбора, исходя из этого прогноза, оптимальной конфигурации телекоммуникационных ресурсов РС, предлагается декомпозиция общей модели, приведенная на рис. 2.

Рассмотрим предлагаемое содержание нерасходуемого ресурса «Программное обеспечение», которым выступает алгоритм управления телекоммуникационными ресурсами КРС.

Для требуемого алгоритма A^{CRS} входом должны быть [14, 28, 29]: данные о внешней среде (χ) и о состоянии абонента КРС (β), а также целевые установки (τ), определяющие приоритеты функционирования, а выходом – описание требуемого состояния его телекоммуникационного оборудования ($\omega_{k+\Delta_k}$), т.е.

$$A^{CRS}(\chi, \beta, \tau) = \omega_{k+\Delta_k}. \quad (1)$$

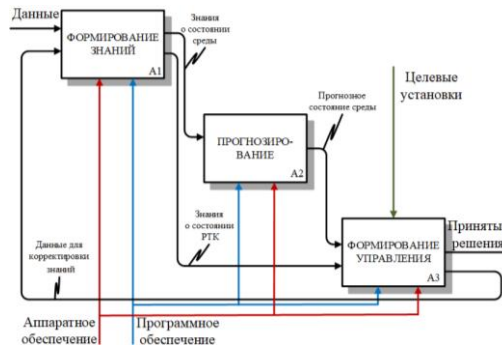


Рис. 2. Функциональная модель подсистемы управления ресурсами РС РТК

Модель алгоритма управления ресурсами. Требуемый алгоритм может быть формализован при помощи любой из известных эквивалентных вычислительных моделей. Предлагается для построения модели алгоритма A^{CRS} использовать аппарат продукционных систем, поскольку этот подход имеет ряд таких достоинств, существенных для рассматриваемой проблемной области, как возможность автоматического формирования знаний и относительная простота создания и актуализации продукционной базы знаний [29, 30].

Продукционные системы оперируют со словами, построенными в основном и вспомогательном алфавитах. Исходя из этого опишем состояние КРС при помощи слов – конечных последовательностей элементов алфавита. Далее в работе слово *qwerty* из множества непустых слов в конечном алфавите $A = \{q, w, e, r, t, y, \dots, x\}$ будет обозначаться $qwerty \in A^+$, префикс *qw* слова *qwerty* будет обозначаться $qw \sqsubseteq qwerty$.

В работах [14, 29] было предложено использование множества образов $\Omega = \{\omega_q\}, q = 1, N_Q$, каждый из которых позволяет описать уникальное состояние телекоммуникационного оборудования КРС словом из множества

$$\Omega = \prod_{i=1}^{N_I} M_i = \left\{ \left(m_1^1 m_1^2 \dots m_1^{N_I} \right)_k, i = \overline{1, N_I}, q = \overline{1, N_Q} \right\}, \quad (2)$$

где M_i – конечное множество, задающее набор возможных значений i -й характеристики телекоммуникационного оборудования КРС, $m_1^1 \in M_1, m_1^2 \in M_2, \dots, m_1^{N_I} \in M_{N_I}$. Слово ω_q описывает состояние телекоммуникационного оборудования КРС, и следовательно, состояние соответствующей рассматриваемому абоненту КРС логической радиолнии [11]. При этом необходимо отметить, что имеет место соотношение [29]

$$|\Omega| < \prod_{i=1}^{N_I} |M_i|.$$

Предлагается в развитие работы [29] формализовать A^{CRS} с помощью продукционной системы

$$A^{CRS} = \langle E, B, V, \Pi \rangle, \quad (3)$$

где $E = P \cup T$ – основной алфавит, содержащий следующие подмножества: $P = \{\rho_e\}, e = \overline{1, N_E}$, – алфавит для описания текущей и перспективной радиоэлектронной обстановки и условий распространения радиоволн в ограниченной области пространства;

$T = A \cup M$ – алфавит, содержащий подмножества для описания состояний КРС $M = (m_j^1, m_v^2, \dots, m_i^{N_i})$ и РТС $A = \{\alpha_r\}, r = \overline{1, N_A}$, $P \cap T = \emptyset$; $B = \{b_f\}, f = \overline{0, N_F}$, – вспомогательный алфавит, содержащий символы, необходимые для разделения терминальных слов от нетерминальных; $V = \{x_p\}, p = \overline{1, N_P}$, – алфавит переменных; $E \cap B \cap V = \emptyset$; $\Pi = \{\pi_u\}, u = \overline{1, N_U}$, – совокупность продукций в алфавитах E, B и V , содержащая как продукции-аксиомы, так и продукции, не являющиеся таковыми.

Все слова из Ω выводимы при помощи системы (3), т.е. она описывает с конструктивистских позиций способ построения интересующего алгоритма (1), являющегося перечисляющим для словарного множества Ω .

С учетом принятых обозначений модель, приведенная на рис. 2, может быть пояснена следующим образом.

На вход A1 поступают подготовленные «Данные», т.е. наборы данных о внешней среде $\chi = \langle \rho_e, t_s \rangle$ и о состоянии РТС $\beta = \langle \{\alpha_r\}, m_j^1, m_v^2, \dots, m_i^{N_i} \rangle$. Наборы β поступают с датчиков и систем РТК и по сути являются телеметрируемыми параметрами. Наборы χ могут быть получены из принятых радиоволн $\{\rho_e\}$ и от коалиционных информационно-технических систем $\{t_s\}$.

Знания о своей среде эксплуатации должны учитывать характеристики распространения радиоволн на занимаемой территории, которые в настоящее время с достаточной точностью описываются соответствующими моделями ослабления [14, 31]. Вследствие этого из блока A1 на вход A2 поступают знания о среде эксплуатации, полученные за счет предложенных в работе [31] процедур, в виде слов

$$\chi^k = \{env_m\}, env_m \in (P \cup V)^+, \quad (4)$$

а на вход в A3 знания о состоянии РТК

$$\beta^k = \{r_st_j\}, r_st_j \in (T \cup V)^+, \quad (5)$$

где $crs_st_j \sqsubseteq r_st_j$ – знания о состоянии КРС.

На основании сформированных в блоке A1 знаний (4) в блоке A2 формируются прогнозные оценки состояния среды, включающие знания об антагонистической электромагнитной деятельности

$$\chi_\Delta^k = \{env_{m+\Delta m}\}, env_{m+\Delta m} \in (P \cup V)^+.$$

На основании знаний о среде (4) и о состоянии РТК (5), а также «Целевых установок» τ в блоке A3 формируются «Принятые решения» δ на выбор нового состояния телекоммуникационного оборудования КРС, описываемого словом $\omega_{q+\Delta q} \in \Omega$, т.е. $\delta_y(\omega_q) = \omega_{q+\Delta q}, y = \overline{1, N_Y}$. На алгоритмическом уровне δ_y является следствием выбора на основании целевых установок τ той или иной группы продукций-неаксиом из Π .

Из блока A3 на вход A1 поступают знания о новом состоянии РС

$$\beta^k = \{crs_st_{j+\Delta j}\}, crs_st_j \in (M \cup V)^+, \quad (6)$$

учитывающие текущую и перспективную адаптацию КРС.

Предложенная формализация функциональной модели алгоритмом (3) позволяет, с одной стороны, получить достаточно полное представление об основных этапах обработки «данных-информации-знаний», с другой стороны, – за счет общего описания функционирования блоков A1, A2, A3 учитывать возможность различного методического наполнения указанных блоков. Например, содержание блока A3 может быть описано путем указания конкретных методов адаптации радиосистем к помеховой обстановке, достаточно хорошо проработанных и продолжающих развиваться.

Рассмотрим применение предложенной формализации алгоритма (1) к вопросу анализа конфликтной устойчивости абонента КРС. При этом остановимся только на рассмотрении одной составляющей конфликтной устойчивости – радиоэлектронной защищенности.

Интеллектуализация средств радиоэлектронной борьбы [9, 11, 27] ведет к сокращению времени анализа результатов разведки при повышении его качества, а также к прогнозированию действий противостоящей стороны РЭК.

Далее в соответствии с предложенным в [32] подходом будет рассматриваться с теоретико-алгоритмических позиций РЭК абонента КРС с антагонистической информационно-технической системой (АИТС), способной вести целевую электромагнитную деятельность (ЦЭМД). При этом приняты допущения:

- ♦ необходимым и достаточным условием реализации ЦЭМД в отношении абонента КРС является успешно проведенная его идентификация в результате прогнозирования АИТС состояния абонента КРС на основании имеющихся описаний A^{CRS} и данных о текущем состоянии абонента КРС (ω_q);

- ♦ при рассмотрении алгоритмов функционирования АИТС и A_{CRS} принята абстракция потенциальной осуществимости.

С учетом принятых допущений особый интерес представляет вопрос о наличии у АИТС потенциальной возможности прогнозировать состояния КРС.

При проведении исследований сформулирована следующая **гипотеза**: предложенные потенциальные когнитивные способности абонента КРС способствуют максимизации радиоэлектронной защищенности абонента КРС от ЦЭМД, реализуемой АИТС при РЭК.

В целях проверки выдвинутой гипотезы с позиций теории алгоритмов сформулирована следующая теорема: проблема прогнозирования (P_{prog}), заключающаяся в получении перспективного исчерпывающего описания прогнозного состояния абонента КРС по результатам применения алгоритма функционирования КСР к описанию ω_q , является алгоритмически неразрешимой для АИТС. Предлагается следующая формулировка указанной проблемы: разрешимо ли для АИТС множество

$$L_{P_{prog}} = \left\{ \omega_{q+\Delta_q} \right\}, \quad q = \overline{1, N_Q}, \quad (7)$$

при известном исчерпывающем описании текущего состояния КРС вида ω_q ?

Доказательство. Для определения разрешимости проблемы (7) используем метод сведения [33]. Предлагается свести известную массовую проблему останова машины Тьюринга к рассматриваемой проблеме прогнозирования.

При разрешимости проблемы останова была бы разрешима и следующая проблема, получаемая из (7) в результате некоторой её тривиальной модификации:

$$L_P = \left\{ K(A_{CRS}), \omega_q \right\}, \quad (8)$$

где $K(A_{CRS})$ – кодировка алгоритма A_{CRS} для соответствующей машины Тьюринга.

Теорема доказана.

Доказанная теорема позволяет сделать вывод о том, что сформулированная массовая проблема прогнозирования является алгоритмически неразрешимой для АИТС, что подтверждает выдвинутую гипотезу.

Заключение. Предложенная функциональная модель подсистемы управления телекоммуникационными ресурсами КРС отражает основные этапы обработки данных, информации и знаний в рассматриваемой подсистеме с целью получения описания требуемого состояния телекоммуникационного оборудования КРС, которое позволит обеспечить необходимый уровень конфликтной устойчивости КРС. Принятый в работе уровень абстракции позволяет использовать для формализации алгоритма (1) любую из известных эквивалентных вычислительную модель, однако принята в работе формализация с помощью аппарата продукционных систем удобна еще и тем, что представляет собой простейший из формализмов знаний. Таким образом предложенная модель инвариантна конкретному методическому наполнению блоков А1, А2, А3, описывающих содержание основных этапов обработки данных, информации и знаний, так и способам формализации указанного методического наполнения.

Практическая значимость представленных результатов заключается в их потенциальной применимости к перспективным разработкам в области создания когнитивных радиосистем передачи данных и радиоэлектронной борьбы [9, 11]. Указанная выше инвариантность функциональной модели её алгоритмическому наполнению обеспечивает соблюдение принципов стека технологий «когнитивное радио/программно-определяемое радио» [34].

Предложенные в работе функциональная модель и модель алгоритма позволяют проводить дальнейшие исследования в направлении развития когнитивных конфликтно-устойчивых радиосистем передачи данных РТК. Непосредственное развитие исследований, результаты которых приведены в настоящей статье, видится в программной реализации алгоритма управления телекоммуникационными ресурсами КРС, для чего представляется необходимым формализация алгоритмов формирования знаний о среде и о состоянии КРС, а также алгоритма прогнозирования состояния среды, и последующая композиция указанных алгоритмов. При этом необходимо будет решить следующие вопросы из области теоретического программирования: выбор адекватных математических моделей программ, планирование испытаний КРС с учетом сформулированной проблемы прогнозирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ичетовкин В.В. Факторы, определяющие содержание способов применения робототехнических комплексов (средств) в боевых действиях // Военная мысль. – 2022. – № 7. – С. 110-114.
2. Горский А.С., Демьянов В.В., Жуков А.О. Проблемные вопросы создания наземных робототехнических комплексов // Робототехника и техническая кибернетика. – 2022. – Т. 10, № 2. – С. 154-160.
3. Романюта А.Е. Состояние и перспективы развития робототехнических комплексов военного назначения // Роботизация Вооружённых Сил Российской Федерации: Сб. статей V военно-научной конференции, Анапа, 29–30 июля 2020 г. – Анапа: ФГАУ «Военный инновационный технополис «ЭРА», 2020. – Т. 1. – С. 20-24.
4. U.S. Ground Forces Robotics and Autonomous Systems (RAS) and Artificial Intelligence (AI): Considerations for Congress, 20.11.2018 // Project on Government Secrecy Federation of American Scientists. – URL: <https://fas.org/sgp/crs/weapons/R45392.pdf>.
5. Sharif H. Calfee Delivering Advanced Unmanned Autonomous Systems and Artificial Intelligence for Naval Superiority, 25.05.2021 // The Center for Strategic and Budgetary Assessments. – URL: <https://csbaonline.org/research/publications/delivering-advanced-unmanned-autonomous-systems-and-artificial-intelligence-for-naval-superiority/publication/1>.
6. Mahnken T.G., Sharp T., Kim G.B. Deterrence by Detection: A Key Role for Unmanned Aircraft Systems in Great Power Competition. – 2020. – URL: <https://csbaonline.org/research/publications/deterrence-by-detection-a-key-role-for-unmanned-aircraft-systems-in-great-power-competition>.

7. Clark B., McNamara W.M., Walton T.A. Capability Analysis - Winning the Invisible War: Gaining an Enduring Advantage in the EMS, 2020. – URL: https://csbaonline.org/uploads/documents/CIMSEC_Winning_the_Invisible_War_Gaining_an_Enduring_Advantage_in_the_EMS.pdf.
8. Головской В.А., Чернуха Ю.В., Семенюк Д.Б. Формализация задачи построения системы передачи данных робототехнического комплекса, функционирующего в условиях антагонистической киберэлектромагнитной деятельности // Вопросы кибербезопасности. – 2019. – № 6 (34). – С.113-122.
9. Haigh K.Z., Andrusenko J. Cognitive Electronic Warfare: An Artificial Intelligence Approach. – Boston: Artech House, 2021. – 288 p.
10. Наговицин А.И., Молоткова Б.Б., Азимов Д.У. Автоматизированная система контроля за назначением радиочастот на основе риск-ориентированного подхода при планировании радиосвязи в подразделениях робототехнических комплексов военного назначения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 1 (225). – С. 59-70.
11. Артёмов М.Л., Борисов В.И., Маковий В.А., Сличенко М.П. Автоматизированные системы управления, радиосвязи и радиоэлектронной борьбы. Основы теории и принципы построения. – М.: Радиотехника, 2021. – 556 с.
12. Соколов С.М. Онтологический подход в создании робототехнических комплексов с повышенной степенью автономности // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 1 (225). – С. 42-59.
13. Гудков М.А., Дворников А.С., Сорокин К.Н. Применение когнитивных радиосистем для обеспечения связи с роботизированными платформами военного назначения // Труды II Военно-научной конференции «Роботизация Вооруженных Сил Российской Федерации». – М., 2017. – С. 440-444.
14. Головской В.А., Филинов В.С. Предложения по созданию когнитивных систем передачи данных для робототехнических комплексов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2019. – Т. 13, № 9. – С. 22-29.
15. Report ITU-R SM.2152. Definitions of Software Defined Radio (SDR) and Cognitive Radio System (CRS). – URL: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2152-2009-PDF-e.pdf.
16. Mitola J., Maquire G.Q. Cognitive radio: making software radios more personal // IEEE Personal Communications. – 1999. – Vol. 6, Issue 4. – P. 13-18.
17. Голубинский А.Н. Применение искусственной нейронной сети в виде многослойного перцептрона для формирования рейтинга частотных каналов в системе когнитивного радио // Теория и техника радиосвязи. – 2020. – № 2. – С. 64-73.
18. Eappen G., Shankar T. Hybrid PSO-GSA for energy efficient spectrum sensing in cognitive radio network // Physical Communication. – 2020. – Vol. 40. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2020.101091>.
19. Giral D., Hernández C., Salgado C. Spectral decision for cognitive radio networks in a multi-user environment // Heliyon. – 2021. – Vol. 7, Issue 5. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07132>.
20. Peter G., Livin J. Hybrid optimization algorithm based optimal resource allocation for cooperative cognitive radio network // Array. – 2021. – No.12. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590005621000400>.
21. Alnabelsi S.H., Salameh H.B., Saifan R.R., Darabkh K.A. A multi-layer hyper-graph routing with jamming-awareness for improved throughput in full-duplex cognitive radio networks // Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences. – 2022. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2022.01.003>.
22. Matyszkiew R., Kaniewski P., Polak R., Laskowski D. Selected methods of protecting wireless communications against interferences // 2019 International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS). – Budva: IEEE, 2019. – P. 1-5.
23. Bharti B., Thakur P., Singh G. A framework for spectrum sharing in cognitive radio networks for military applications // IEEE Potentials. – 2021. – Vol. 40, No. 5. – P. 39-47.
24. Tuukkanen T., Couturier S. Buchin B., Bräysy T., Krygier J., Verheul E., Le Nir V., Smit N. Assessment of cognitive radio networks through military capability development viewpoint // 2018 International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS). – 2018. – P. 1-8.
25. Mourougayane K., Srikanth S. A tri-band full-duplex cognitive radio transceiver for tactical communications // IEEE Communications Magazine. – 2020. – No. 58. – P. 61-65.

26. Cognitive Radio in NATO. STO technical report IST077/RTG-035. 2014. – URL: [https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Technical%20Reports/STO-TR-IST-077/\\$\\$STR-IST-077-ALL.pdf](https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Technical%20Reports/STO-TR-IST-077/$$STR-IST-077-ALL.pdf).
27. Field Manual 3-12. Cyberspace and electronic warfare operations. Department of the Army. Washington, DC, April 2017. – URL: https://www.cyberwar.nl/d/fm3_12.pdf.
28. Головской В.А. Принципы создания базы знаний конфликтно-устойчивой системы передачи данных робототехнических комплексов военного назначения // Информационная безопасность – актуальная проблема современности. Совершенствование образовательных технологий подготовки специалистов в области информационной безопасности. – 2020. – Т. 1, № 2-1 (13). – С. 46-51.
29. Головской В.А. О моделях в исследованиях когнитивных радиосистем // Тр. Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. – Ростов-на-Дону: СКФ МТУСИ, 2022. – С. 8-11.
30. Жожикашвили А.В. Категорная технология создания и развития интеллектуальных систем, основанных на знании // Информационные процессы. – 2016. – Т. 16, № 4. – С. 312-332.
31. Головской В.А. Об идентификации модели ослабления при распространении радиоволн // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2022. – Т. 14, № 5. – С. 38-44.
32. Головской В.А. О разрешимости и перечислимости множеств в задачах когнитивного радио // Прикладная математика и информатика в современном мире: Матер. Всероссийской НПК, посвященной 50-летию начала подготовки специалистов в области программирования и прикладной математики на Кубани. – Краснодар, 2022. – С. 124-129.
33. Hopcroft J.E., Motwani R., Ullman J.D. Introduction to Automata Theory, Languages, and Computations. – 3rd ed. – Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 2006. – 535 p.
34. Report ITU-R SM.2405-1. Spectrum management principles, challenges and issues related to dynamic access to frequency bands by means of radio systems employing cognitive capabilities. – URL: <https://www.itu.int/pub/R-REP-SM.2405-1-2021>.

REFERENCES

1. Ichetovkin V.V. Faktory, opredelyayushchie sodержание sposobov primeneniya robototekhnicheskikh kompleksov (sredstv) v boevykh deystviyakh [Factors determining the content of methods of using robotic complexes (means) in combat operations], *Voennaya mysl'* [Voennaya mysl'], 2022, No. 7, pp. 110-114.
2. Gorskiy A.S., Dem'yanov V.V., Zhukov A.O. Problemnye voprosy sozdaniya nazemnykh robototekhnicheskikh kompleksov [Problem of creation ground robotics vehicle], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and technical cybernetics], 2022, Vol. 10, No. 2, pp. 154-160.
3. Romanyuta A.E. Sostoyanie i perspektivy razvitiya robototekhnicheskikh kompleksov voennogo naznacheniya [The state and prospects of development of robotic complexes for military purposes], *Robotizatsiya Vooruzhennykh Sil Rossiyskoy Federatsii: Sb. statey V voenno-nauchnoy konferentsii, Anapa, 29–30 iyulya 2020 g.* [Robotization of the Armed Forces of the Russian Federation: Collection of articles of the V Military Scientific Conference], Anapa, 29–30 iyulya 2020]. Anapa: FGAU «Voennyi innovatsionnyy tekhnopolis «ERA», 2020. Vol. 1, pp. 20-24.
4. U.S. Ground Forces Robotics and Autonomous Systems (RAS) and Artificial Intelligence (AI): Considerations for Congress, 20.11.2018 // Project on Government Secrecy Federation of American Scientists. – URL: <https://fas.org/sgp/crs/weapons/R45392.pdf>.
5. Sharif H. Calfee Delivering Advanced Unmanned Autonomous Systems and Artificial Intelligence for Naval Superiority, 25.05.2021, *The Center for Strategic and Budgetary Assessments*. Available at: <https://csbaonline.org/research/publications/delivering-advanced-unmanned-autonomous-systems-and-artificial-intelligence-for-naval-superiority/publication/1>.
6. Mahnken T.G., Sharp T., Kim G.B. Deterrence by Detection: A Key Role for Unmanned Aircraft Systems in Great Power Competition, 2020. Available at: <https://csbaonline.org/research/publications/deterrence-by-detection-a-key-role-for-unmanned-aircraft-systems-in-great-power-competition>.
7. Clark B., McNamara W.M., Walton T.A. Capability Analysis - Winning the Invisible War: Gaining an Enduring Advantage in the EMS. – 2020. Available at: https://csbaonline.org/uploads/documents/CIMSEC_Winning_the_Invisible_War__Gaining_an_Enduring_Advantage_in_the_EMS.pdf.

8. Golovskoy V.A., Chernukha Yu.V., Semenyuk D.B. Formalizatsiya zadachi postroeniya sistemy peredachi dannykh robototekhnicheskogo kompleksa, funktsioniruyushchego v usloviyakh antagonisticheskoy kiberelektromagnitnoy deyatel'nosti [Formalization of the problem of creating a data transmission system in a robotic system operating in conditions of antagonistic cyber-electromagnetic activity], *Voprosy kiberbezopasnosti* [Voprosy kiberbezopasnosti], 2019, No. 6 (34), pp. 113-122.
9. Haigh K.Z., Andrusenko J. Cognitive Electronic Warfare: An Artificial Intelligence Approach. Boston: Artech House, 2021, 288 p.
10. Nagovitsin A.I., Molotkova B.B., Azimov D.U. Avtomatizirovannaya sistema kontrolya za naznacheniem radiochastot na osnove risk-orientirovannogo podkhoda pri planirovanii radiosvyazi v podrazdeleniyakh robototekhnicheskikh kompleksov voennogo naznacheniya [Automated control system for the assignment of radio frequencies based on a risk-based approach in the planning of radio communications in the units of military robotic complexes], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 1 (225), pp. 59-70.
11. Artemov M.L., Borisov V.I., Makoviy V.A., Slichenko M.P. Avtomatizirovannyye sistemy upravleniya, radiosvyazi i radioelektronnoy bor'by. Osnovy teorii i printsipy postroeniya [Automated control systems, radio communications and electronic warfare. Fundamentals of theory and principles of construction]. Moscow: Radiotekhnika, 2021, 556 p.
12. Sokolov S.M. Ontologicheskii podkhod v sozdaniy robototekhnicheskikh kompleksov s povyshennoy stepen'yu avtonomnosti [An ontological approach to the creation of robotic complexes with an increased degree of autonomy], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 1 (225), pp. 42-59.
13. Gudkov M.A., Dvornikov A.S., Sorokin K.N. Primenenie kognitivnykh radiosistem dlya obespecheniya svyazi s robotizirovannymi platformami voennogo naznacheniya [Application of cognitive radio systems for communication with military robotic platforms], *Trudy II Voenno-nauchnoy konferentsii «Robotizatsiya Vooruzhennykh Sil Rossiyskoy Federatsii»* [Proceedings of the II-th Military Scientific Conference "Robotization of the Armed Forces of the Russian Federation"]. Moscow, 2017, pp. 440-444.
14. Golovskoy V.A., Filinov V.S. Predlozheniya po sozdaniyu kognitivnykh sistem peredachi dannykh dlya robototekhnicheskikh kompleksov [Proposals for the creation of cognitive data transmission systems for robotic complex] T-Comm: Telekommunikatsii i transport [T-Comm: Telecommunications and transport], 2019, Vol. 13, No. 9, pp. 22-29.
15. Report ITU-R SM.2152. Definitions of Software Defined Radio (SDR) and Cognitive Radio System (CRS). Available at: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2152-2009-PDF-e.pdf.
16. Mitola J., Maguire G.Q. Cognitive radio: making software radios more personal, *IEEE Personal Communications*, 1999, Vol. 6, Issue 4, pp. 13-18.
17. Golubinskiy A.N. Primenenie iskusstvennoy neyronnoy seti v vide mnogosloynnogo perseptrona dlya formirovaniya reytinga chastotnykh kanalov v sisteme kognitivnogo radio [Application of an artificial neural network in the form of a multilayer perceptron to form a rating of frequency channels in the system of cognitive radio], *Teoriya i tekhnika radiosvyazi* [Theory and technology of radio communication], 2020, No. 2, pp. 64-73.
18. Eappen G., Shankar T. Hybrid PSO-GSA for energy efficient spectrum sensing in cognitive radio network, *Physical Communication*, 2020, Vol. 40. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2020.101091>.
19. Giral D., Hernández C., Salgado C. Spectral decision for cognitive radio networks in a multi-user environment, *Heliyon*, 2021, Vol. 7, Issue 5. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07132>.
20. Peter G., Livin J. Hybrid optimization algorithm based optimal resource allocation for co-operative cognitive radio network, *Array*, 2021, No.12. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590005621000400>.
21. Alnabelsi S.H., Salameh H.B., Saifan R.R., Darabkh K.A. A multi-layer hyper-graph routing with jamming-awareness for improved throughput in full-duplex cognitive radio networks, *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*, 2022. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2022.01.003>.
22. Matyszkiew R., Kaniewski P., Polak R., Laskowski D. Selected methods of protecting wireless communications against interferences, 2019 *International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS)*. Budva: IEEE, 2019, pp. 1-5.

23. Bharti B., Thakur P., Singh G. A framework for spectrum sharing in cognitive radio networks for military applications, *IEEE Potentials*, 2021, Vol. 40, No. 5, pp. 39-47.
24. Tuukkanen T., Couturier S. Buchin B., Bräysy T., Krygier J., Verheul E., Le Nir V., Smit N. Assessment of cognitive radio networks through military capability development viewpoint, *2018 International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS)*, 2018, pp. 1-8.
25. Mourougayane K., Srikanth S. A tri-band full-duplex cognitive radio transceiver for tactical communications, *IEEE Communications Magazine*, 2020, No. 58, pp. 61-65.
26. Cognitive Radio in NATO. STO technical report IST077/RTG-035. 2014. Available at: <https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Technical%20Reports/STO-TR-IST-077/STO-TR-IST-077-ALL.pdf>.
27. Field Manual 3-12. Cyberspace and electronic warfare operations. Department of the Army. Washington, DC, April 2017. – URL: https://www.cyberwar.nl/d/fm3_12.pdf.
28. Golovskoy V.A. Printsipy sozdaniya bazy znaniy konfliktno-ustoychivoy sistemy pere-dachi dannykh robototekhnicheskikh kompleksov voennogo naznacheniya [Principles of creating a knowledge base of a conflict-resistant data transmission system of robotic complexes for military purposes], *Informatsionnaya bezopasnost' – aktual'naya problema sovremennosti. Sovershenstvovanie obrazovatel'nykh tekhnologiy podgotovki spetsialistov v oblasti informatsionnoy bezopasnosti* [Information security - an actual problem of modernity. Improvement of educational technologies for training specialists in the field of information security], 2020, Vol. 1, № 2-1 (13), pp. 46-51.
29. Golovskoy V.A. O modelyakh v issledovaniyakh kognitivnykh radiosistem [On models in research of cognitive radio systems], *Tr. Severo-Kavkazskogo filiala Moskovskogo tekhnicheskogo universiteta svyazi i informatiki* [Proceedings of the North Caucasus Branch of the Moscow Technical University of Communications and Informatics]. Rostov-on-Don: SKF MTUSI, 2022, pp. 8-11.
30. Zhzhikashvili A.V. Kategornaya tekhnologiya sozdaniya i razvitiya intellektual'nykh sistem, osnovannykh na znanii [Category-Theoretic Technology of Creation and Development of Knowledge-Based Intelligent Systems], *Informatsionnye protsessy* [Information processes], 2016, Vol. 16, No. 4, pp. 312-332.
31. Golovskoy V.A. Ob identifikatsii modeli oslableniya pri rasprostraneni radiovoln [On the identification of the attenuation model in the propagation of radio waves], *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli* [High technologies in Earth space research. H&ES Research], 2022, Vol. 14, No. 5, pp. 38-44.
32. Golovskoy V.A. O razreshimosti i perechislivosti mnozhestv v zadachakh kognitivnogo radio [On the solvability and enumerability of sets in cognitive radio problems], *Prikladnaya matematika i informatika v sovremennom mire: Mater. Vserossiyskoy NPK, posvyashchennoy 50-letiyu nachala podgotovki spetsialistov v oblasti programmirovaniya i prikladnoy matematiki na Kubani* [Applied Mathematics and Computer science in the modern world: Materials of the All-Russian RPC dedicated to the 50th anniversary of the beginning of training specialists in the field of programming and applied mathematics in the Kuban]. Krasnodar, 2022, pp. 124-129.
33. Hopcroft J.E., Motwani R., Ullman J.D. Introduction to Automata Theory, Languages, and Computations. 3rd ed. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 2006, 535 p.
34. Report ITU-R SM.2405-1. Spectrum management principles, challenges and issues related to dynamic access to frequency bands by means of radio systems employing cognitive capabilities. Available at: <https://www.itu.int/pub/R-REP-SM.2405-1-2021>.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.А. Атрощенко.

Головской Василий Андреевич – Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Краснодарское высшее военное училище им. генерала армии С.М. Штеменко» Министерства обороны Российской Федерации (КВВУ); e-mail: golovskoy_va@mail.ru; г. Краснодар, Россия; тел.: +79384762531; к.т.н.; доцент; докторант.

Golovskoy Vasily Andreevich – Krasnodar Higher Military School named after S.M. Shtemenko; e-mail: golovskoy_va@mail.ru; Krasnodar, Russia; phone: +79384762531; cand. of eng. sc.; assistant of professor; doctorant.

П.А. Шаповалов, Ю.В. Михайлов, А.В. Фролов, Д.О. Савватеев

**МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ НЕСУЩИХ СИСТЕМ
БЕСПЛАТФОРМЕННЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ
НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

Описываются подходы к решению задач оптимизации несущих систем (НС) бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС). Типичной задачей оптимизации в данном случае является многокритериальная параметрическая оптимизация несущей системы триады акселерометров БИНС с целью минимизации массы НС и минимизации углов отклонения осей акселерометров под действием внешних нагрузок. В качестве инструмента численного моделирования и оптимизации используются модули ANSYS Mechanical и ANSYS DesignXplorer соответственно. Рассмотрены практические вопросы, связанные с параметризацией твердотельных моделей НС БИНС, вычислением углов отклонения осей акселерометров, возможными вариантами планов численного эксперимента, оценкой чувствительности отклика ко входным параметрам, генерацией и уточнением поверхности отклика, и проведением многокритериальной оптимизации. Для рациональной параметризации твердотельных моделей произведена декомпозиция конструкции прибора БИНС, в результате чего были выделены детали и конструктивные элементы, имеющие наибольшее влияние на рассматриваемые целевые функции. Для вычисления углов отклонения осей чувствительных элементов использованы специальные двухузловые конечные элементы и соотношения для углов Брайнанта, которые описывают взаимное положение в пространстве двух систем координат. При планировании численного эксперимента на первом этапе оптимизации был использован центральный композиционный план, а на последующих этапах заполнение пространства параметров осуществлялось методом латинского гиперкуба с дополнительной опцией соотношений между параметрами, что позволило избежать вырожденных вариантов конструкции. Поверхность отклика была построена методом генетической агрегации и впоследствии уточнена на основе набора оптимальных решений. Оптимизация для конфликтующих целей минимизации массы и максимизации жесткости проводилась при помощи многокритериального генетического алгоритма. Описываемая совокупность подходов к решению задач оптимизации в результате показательной серии расчетов позволила снизить массу серийной детали НС БИНС на 23% при неизменной жесткости.

БИНС; численное моделирование; ANSYS; многокритериальная параметрическая оптимизация; акселерометр; углы отклонения осей.

P.A. Shapovalov, Yu.V. Mikhaylov, A.V. Frolov, D.O. Savvateev

**METHODOLOGICAL BASES AND PRACTICAL ASPECTS
OF OPTIMIZATION TASKS OF THE BEARING STRUCTURES
OF THE STRAPDOWN INERTIAL NAVIGATION SYSTEMS**

This article describes approaches to solving problems of optimization of bearing structure of strapdown inertial navigation systems (SINS). A typical optimization problem in this case is multiobjective parametric optimization of the bearing structure of the SINS accelerometer triad in order to minimize the mass of the bearing structure and minimize deviation angles of the accelerometer axes under the action of external loads. The ANSYS Mechanical and ANSYS DesignXplorer modules are used as a tool for numerical modeling and optimization, respectively. Practical issues related to parameterization of SINS bearing structure 3D-models, calculation of accelerometer axes deviation angles, possible variants of numerical experiment plans, estimation of response sensitivity to input parameters, generation and refinement of the response surface, and multiobjective optimization are considered. For the rational parametrization of geometry, the SINS device assembly was decomposed, as a result of which the parts and structural elements that

have the greatest influence on the considered objective functions were identified. To calculate the deviation angles of the sensitive elements axes, special two-node finite elements and relations for the Bryant angles were used, which describe the relative position in space of two coordinate systems. When planning a numerical experiment, at the first stage of optimization, a central composition plan was used, and at subsequent stages, the parameter space was filled using the Latin hypercube method with the option of relations between parameters, which made it possible to avoid degenerate design options. The response surface was built using the genetic aggregation method and subsequently refined based on a set of optimal solutions. Optimization for conflicting goals of mass minimization and stiffness maximization was carried out using a multiobjective genetic algorithm. The described set of approaches to solving optimization problems as a result of an exemplary series of calculations made it possible to reduce the mass of a serial SINS bearing structure part by 23% with fixed stiffness.

SINS; numerical simulation; ANSYS; multiobjective parametric optimization; accelerometer; axis deviation angles.

Введение. Бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС) получили широкое применение для автономного и надежного решения задачи навигации различных подвижных объектов при сохранении допустимого уровня ошибок счисления углов, скоростей и координат [1–4].

Использование БИНС в отличие от инерциальных навигационных систем с гиростабилизированной платформой приводит к повышению технологичности и компактности прибора. В тоже время при этом предъявляются более высокие требования к чувствительным элементам (ЧЭ) (гироскопам и акселерометрам) БИНС и стабильности их измерительных осей в условиях быстро протекающих процессов в конструкции, вследствие нагрева, механические деформации и внешних динамических воздействий [5].

Принципиальной особенностью систем инерциальной навигации являются навигационные ошибки, накапливаемые вследствие наличия различного рода остаточных погрешностей после этапов лабораторно-стендовой и полевой калибровок. Поэтому широкий круг работ посвящен вопросам минимизации различных инструментальных погрешностей ЧЭ и методических погрешностей БИНС [6].

Стоит отметить, что для высокودинамичных подвижных объектов со сравнительно небольшим временем работы более существенный эффект на величину навигационной ошибки оказывают погрешности акселерометров, а не гироскопов. Также важно, что нестабильности входной оси имеет распределенный характер, таким образом, одновременно имеет зависимость как от ЧЭ, так и от несущей системы БИНС [7].

Цель данной работы – продемонстрировать методические подходы к расчетному анализу углов отклонения осей ЧЭ и оптимизации несущей системы высокودинамичного БИНС при заданных внешних инерционных воздействиях. При этом задача решается в достаточно общем виде, что позволяет распространить основные ее подходы для широкого круга аналогичных задач.

Расчеты по определению углов отклонений осей акселерометров под действием нагрузок модели несущей системы БИНС проводились с помощью метода конечных элементов [8], реализованного в программном обеспечении Ansys Mechanical (АО «ЦНИИАГ» Customer Number: 1069746).

Описание объекта исследования. В качестве объекта исследования в работе была использована конструкторская модель БИНС, разработанная в АО «ЦНИИАГ» (рис. 1). Основными составными элементами БИНС являются блок акселерометров, основание БИНС и блок гироскопов.

В процессе проектирования прибора при поиске наиболее жесткой несущей системы для установки акселерометров была получена конструкция с кронштейном в виде «колодца», на котором установлены три акселерометра [9].

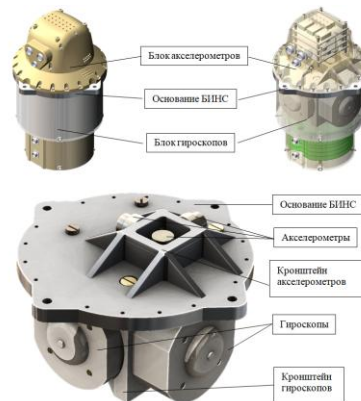


Рис. 1. Твердотельная модель БИНС

Для решения оптимизационных задач в данной работе целесообразно выполнить декомпозицию основания БИНС, выделив отдельным твердым телом основание акселерометров.

Кронштейн гироскопов несомненно вносит вклад в формирования несущей системы БИНС в целом, но в данном случае при проведении оптимизационных сравнительных расчетов его влиянием на углы отклонения осей акселерометров можно пренебречь, таким образом, кронштейн гироскопов, равно как и сами гироскопы в расчетной при разработке расчетной модели не учитываются.

Разработка расчетной модели. При разработке расчетной модели несущей системы БИНС фокус внимания был направлен на кронштейн акселерометров по причине значимости его вклада в жесткость конструкции, а также из-за наглядности параметризации размеров его конструктивных элементов.

В качестве геометрических параметров, изменяемых при оптимизации, были выбраны толщины и длины ребер кронштейна, толщина стенок «колодца», а также позиционные параметры, определяющие положение кронштейна акселерометров относительно основания БИНС (рис. 2).

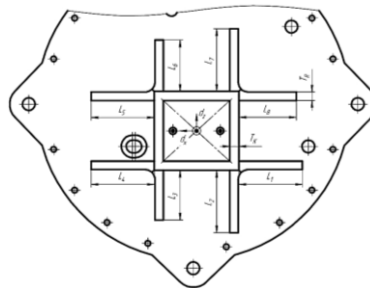


Рис. 2. Параметризация модели

В табл. 1 сведены выбранные параметры, а также указаны пределы их изменения при оптимизации.

На рис. 3 представлено описание разработанной расчетной модели в ANSYS Mechanical. Для уменьшения ресурсоемкости задачи сопряженные детали и узлы заменены точечными массами, приложенными к соответствующим поверхностям (рис. 3,а,б). В качестве граничных условий (рис. 3,в) к расчетной модели приложены: внешняя инерционная нагрузка (Acceleration) величиной 294 м/с^2 (30 g), задан-

ная за три шага нагружения вдоль каждой из координатных осей; фиксация всех степеней свободы по опорным поверхностям основания (Fixed Support). Рассматриваемые в модели твердые тела: кронштейн акселерометров и основание, в действительности изготавливаются единой деталью и для адекватного моделирования их контакта применяется метод общей топологии (Shared Topology) [10], таким образом, они имеют одну общую сопряженную поверхности и соответственно общие граничные узлы сетки конечных элементов как показано на рис. 3,г.

Таблица 1

Геометрические параметры кронштейна акселерометров

Обозначение параметра	Наименование параметра	Нижний предел, мм	Верхний предел, мм
$L_{1..8}$	Длины ребер кронштейна	11	45
T_R	Толщина ребер кронштейна	6	30
T_K	Толщина стенки «колодца» кронштейна	4,5	9,5
d_x, d_z	Положение кронштейна акселерометров относительно основания БИНС по осям X и Z соответственно	0	10

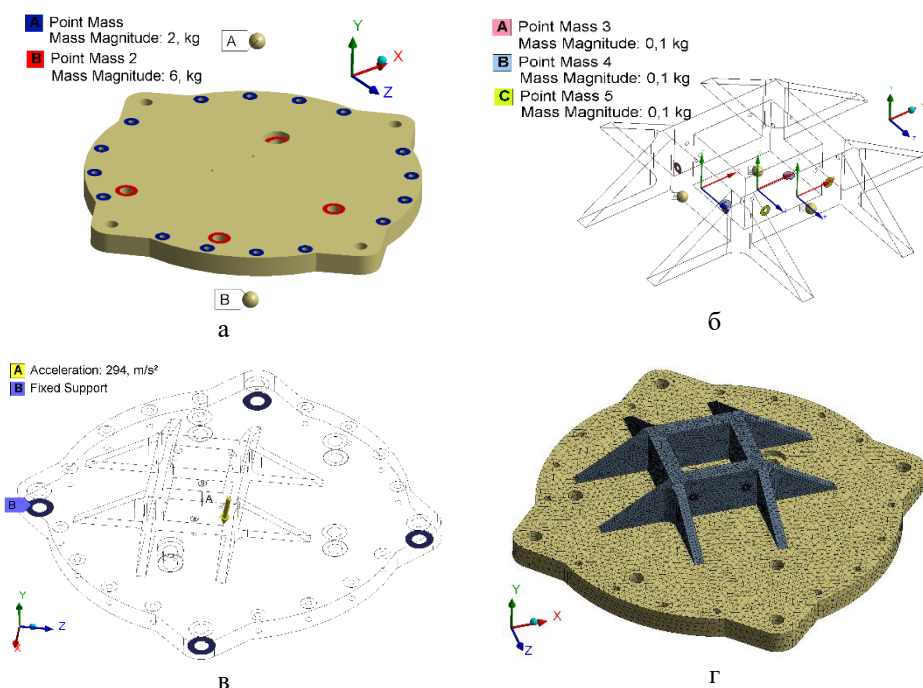


Рис. 3. Расчетная модель: а – замена деталей БИНС точечными массами: Point Mass – детали блока акселерометров, Point Mass 2 – детали блока гироскопов; б – замена акселерометров точечными массами: Point Mass 3, 4, 5 – акселерометры осей X, Y, Z соответственно; в – граничные условия; г – сетка конечных элементов

Подход к определению искомых углов отклонения осей акселерометров (A_x, A_y, A_z) от приборных осей БИНС (X_b, Y_b, Z_b) проиллюстрирован на рис. 4. Для вычисления углов отклонения осей ЧЭ БИНС используются специальные

двухузловые конечные элементы (i_1j_1, i_2j_2, i_3j_3), с узлами которых связаны прямоугольные системы координат (СК). Узлы $i_k (k=1, 2, 3)$ в данном случае неподвижны, имея при этом одинаковое положение в пространстве, и для упрощения обозначены как i с СК (X, Y, Z), а узлы j_k имеют СК (X_k, Y_k, Z_k), связанные с акселерометрами. При этом перечисленные узловые СК можно поставить в соответствие осям акселерометров и приборным осям следующим образом:

- ♦ оси узлов i и приборные оси: $X_b = X, Y_b = Y, Z_b = Z$;
- ♦ оси узлов $j_k (k=1, 2, 3)$ и оси акселерометров: $Ax = X_1, Ay = Y_2, Az = Z_3$.

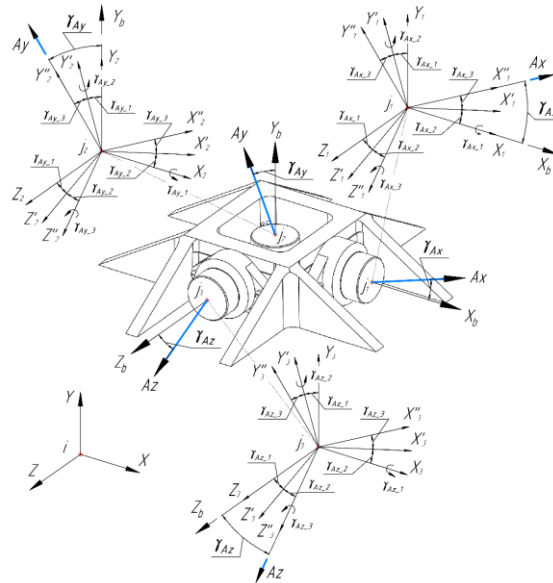


Рис. 4. Углы отклонения от ортогонального положения ОЧ

В данном случае СК узла i принята неподвижной, что не исключает принципиальной возможности использовать рассматриваемый подход в общем случае, тогда она может быть связана с опорными поверхностями прибора и менять свое положение и ориентацию в пространстве, при этом изменения в расчетной модели будут минимальные.

СК узлов j_k связаны с плоскими площадками акселерометров на уровне конечно-элементной сетки и меняют свое положение и ориентацию в пространстве под действием приложенных к модели нагрузок. В начальный момент времени расчета оси СК (X, Y, Z) и СК (X_k, Y_k, Z_k) сонаправлены соответствующим образом. При деформации модели происходят повороты площадок акселерометров и связанных с ними СК в новые положения (X''_k, Y''_k, Z''_k).

В целях математической формализации поворот площадок акселерометров рассматривается как 3 последовательных поворота исходных систем координат:

- 1) вокруг осей X_1, X_2, X_3 на углы $\gamma_{Ax_1}, \gamma_{Ay_1}, \gamma_{Az_1}$ в положения (X_k, Y'_k, Z'_k), (X_k, Y'_k, Z'_k), (X_k, Y'_k, Z'_k) соответственно;
- 2) вокруг осей Y'_k на углы $\gamma_{Ax_2}, \gamma_{Ay_2}, \gamma_{Az_2}$ в положение (X'_k, Y'_k, Z''_k);
- 3) вокруг осей Z''_k на углы $\gamma_{Ax_3}, \gamma_{Ay_3}, \gamma_{Az_3}$ в положение (X''_k, Y''_k, Z''_k).

В любой момент времени ориентация площадок акселерометров характеризуется углами относительного поворота между СК узлов i и j_k , так называемыми углами Брайнта [11, 12]:

$$\begin{aligned}\gamma_1 &= -\arctg\left(\frac{Y \cdot Z'''}{Z \cdot Z''}\right) \\ \gamma_2 &= -\arcsin(Y \cdot Z'') \\ \gamma_3 &= -\arctg\left(\frac{X \cdot Y''}{X \cdot X''}\right),\end{aligned}$$

при этом угол γ_1 соответствует углам $\gamma_{Ax_1}, \gamma_{Ay_1}, \gamma_{Az_1}$; угол γ_2 соответствует углам $\gamma_{Ax_2}, \gamma_{Ay_2}, \gamma_{Az_2}$; угол γ_3 соответствует углам $\gamma_{Ax_3}, \gamma_{Ay_3}, \gamma_{Az_3}$.

Наконец, для получения искоемых углов отклонения осей акселерометров необходимо взять корень из суммы квадратов соответствующих компонент:

$$\begin{aligned}\gamma_{Ax} &= \sqrt{\gamma_{Ax_2}^2 + \gamma_{Ax_3}^2} \\ \gamma_{Ay} &= \sqrt{\gamma_{Ay_1}^2 + \gamma_{Ay_3}^2} \\ \gamma_{Az} &= \sqrt{\gamma_{Az_1}^2 + \gamma_{Az_2}^2}.\end{aligned}$$

Таким образом, применительно к разработанной расчетной модели выходными параметрами, участвующими в оптимизации являются 6 компонентов углов $\gamma_{Ax_2}, \gamma_{Ax_3}, \gamma_{Ay_1}, \gamma_{Ay_3}, \gamma_{Az_1}, \gamma_{Az_2}$ на каждом из трех шагов нагружения, то есть суммарно 18 выходных параметров.

Оптимизация выполнялась в 2 этапа:

- 1) на первом этапе рассматривался кронштейн с исходными размерами и производился поиск его оптимальной позиции с точки зрения жесткости кронштейна при помощи параметров d_x, d_z ;
- 2) на втором этапе оптимизировались остальные параметры с целью максимизации жесткости и минимизации массы кронштейна.

При проведении оптимизации были рассмотрены несколько наборов критериев:

- а) 18 критериев: $(\gamma_{Ax_2})_q, (\gamma_{Ax_3})_q, (\gamma_{Ay_1})_q, (\gamma_{Ay_3})_q, (\gamma_{Az_1})_q, (\gamma_{Az_2})_q$, где $q = x, y, z$ – 3 шага нагружения (инерционное внешнее воздействие величиной 30g отдельно в каждом направлении);
- б) 6 критериев, при этом рассматривается суммарная нагрузка от воздействий по трем направлениям, полученная как линейная комбинация:

$$\sum_{q=x,y,z} (\gamma_{Ax_2})_q, \sum_{q=x,y,z} (\gamma_{Ax_3})_q, \sum_{q=x,y,z} (\gamma_{Ay_1})_q, \sum_{q=x,y,z} (\gamma_{Ay_3})_q, \sum_{q=x,y,z} (\gamma_{Az_1})_q, \sum_{q=x,y,z} (\gamma_{Az_2})_q;$$

- в) 3 критерия – 3 угла отклонения осей акселерометров при суммарной нагрузке:

$$\begin{aligned}\gamma_{Ax} &= \sqrt{\left(\sum_{q=x,y,z} (\gamma_{Ax_2})_q\right)^2 + \left(\sum_{q=x,y,z} (\gamma_{Ax_3})_q\right)^2}; \\ \gamma_{Ay} &= \sqrt{\left(\sum_{q=x,y,z} (\gamma_{Ay_1})_q\right)^2 + \left(\sum_{q=x,y,z} (\gamma_{Ay_3})_q\right)^2}; \\ \gamma_{Az} &= \sqrt{\left(\sum_{q=x,y,z} (\gamma_{Az_1})_q\right)^2 + \left(\sum_{q=x,y,z} (\gamma_{Az_2})_q\right)^2};\end{aligned}$$

- г) 1 критерий – алгебраическая сумма 3 углов отклонения:

$$\gamma_{Atot} = \gamma_{Ax} + \gamma_{Ay} + \gamma_{Az}.$$

На основе перечисленных наборов критериев были сформулированы несколько оптимизационных задач, в дальнейшем обозначаемых при помощи аббревиатуры RSO (Response Surface Optimization):

- 1) RSO1: задача минимизации 18 критериев (а);
- 2) RSO1.1: задача минимизации 3 критериев (в);
- 3) RSO2: задача минимизации 18 критериев (а) совместно с минимизацией массы кронштейна акселерометров;
- 4) RSO3: задача минимизации 6 критериев (б) совместно с минимизацией массы кронштейна акселерометров;
- 5) RSO4: задача минимизации 3 критериев (в) совместно с минимизацией массы кронштейна акселерометров.

Планирование эксперимента, регрессионный анализ и оптимизация. При проведении как натуральных, так и численных экспериментов целесообразно использовать методы планирования эксперимента, позволяющие систематизировать и рационализировать исследования. Первая работа, заложившая основные принципы планирования экспериментов, была опубликована британским ученым Р.А. Фишером в 30-х годах XX столетия и впоследствии многократно переиздавалась [13]. Фишер предложил новую методику проведения экспериментов, исключая избыточные наблюдения и, таким образом, проводя наименьшее число опытов, возможно получить при этом наибольший объем данных об объекте исследования. В дальнейшем это направление было развито в 50-х годах в США Дж.Боксом и его сотрудниками [14, 15]. Отечественные ученые также внесли большой вклад в развитие теории эксперимента [16–18].

Методы планирования эксперимента (планы) можно условно разделить на четыре группы:

- ♦ Исследовательские планы – используются для получения информации об объекте и пределах изменения уровней факторов.
- ♦ Факторные планы – используются для статистического анализа, при их составлении расчетные точки соответствуют уровням факторов.
- ♦ Ортогональные планы – это планы, уровни установок факторов которых изменяются независимо друг от друга.
- ♦ Специальные планы – приспособлены под конкретные задачи, например, планы для исследования поверхности отклика.

В данной работе применяются центральный композиционный план и метод латинского гиперкуба, относящиеся к группе факторных и исследовательских планов соответственно.

Центральный композиционный план [19] позволяет учесть попарное взаимодействие факторов, при этом является менее затратным, чем трехуровневый полный факторный план, который реализует все возможные неповторяющиеся комбинации уровней независимых факторов.

Латинский гиперкуб [20] – метод робастного планирования и оптимизации, часто используемый при анализе неопределенностей. При составлении плана каждый фактор имеет заданное число уровней, которые получены при делении некоторого статистического распределения на интервалы с равной вероятностью и последующим выбором случайных значений из этих интервалов.

Основным подходом в планировании экспериментов [19] является определение поведения функции отклика $y = f(x_1, \dots, x_i, \dots, x_k)$, вид которой изначально неизвестен, в связи с чем для математического описания поверхности отклика используют уравнение:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i,u=1}^k \beta_{iu} x_i x_u + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \dots,$$

где x_i, x_u – переменные факторы при $i = 1, \dots, k$; $u = 1, \dots, k$; $i \neq u$; коэффициенты:

$$\beta_i = \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)_0, \beta_{iu} = \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_u} \right)_0, \beta_{ii} = \left(\frac{\partial^2 f}{2 \partial x_i^2} \right)_0.$$

Это уравнение является разложением в ряд Тейлора неизвестной функции отклика в окрестности точки с $x_i = x_{i0}$.

На практике по результатам эксперимента производится обработка данных по методу наименьших квадратов. Этот метод позволяет найти оценку b коэффициентов β , и данный полином заменяется уравнением вида:

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i,u=1}^k b_{iu} x_i x_u + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \dots,$$

которое является регрессионной моделью, а $\hat{y}$ означает модельное, рассчитываемое по уравнению модели. Коэффициенты регрессии определяются экспериментально и служат для статистической оценки теоретических коэффициентов, т.е.:

$$b_0 \rightarrow \beta_0, b_i \rightarrow \beta_i, b_{iu} \rightarrow \beta_{iu}, b_{ii} \rightarrow \beta_{ii}, b_0 \rightarrow \beta_0.$$

В данной работе для генерации поверхности отклика используется метод генетической агрегации (Genetic Aggregation) [21], который автоматически генерирует поверхности отклика для рассматриваемой задачи методом полиномов второго порядка, методом наименьших квадратов, методом непараметрической регрессии, методом кригинга, а затем вычисляется средневзвешенная сумма полученных поверхностей отклика:

$$\hat{y}_{ens}(x) = \sum_{i=1}^{N_M} w_i \cdot \hat{y}_i(x),$$

где $\hat{y}_{ens}$ – агрегированная функция поверхности отклика; $\hat{y}_i$ – функция i -ой поверхности отклика; N_M – количество использованных метамоделей; w_i – весовой фактор i -ой поверхности отклика.

Весовые факторы подбираются на основе минимизации критерия среднеквадратичной ошибки. Генетический алгоритм используется при генерации метамоделей перечисленных выше поверхностей отклика с учетом различных параметров с целью получения в итоге наиболее эффективной поверхности отклика.

Для решения задач оптимизации используется многокритериальный генетический алгоритм (Multi-Objective Genetic Algorithm – MOGA) [23, 24], основанный на принципах контролируемого элитизма. Схема ранжирования Парето-эффективных решений реализована при помощи быстрого метода недоминирующей сортировки в порядке убывания приоритета на основе взвешенной суммы критериев и, в конечном счете, сводится к множеству элитарных решений, из которых вручную выбирается оптимальный вариант.

Результаты оптимизации. Анализ результатов оптимизации целесообразно начать с рассмотрения поверхностей отклика. На рис. 5 показаны различные виды поверхностей отклика, полученные при выполнении расчетов на первом этапе оптимизации.

Наглядно показано как работает генерация поверхности отклика методом генетической агрегации: так в итоговой поверхности, представленной на рис. 5, г, отчетливо прослеживаются элементы поверхностей, полученных различными методами (рис. 5, а-в).

В ANSYS DesignXplorer реализована методика автоматического уточнения генетически агрегированной поверхности отклика [22] за счет расчетов дополнительных точек в пространстве параметров (рис. 5, д).

Хотя эта методика и позволяет более полно исследовать поверхность отклика во всем пространстве параметров, а также обнаружить некоторые локальные экстремумы, на практике проведение дополнительных расчетов может оказаться крайне ресурсозатратным и при этом нецелесообразным в плане отыскания оптимального решения.

В данной работе применен подход для получения поверхности отклика, уточненной именно в области оптимальных решений на основе дополнительных расчетов ограниченного количества точек пространства параметров, условно оптимальных для исходной поверхности отклика. Затем проводится повторная оптимизация на основе уже уточненной поверхности отклика.

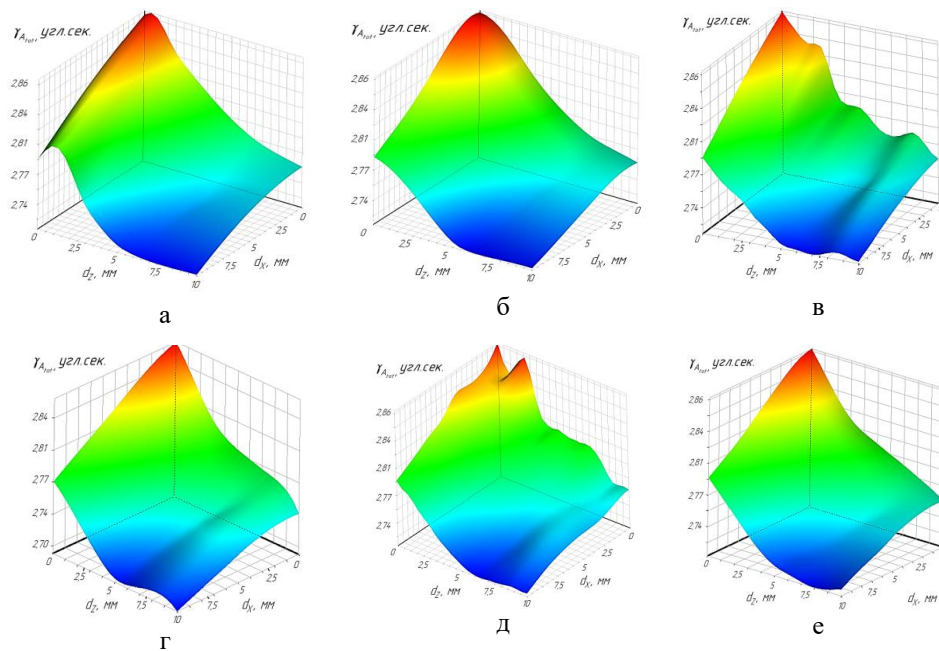


Рис. 5. Поверхности отклика для первого этапа, полученные различными методами: а – полиномиальная; б – непараметрическая регрессия; в – кригинг; г – генетическая агрегация; д – генетическая агрегация (автоматическое уточнение); е – генетическая агрегация (уточнение на основе оптимальных точек)

Результатом решения задач оптимизации RSO1 и RSO1.1 первого этапа исследования являются множества Парето-эффективных решений, показанных на рис. 6. В данном случае масса кронштейна акселерометров фиксирована, поэтому необходимо было минимизировать углы отклонения акселерометров по различным вышеописанным наборам критериев.

Поскольку на втором этапе оптимизации количество параметров существенно увеличилось целесообразно провести анализ чувствительности, как показано на рис. 7, который показывает относительное влияние входных параметров на выходные.

На рис. 8 представлены поверхности отклика для одного из вариантов оптимизации второго этапа исследований. В данном случае исследована зависимость углов отклонения осей акселерометров γ_{Ax} , γ_{Ay} , γ_{Az} , а также их суммы γ_{Atot} от геометрических параметров T_K , T_R . Как видно, глобальные минимумы углов отклонения и их суммы соответствуют различным комбинациям входных параметров, для получения оптимальных компромиссных решений необходимо решить оптимизационные задачи RSO1 – RSO4.

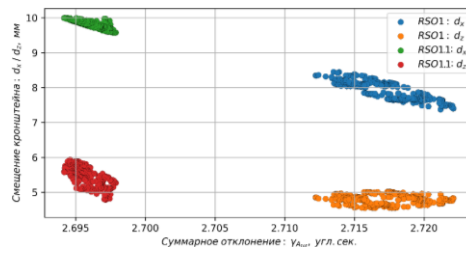


Рис. 6. Анализ результатов первого этапа оптимизации

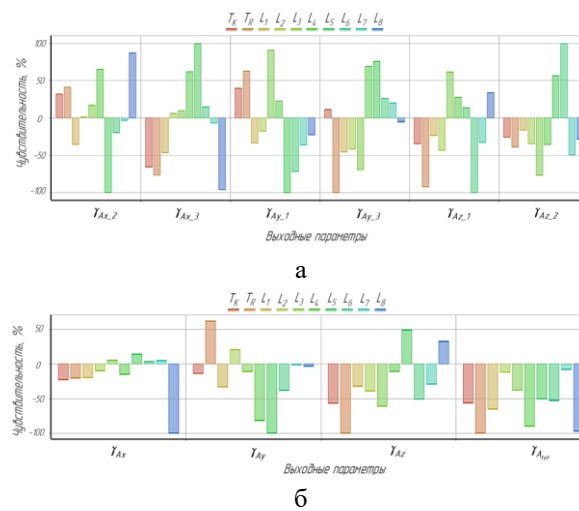


Рис. 8. Анализ чувствительности

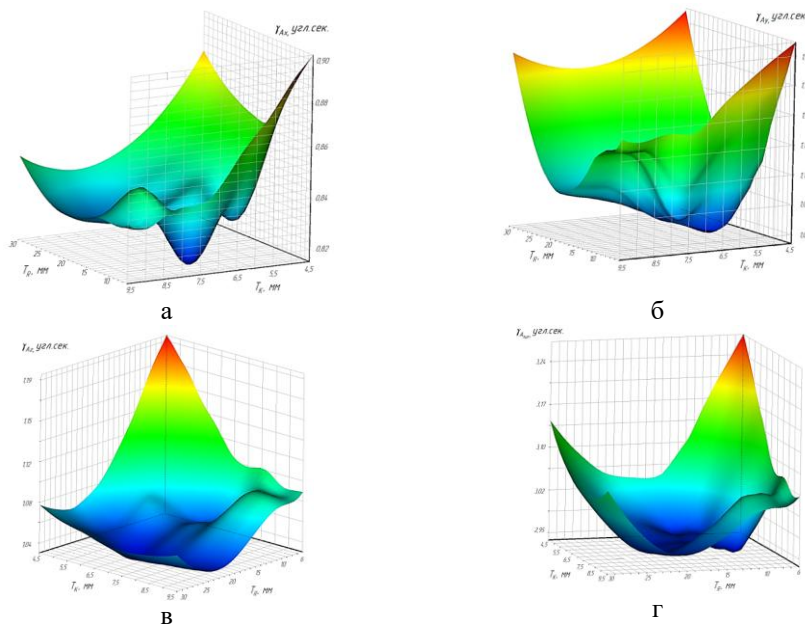


Рис. 8. Поверхности отклика для углов отклонения осей акселерометров

На рис. 9 показаны суммарные перемещения основания БИНС при внешних инерционных воздействиях в различных направлениях.

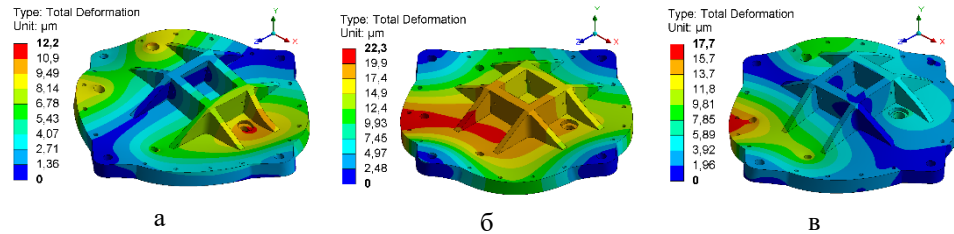


Рис. 9. Суммарное перемещение (мкм) при внешнем воздействии: а – вдоль оси X ; б – вдоль оси Y ; в – вдоль оси Z

Результатом решения задач оптимизации RSO1 – RSO4 второго этапа исследования являются множества Парето-эффективных решений, показанных на рис. 10. Также на этом рисунке выделена область оптимальных относительно исходной конструкции решений.

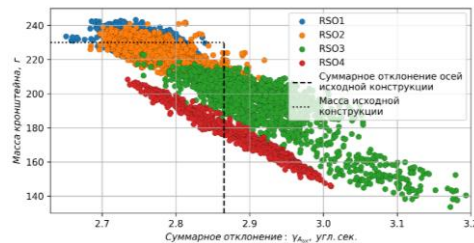


Рис. 10. Анализ результатов второго этапа оптимизации

Анализируя полученные результаты можно заметить, что с уменьшением числа критериев оптимизации фронт Парето сдвигается в сторону более легкой конструкции, но при этом снижается жесткость.

При наличии конкретного технического задания на проектирования изделия можно ожидать ограничений либо со стороны массы конструкции, либо со стороны ее жесткости. В данном случае, оптимизационные задачи решались в общем виде, без учета этих ограничений и для оценки оптимальности решения относительно исходной конструкции предлагается определить предельные значения оптимизируемых критериев (табл. 2): минимальную массу оптимизированного кронштейна при неизменном суммарном угле отклонения $\gamma_{Atot} = const$ и минимальный суммарный угол отклонения γ_{Atot} при неизменной массе $m = const$.

Таблица 2

Анализ результатов оптимизации

Этап оптимизации	Исходная конструкция	Этап 1	Этап 2 ($m=const$)	Этап 2 ($\gamma_{Atot}=const$)
Масса кронштейна акселерометров, г	230	230	230	177
Суммарный угол отклонения γ_{Atot} , угл.сек.	2,86	2,71	2,66	2,86
Относительное изменение массы*	-	-	-	-23,0%
Относительное изменение суммарного угла отклонения*	-	-5,4%	-7,1%	-

*Изменения рассчитаны относительно исходной конструкции

Заключение. В данной работе были описаны подходы к решению задач параметрической многокритериальной оптимизации применительно к несущим системам БИНС.

Особое внимание было уделено подготовке расчетной модели, параметризации расчетной геометрии, построению поверхностей отклика и анализу результатов. Был предложен подход к эффективному и экономичному уточнению поверхностей отклика за счет дополнительных вычислений в области близкой к оптимуму.

Получены фронты Парето для различных наборов оптимизируемых критериев. В результате двухэтапного оптимизационного исследования была определена область Парето-эффективных решений, которые являются оптимальными относительно исходной конструкции кронштейна акселерометров БИНС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Chatfield A.B. Fundamentals of High Accuracy Inertial Navigation. – AIAA, 1997.
2. Titterton D., Weston J. Strapdown Inertial Navigation Technology. – Institution of Engineering and Technology, 2005.
3. Lawrence A. Modern Inertial Technology: Navigation, Guidance, and Control. – Springer, 2012.
4. Noureldin A., Karamat T.B., and Georgy J. Fundamentals of Inertial Navigation, Satellite-based Positioning and their Integration. – Springer, 2013.
5. Пешихонов В.Г. Современное состояние и перспективы развития гироскопических систем // Гироскопия и навигация. – 2011. – № 1. – С.3-16.
6. Климкович Б.В., Толочко А.М. Калибровка БИНС навигационного класса точности в инерциальном режиме // XXII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам: Сб. материалов. – СПб., 2015. – Р. 250-256.
7. Savage P.G. Strapdown Sensors. AGARD Lecture Series // Strapdown Inertial Systems. – 1978. – No. 95,
8. Zienkiewicz O.C. The Finite Element Method. McGraw-Hill Company. – London, 1977.
9. Фролов А.В. Оптимизации конструкции несущей системы высокодинамичного БИНС с использованием показателя сбалансированной точности // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2021. – № 1. – С. 74-90.
10. SpaceClaim Online Help. – <https://help.spaceclaim.com/2015.0.0/en/Content/Support.html>. Проверено 01.04.2023.
11. Nikraves P. Computer-aided analysis of mechanical systems. – Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1988.
12. Ansys Help: – <https://ansyshelp.ansys.com>). Проверено 01.04.2023.
13. Fisher R.A. The Design of Experiment. – 9-th ed. – London: Macmillan, 1971. – 497 p.
14. Box G.E., Behnken D.W. Some new three level designs for the study of quantitative variables // Technometrics. – 1960. – No. 2. – P. 455-475.
15. Box G.E., Hunter W.G., Hunter S.J. Statistics for experimenters: An introduction to design, data analysis, and model building. – New York: Wiley, 1978. – 275 p.
16. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 278 с.
17. Налимов В.В., Голикова Т.И. Логические основания планирования эксперимента. – 2-е изд. – М.: Металлургия, 1981. – 151 с.
18. Соболев И.М. Точки, равномерно заполняющие многомерный куб // Новое в жизни, науке, технике. Сер. Математика, кибернетика. – 1985. – № 2. – С. 14-24.
19. Монтгомери Д.К. Планирование эксперимента и анализ данных. – Л.: Судостроение, 1980. – 384 с.
20. McKay M.D., Beckman R.J., Conover W.J. A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code // Technometrics. American Statistical Association. – 1979. – No. 21 (2). – P. 239-245.
21. Ben Salem M., Tomaso L. Automatic selection for general surrogate models // Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2018. – No. 58 (2). – P. 719-734.
22. Ben Salem M., Roustant O., Gamboa F., Tomaso L. Universal prediction distribution for surrogate models // SIAM/ASA Journal on Uncertainty Quantification. – 2017. – No. 5 (1). – P. 1086-1109.

23. Murata T., Ishibuchi H. MOGA: multi-objective genetic algorithms // International Conference on Evolutionary Computation. – IEEE, 1995. – P. 289-924.
24. Deb K. Multi-objective optimization using evolutionary algorithms. – Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2001. – 520 p.

REFERENCES

1. Chatfield A.B. Fundamentals of High Accuracy Inertial Navigation. AIAA, 1997.
2. Titterton D., Weston J. Strapdown Inertial Navigation Technology. Institution of Engineering and Technology, 2005.
3. Lawrence A. Modern Inertial Technology: Navigation, Guidance, and Control. Springer, 2012.
4. Noureldin A., Karamat T.B., and Georgy J. Fundamentals of Inertial Navigation, Satellite-based Positioning and their Integration. Springer, 2013.
5. Peshekhonov V.G. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya giroskopicheskikh sistem [Current state and development prospects of gyroscopic systems], *Giroskopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and Navigation], 2011, No. 1, pp. 3-16.
6. Klimkovich B.V., Tolochko A.M. Kalibrovka BINS navigatsionnogo klassa tochnosti v inertial'nom rezhime [SINS calibration of navigation accuracy class in inertial mode], *XXII Sankt-Peterburgskaya mezhdunarodnaya konferentsiya po integrirovannym navigatsionnym sistemam: Sb. materialov* [St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems: Proceedings]. Saint Petersburg, 2015, pp. 250-256.
7. Savage P.G. Strapdown Sensors. AGARD Lecture Series, *Strapdown Inertial Systems*, 1978, No. 95.
8. Zienkiewicz O.C. The Finite Element Method. McGraw-Hill Company. London, 1977.
9. Frolov A.V. Optimizatsii konstruktсии nesushchey sistemy vysokodinamichnogo BINS s ispol'zovaniem pokazatelya sbalansirovannoy tochnosti [Optimization of the Design of the Carrier System of a Highly Dynamic SINS Using the Balanced Accuracy Index], *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya TulGU. Technical science], 2021, No. 1, pp. 74-90.
10. SpaceClaim Online Help. Available at: <https://help.spaceclaim.com/2015.0.0/en/Content/Support.html>. Checked 01.04.2023.
11. Nikraves P. Computer-aided analysis of mechanical systems. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1988.
12. Ansys Help. Available at: <https://ansyshelp.ansys.com>. Checked 01.04.2023.
13. Fisher R.A. The Design of Experiment. 9-th ed. London: Macmillan, 1971, 497 p.
14. Box G.E., Behnken D.W. Some new three level designs for the study of quantitative variables, *Technometrics*, 1960, No. 2, pp. 455-475.
15. Box G.E., Hunter W.G., Hunter S.J. Statistics for experimenters: An introduction to design, data analysis, and model building. New York: Wiley, 1978, 275 p.
16. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskiy Yu.V. Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh usloviy [Planning an experiment in the search for optimal conditions]. Moscow: Nauka, 1976, 278 p.
17. Nalimov V.V., Golikova T.I. Logicheskie osnovaniya planirovaniya eksperimenta [Logical foundations for planning an experiment]. 2nd ed. Moscow: Metallurgiya, 1981, 151 p.
18. Sobol' I.M. Tochki, ravnomerno zapolnyayushchie mnogomernyy kub [Points uniformly filling a multidimensional cube], *Novoe v zhizni, nauke, tekhnike. Ser. Matematika, kibernetika* [New in life, science, technology. Ser. Mathematics, cybernetics], 1985, No. 2, pp. 14-24.
19. Montgomeri D.K. Planirovanie eksperimenta i analiz dannykh [Experiment design and data analysis]. Leningrad: Sudostroenie, 1980, 384 p.
20. McKay M.D., Beckman R.J., Conover W.J. A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code, *Technometrics. American Statistical Association*, 1979, No. 21 (2), pp. 239-245.
21. Ben Salem M., Tomaso L. Automatic selection for general surrogate models, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2018, No. 58 (2), pp. 719-734.
22. Ben Salem M., Roustant O., Gamboa F., Tomaso L. Universal prediction distribution for surrogate models, *SIAM/ASA Journal on Uncertainty Quantification*, 2017, No. 5 (1), pp. 1086-1109.
23. Murata T., Ishibuchi H. MOGA: multi-objective genetic algorithms, *International Conference on Evolutionary Computation*. IEEE, 1995, pp. 289-924.
24. Deb K. Multi-objective optimization using evolutionary algorithms. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2001, 520 p.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. Н.С. Маластовский.

Шаповалов Петр Анатольевич – АО «ЦНИИАГ»; e-mail: kinik.keni@yandex.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79267101927; начальник лаборатории.

Михайлов Юрий Владимирович – e-mail: mikhaylov.yu@gmail.com; тел.: +79268736958; к.т.н.; ведущий инженер.

Фролов Александр Владимирович – e-mail: frolov@frolov.moscow; тел.: +79037867374; к.т.н.; начальник отдела.

Савватеев Денис Олегович – e-mail: savvateev.denis24@gmail.com; начальник лаборатории.

Shapovalov Petr Anatolievich – JSC «ЦНИИАГ»; e-mail: kinik.keni@yandex.ru; Moscow, Russia; phone: +79267101927; head of laboratory.

Mikhaylov Yury Vladimirovich – e-mail: mikhaylov.yu@gmail.com; phone: +79268736958; cand. of eng. sc.; lead engineer.

Frolov Alexander Vladimirovich – e-mail: frolov@frolov.moscow; phone: +79037867374; cand. of eng. sc.; head of department.

Savvateev Denis Olegovich – e-mail: savvateev.denis24@gmail.com; head of laboratory.

УДК 629.05

DOI 10.18522/2311-3103-2023-1-265-274

А.М. Грузликов, В.Г. Караулов, Д.А. Мухин, Н.А. Шалаев

РЕЗУЛЬТАТЫ АПРОБАЦИИ АЛГОРИТМА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИИ ПОДВОДНОГО АППАРАТА ПО ДАННЫМ ОТ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ МАЯКОВ

Статья посвящена вопросу определения координат и углов ориентации автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) относительно стационарной посадочной платформы с использованием высокочастотной гидроакустической системы ближнего радиуса действия. Задача навигации предполагает маневрирование аппарата и приближение к подводной станции, что сопряжено с формированием зон с различной акустической видимостью излучателей станции приёмными элементами аппарата. Можно выделить три зоны акустической видимости. Первая зона характеризуется наблюдением сигналов всех маяков подводной станции. Как следствие, данная зона является наиболее информативной для решения задачи позиционирования и определения ориентации АНПА. Вторая зона соответствует частичному сокращению числа наблюдаемых маяков, не оказывающему критического влияния на возможность решения задачи. Третья зона (посадка) определяется существенным сокращением числа наблюдаемых маяков, что, как следствие, значительно затрудняет решение задачи позиционирования, учитывая повышенные требования по точности в момент посадки аппарата, обусловленные обеспечением безопасности. Для сохранения точности позиционирования и определения ориентации подводного аппарата в зоне посадки, предлагается использовать результаты, полученные на ранних этапах приближения аппарата к подводной станции (первая и вторая зоны). В работе приводится математическая постановка задачи, описан алгоритм её решения. При нахождении АНПА в первой и второй зоне алгоритм решения состоит из двух подзадач. Первая подзадача – грубая оценка окрестности местоположения и углов ориентации аппарата с использованием метода К-ближайших соседей; вторая подзадача – уточнение оценок с использованием псевдодальномерного метода путём решения системы алгебраических уравнений с использованием алгоритма Левенберга-Марквардта. Дополнительно осуществляется оценка времени излучения маяками. При нахождении АНПА в третьей зоне алгоритм сводится к решению системы алгебраических уравнений с использованием прогноза времени излучения сигнала маяком, полученного при нахождении аппарата в зонах один и два. Приведены результаты имитационного моделирования и результаты апробации алгоритма, полученные с использованием макета аппарата и макета подводной станции в испытательном бассейне.

Автономный необитаемый подводный аппарат; гидроакустическая навигационная система; навигация; ориентация; задача приведения.

A.M. Gruzlikov, V.G. Karaulov, D.A. Mukhin, N.A. Shalaev

**RESULTS OF TESTING THE POSITIONING ALGORITHM
AND DETERMINING THE ORIENTATION OF THE UNDERWATER
VEHICLE BASED ON DATA FROM HYDRO-ACOUSTIC BEACONS**

The article deals with the determination of coordinates and orientation angles of the autonomous underwater vehicle (AUV) relative to the stationary landing platform using high-frequency near-range hydroacoustic system. The navigation task implies maneuvering the vehicle and approaching the underwater station, which is associated with the formation of zones with different acoustic visibility of the station's emitters by the receiving elements of the vehicle. Three zones of acoustic visibility can be distinguished. The first zone is characterized by observation of signals of all beacons of the underwater station. As a consequence, this zone is the most informative for solving the problem of positioning and orientation determination of the AUV. The second zone corresponds to partial reduction of the number of observed beacons, which does not critically influence the possibility of problem solving. The third zone (landing) is defined by essential reduction of a number of observed beacons, that, as consequence, considerably complicates the solution of the positioning problem, taking into account the increased requirements on accuracy at the moment of landing of the device caused by provision of safety. To maintain positioning accuracy and determine the underwater vehicle orientation in the landing zone, it is proposed to use the results obtained in the early stages of approach of the vehicle to the underwater station (the first and second zones). A mathematical statement of the problem is given in the work, and the algorithm of its solution is described. When finding the AUV in the first and second zones, the solution algorithm consists of two subtasks. The first subtask is a rough estimation of location vicinity and angles of vehicle orientation using K-nearest neighbors method; the second subtask is specification of estimations using pseudo-dimensional method by solving system of algebraic equations with Levenberg-Marquardt algorithm. In addition, estimation of beacon emission time is carried out. At finding ANPA in the third zone the algorithm is reduced to solution of system of algebraic equations with use of forecast of time of signal emission by a beacon, received at finding of the device in zones one and two. The results of simulation modeling and results of algorithm approbation obtained using a mockup of the vehicle and a mockup of the underwater station in the test pool are presented.

Autonomous underwater vehicle; hydroacoustic navigation system; navigation; orientation; navigation task.

Введение. В статье представлены результаты апробации алгоритма позиционирования и определения ориентации АНПА с использованием высокочастотной гидроакустической системы приведения ближнего радиуса действия в интересах решения задачи навигации относительно подводной базовой станции. Указанная задача не является новой, однако, в литературе преимущественно рассматриваются системы с использованием разнородных систем на различных этапах приведения подводного аппарата:

- ♦ на этапе сближения традиционный подход основан на использовании маяков – ответчиков и предполагает излучение сигнала от АНПА с получением ответного сигнала от подводной базы [1–5]. Данный подход не применим на коротких дистанциях, поскольку не удовлетворяет требования по точности в обеспечении безопасности аппарата. Кроме того, излучение запросного сигнала делает АНПА уязвимым для внешнего обнаружения;

- ♦ на этапе стыковки применяются системы технического зрения, когда на базе устанавливаются специальные маркеры – ориентиры, а на подводном аппарате размещаются видеокамеры [6–14]. Данный подход хорошо изучен, известны работы по визуальному позиционированию с использованием нейронных сетей [15] и т.д. Однако, для решения задачи позиционирования с использованием технического зрения необходимы значительные вычислительные ресурсы на борту аппарата, и, кроме того, необходимо решить вопрос, связанный с появлением помех из-за

замутнения воды на дне водоёма (например, при маневрировании аппарата), а также возможной деградацией аппаратуры объектива видеокамеры при длительной эксплуатации в морской среде.

Используемый авторами подход предполагает решение задачи позиционирования и определения углов ориентации с использованием только излучателей на подводной базе [16–19]. Гидроакустическая система позиционирования и определения ориентации аппарата имеет в своем составе приёмные антенны, которые размещаются под килем АНПА в кормовой и носовой части, а также излучатели, устанавливаемые по краям базы и осуществляющие ненаправленное излучение сигнала, см. рис. 1. Следует отметить, что излучаемые сигналы – это тональные сигналы одной частоты, излучение которых разнесено по времени таким образом, чтобы по периоду обнаружения сигнала можно было однозначно идентифицировать источник излучения.

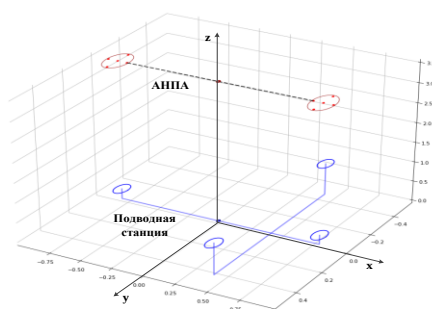


Рис. 1. Схема размещения гидроакустической системы АНПА и подводной станцией

Приведение АНПА предполагает маневрирование аппарата и последовательное приближение к базе, что приводит к необходимости решения задач определения координат и углов ориентации относительно базы при различной акустической видимости излучателей приёмными элементами антенн. При маневрировании АНПА можно выделить три зоны видимости приёмниками различных излучателей, см. рис. 2, которые обусловлены диаграммой направленности излучателей и положением аппарата:

- ◆ зона 1 – в зоне видимости каждой антенны находятся все четыре излучателя;
- ◆ зона 2 – в зоне видимости каждой антенны находятся три излучателя;
- ◆ зона 3 – в зоне видимости каждой антенны находятся по одному излучателю.

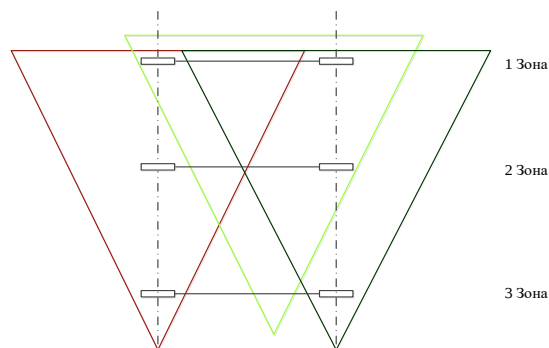


Рис. 2. Зоны видимости излучателей приемниками на АНПА

Для успешного решения задачи приведения АНПА к подводной базе необходимо обеспечить ошибку позиционирования аппарата в момент стыковки (в зоне 3) в пределах нескольких сантиметров. Решение становится возможным при использовании информации полученной при прохождении АНПА через зону 1 и 2.

В статье приведены результаты натурной апробации разработанного авторами алгоритма навигации, которые были получены при проведении экспериментов с использованием макетов АНПА и макета подводной базы в испытательном бассейне предприятия. Приведены результаты посадки при разных скоростях и расположении относительно геометрического центра аппарата.

Постановка задачи. Для решения задачи позиционирования и определения ориентации аппарата при нахождении в зоне 1 выполняются следующие действия:

1. Обнаружение сигналов от маяков подводной базы. Пусть $\hat{t}_i$ – это оценка времени получения сигнала на входе i приёмника ($i \in 1:10$);

2. Идентификация маяков в соответствии с временной диаграммой последовательности излучений. Пусть $\hat{t}_i^j$ – это оценка времени получения сигнала $\hat{t}_i$ с учётом идентификацией излучения сигнала от маяка ($i \in 1:10, j \in 1:4$). При этом координаты $(x, y, z)^j$ и последовательность времён излучения маяков считаются известными.

Требуется разработать метод (F_{nav1}), осуществляющий преобразование множества оценок времён принятых на антенны аппарата сигналов от маяков базы в координаты $(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$, углы ориентации АНПА $(\tilde{\alpha}, \tilde{\beta}, \tilde{\gamma})$ и время излучения от первого маяка ($\tilde{t}^1$):

$$\langle \hat{t}_i^j, (x, y, z)^j \rangle_{i \in 1:10, j \in 1:4} \xrightarrow{F_{nav1}} (\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}, \tilde{\alpha}, \tilde{\beta}, \tilde{\gamma}, \tilde{t}^1).$$

Тогда при нахождении АНПА в зоне 2, задача навигации определяется как:

$$\langle \hat{t}_i^j, (x, y, z)^j, \tilde{t}^1 \rangle_{(i,j)} \xrightarrow{F_{nav2}} (\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}, \tilde{\alpha}, \tilde{\beta}, \tilde{\gamma}, \tilde{t}^1),$$

где пары $(i, j) \in \{(1:5, 1), (1:5, 3:4), (6:10, 2:4)\}$ – определяют область видимости излучателей приёмными элементами антенн АНПА.

Тогда при нахождении АНПА в зоне 3, задача навигации определяется как:

$$\langle \hat{t}_i^j, (x, y, z)^j, \tilde{t}^1 \rangle_{(i,j) \in \{(1:5,1), (6:10,2)\}} \xrightarrow{F_{nav3}} (\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}, \tilde{\alpha}, \tilde{\beta}, \tilde{\gamma}).$$

Требуется разработать методы навигации (F_{nav1} , F_{nav2} , F_{nav3}) для позиционирования и определения углов ориентации относительно подводной базы в зависимости от полученных сигналов от маяков и от их числа (в соответствии с зоной акустической видимости).

Метод решения задачи навигации при нахождении АНПА в зоне 1. Определим следующий двух-этапный алгоритм решения задачи навигации. На первом этапе найдём окрестность координат и углов ориентации АНПА, на втором этапе найдём оценку времени излучения первого маяка. Разберём данное решение более подробно.

Этап 1. Поиск окрестности координат и углов ориентации. Воспользуемся подходом на основе метода обучения с учителем [20], где обучающая выборка будет сформирована с использованием решения геометрической задачи на заданной координатной сетке и таблицы углов ориентации. В качестве признаков выберем следующие значения:

♦ $(t_a^j - t_b^j)_{j \in 1:4}$ – разница времён приёма сигнала, между парами максимально разнесенных приёмных элементов (a, b) на фиксированном маяке (очевидно, что разница времён между сигналами, принятыми на приёмные элементы, входящие в одну антенну, менее информативна);

♦ $(t_i^a - t_i^b - t^{a,b})_{i \in 1:10}$ – разница времён приёма сигнала между парами маяков (a, b) на фиксированном приёмном элементе и смещением по времени излучения сигнала маяками (известное значение $t^{a,b}$).

В качестве искоемых значений зададим сетку возможных значений координат и углов ориентации АНПА. Предлагается использовать метод K -ближайших соседей с использованием метрики $L1$ (манхэттенское расстояние). Выбор метрики $L1$ позволяет нивелировать ошибку по идентичности приёмных элементов и уменьшить влияние ошибки по оценке фронта принятого сигнала от маяка подводной базы. Предлагаемый метод достаточно прост для реализации, однако стоит обратить внимание, что эффективность решения будет существенно зависеть от шага исходной сетки, т.к. полученные значения признаков (разниц времён) будут «притягиваться» к исходным узлам сетки признаков. Рассмотрим следующие варианты формирования исходной сетки признаков:

- ♦ первый вариант, предварительный расчёт исходной сетки с переменным шагом (шаг значительно уменьшается при приближении к оси z);

- ♦ второй вариант, предварительный «грубый» расчёт исходной сетки признаков, затем поиск решения с использованием метода K -ближайших соседей, определение границ возможной окрестности нахождения аппарата и окрестности углов ориентации, формирование «мелкой» сетки признаков исходя из полученных границ окрестностей, т.е. метод последовательного приближения искомого решения.

Первый вариант показал свою эффективность при решении задачи навигации, однако требует неприемлемо больших объёмов памяти при работе (50 Мбайт по одному угловому направлению и не менее 4 Гбайт по всем направлениям).

Второй вариант, показал свою эффективность, причём требует незначительных вычислительных затрат для генерации новой, уточненной сетки. Для проверки метода, была проведена имитация маневрирования аппарата (см. рисунок 3), проведены вычисления координат и направления (курсового угла) аппарата при первом (на грубой сетке) и на втором (уточненной сетке) приближении, истинное значение и результат оценки курсового угла представлены на рис. 4.

По результату имитационного моделирования, оценка среднеквадратического отклонения (СКО) курсового угла на «грубой» сетке (1-я оценка курса НПА) составил 16° , с последующим уточнением путем формирования «мелкой» сетке в заданной окрестности (2-я оценка курса АНПА) СКО курсового угла составило 3° .

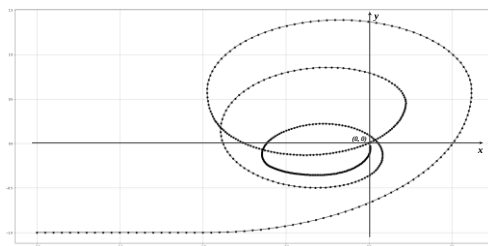


Рис. 3. Имитация маневрирования АНПА относительно подводной базы

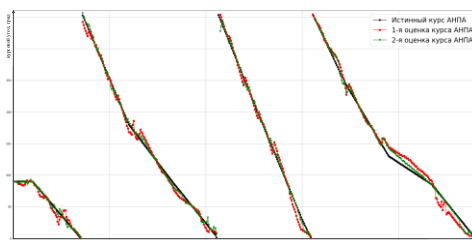


Рис. 4. Истинное значение курса носителя и его оценка при первом (грубом) и на втором (уточненном) приближении

Этап 2. Уточнение решения навигационной задачи и определение времени сводится к решению системы алгебраических уравнений с использованием метода Левенберга-Марквардта [21], где в качестве начального значения задаются координаты и углы ориентации, полученные на первом этапе.

Следует обратить внимание, что главной целью решения системы алгебраических уравнений является нахождение оценки времени излучения сигнала первым маяком $\tilde{t}^1$ и использовать данное значение для синхронизации времени излучения и времени приёма подводным аппаратом, т.е. перейти к решению задачи навигации с использованием псевдодальномерного метода [22-24].

Метод решения задачи навигации при нахождении АНПА в зоне 2 и 3.

При нахождении аппарата в зоне 2 и в зоне 3, часть маяков выходят из зоны прямой акустической видимости, как следствие число информационных значений существенно уменьшается, что делает использование подхода по предварительному нахождению окрестности координат (выполнение этапа 1 в зоне 1) не целесообразным. Как следствие, определение координат и углов ориентации сводится к решению системы алгебраических уравнений на основе псевдодальномерного метода с использованием прогнозирования времени излучения сигнала от известного маяка (например, с использованием оценки времени от первого маяка $\tilde{t}^1$) подводной базы на основе оценок выполненной при нахождении аппарата в первой зоне.

Описание эксперимента. Натурная апробация алгоритма проводилась в испытательном бассейне предприятия с использованием подъёмно-поворотного устройства (ППУ), на котором размещался макет АНПА. На дно бассейна размещался макет подводной базовой станции.

До размещения макета станции, производился монтаж поплавковых индикаторов с целью измерения глубины размещения (наличия крена/дифферента для учёта неровности дна бассейна), а также для определения оси геометрического центра станции.

Приёмные антенны размещались на подъёмно-поворотном устройстве, ось вращения поворотного устройства устанавливалась над геометрическим центром подводной базы и принималась за начало координат (в горизонтальной плоскости). Отсчёт вертикальной координаты производился от плоскости крепления поплавковых индикаторов при отсутствии крена/дифферента макета базы или от точки крепления поплавкового индикатора, имеющего максимальную глубину, при наличии крена/дифферента.

Проверка определения положения и углов ориентации макета АНПА относительно макета подводной станции проводился в следующей последовательности:

- ◆ ППУ с закрепленными на нем посредством держателя приёмными антеннами устанавливался в исходное положение – начало координат в горизонтальной плоскости (на оси геометрического центра подводной станции) и на поверхности воды бассейна. Начальное значение по оси – z определялся по значениям поплавковых индикаторов;
- ◆ производится включение излучения маяков в соответствии с заданной временной диаграммой;
- ◆ производилось смещение ППУ в заданную точку (в горизонтальной плоскости) и на заданную глубину для обеспечения условий текущей проверки. Контроль перемещения ППУ осуществляется посредством пульта управления ППУ комплекса испытательного бассейна;
- ◆ производится (при необходимости) поворот ППУ с закрепленными приёмными антеннами на заданный угол;
- ◆ исходя из заданных смещений в вертикальной и горизонтальной плоскостях вычисляются фактические значения координат ППУ. Полученные значения принимаются в качестве опорных для последующей проверки выполнения норм, предъявляемых к решению задачи навигации.

Эксперимент состоял в размещении макета АНПА в заданных точках координат относительно макета базовой станции с различными углами поворота в горизонтальной плоскости и получение оценок в реальном масштабе времени. Работа в зоне №3 (видимость приемных антенн только одного излучателя) проводилась с переходом из зоны №1.

Результаты. По результатам апробации алгоритма навигации в испытательном бассейне при последовательном перемещении макета АНПА из зоны 1 в зону 3 были построены зависимости СКО координат центра подводного аппарата от высоты и количества принятых периодов излучения сигналов от подводной станции. Все измерения проводились при движении аппарата при максимальном удалении (при нахождении на поверхности) до базовой станции. На рис. 5 представлены зависимости СКО при расположении макета АНПА по центру подводной станции, но разных скоростях перемещения.

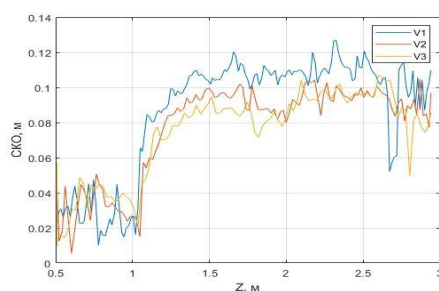


Рис. 5. Зависимость СКО координат от высоты при вертикальном спуске по центру базовой станции при разных скоростях ($v_1 > v_2 > v_3$)

На рис. 6 и 7 представлены зависимости СКО координат при разном положении макета АНПА относительно центра подводной базовой станции и при одинаковой скорости (на 100-м такте глубина аппарата не менялась).

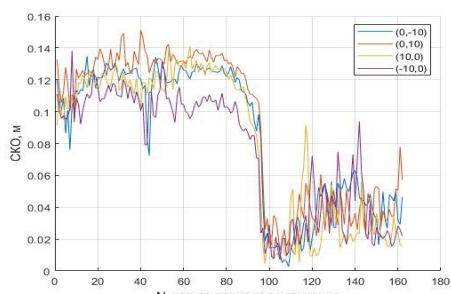


Рис. 6. Зависимость СКО координат от количества периодов излучения сигналов от излучателей при вертикальном спуске с разным расположением макета АНПА относительно геометрического центра станции

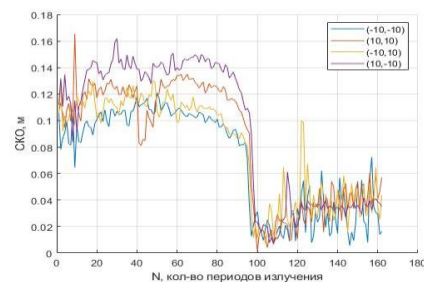


Рис. 7. Зависимость СКО координат от количества периодов излучения сигналов от излучателей при вертикальном спуске с разным расположением АНПА относительно геометрического центра станции

Заключение. Проведена апробация алгоритма позиционирования и определения углов ориентации макета АНПА в испытательном бассейне с использованием подъемно-поворотного устройства при перемещении АНПА относительно макета подводной базовой станции. По результатам работы алгоритма навигации из

зависимостей СКО координат от количества периодов излучения получено, что СКО по осям не более 17 см на всем маршруте движения и уменьшается при сокращении дистанции до макета станции, по курсовому углу СКО не превышает 3°.

Работа проводилась при поддержке гранта РНФ № 22-29-00339.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Инзарцев А.В., Матвиенко Ю.В., Рылов Н.И. и др. Применение автономного необитаемого подводного аппарата для научных исследований в Арктике // Подводные исследования и робототехника. – 2007. – № 2. – С. 5-14.
2. Ligu Tan, Shenmin Song, Xiaoyan Yang and Jianwen Song. An overview of marine recovery methods of UAV for small ships // Journal of Harbin institute of technology. – 2019. – 10 (51). – P. 1-10.
3. Кебкал К.Г., Маиошин А.И. Гидроакустические методы позиционирования автономных необитаемых подводных аппаратов // Гирскопия и навигация. – 2016. – № 3. – С. 115-130.
4. Матвиенко Ю.В. Гидроакустический комплекс навигации подводного робота: дис. ... канд. тех. наук: 01.04.06. – Владивосток, 2004. – 271 с.
5. Wang J., Xu T. and Wang Z. Adaptive robust unscented Kalman filter for AUV acoustic navigation // Sensors. – 2020. – Vol. 20: 60.
6. Popescu Dan & Ichim Loretta. Image Recognition in UAV Application Based on Texture Analysis // International Conference on Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems. – 2015. – P. 693-704.
7. Pinheiro P.M., Neto A.A., Grando R.B. et al. Trajectory Planning for Hybrid Unmanned Aerial Underwater Vehicles with Smooth Media Transition // Journal of Intelligent & Robotic Systems. – 2022. – 104, 46. – <https://doi.org/10.1007/s10846-021-01567-z>.
8. Vallicrosa G., Bosch J., Palomeras N., Ridao P., Carreras M., Gracias N. Autonomous homing and docking for AUVs using Range-Only Localization and Light Beacons // IFAC-PapersOnLine. – 2016. – Vol. 49. – Issue 23. – P. 54-60. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.321>.
9. Fan S., Liu C., Li B., et al. AUV docking based on USBL navigation and vision guidance // Journal of Marine Science and Technology. – 2019. – 24. – P. 673-685.
10. Zhong L., Li D., Lin M., Lin R., Yang C. A Fast Binocular Localization Method for AUV Docking // Sensors (Basel). – Apr. 2019. – 19 (7). – 1735.
11. Lin R., Zhang, F., Li, D., Lin, M., Zhou, G., Yang, C. An Improved Localization Method for the Transition between Autonomous Underwater Vehicle Homing and Docking // Sensors. – 2021. – 21, 2468. – <https://doi.org/10.3390/s21072468>.
12. Li Y., Jiang Y., Cao J., Wang B., and Li Y. AUV docking experiments based on vision positioning using two cameras // Ocean Engineering. – Dec. 2015. – Vol. 110. – P. 163-173.
13. Liu S., Ozay M., Okatani T. Detection and Pose Estimation for Short-Range Vision-Based Underwater Docking // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 2720-2749.
14. Fujiyoshi Hironobu, Hirakawa Tsubasa, Yamashita Takayoshi. Deep learning-based image recognition for autonomous driving // IATSS Research. – 2019. – 43.
15. Степанов Д.Н. Методы и алгоритмы определения положения и ориентации беспилотного летательного аппарата с применением бортовых видеокамер // Программные продукты и системы. – 2014. – № 1 (105).
16. Грузиков А.М. Навигация АНПА в ближнем поле в интересах решения задачи приведения к причальному устройству // Сб. материалов XXIX Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. – СПб., 2022. – С. 138-140.
17. Караулов В.Г., Грузиков А.М. Определение маршрута и скорости движения АНПА в задаче приведения к базовой станции // Матер. XXIV КМУ «Навигация и управление движением». – 2022. – С. 26-29.
18. Кошаев Д.А. Относительное позиционирование и определение ориентации автономного необитаемого подводного аппарата по данным от гидроакустических маяков // Матер. XXXIII конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова. – СПб., 2022. – С. 70-77.
19. Кошаев Д.А. Относительное позиционирование и определение ориентации автономного необитаемого подводного аппарата по данным от гидроакустических маяков // Гирскопия и навигация. – 2022. – Т. 30, № 4 (119). – С. 122-141.
20. Вьюгин В.В. Математические основы теории машинного обучения и прогнозирования. – М., 2013. – 387 с.

21. Измаилов А.Ф., Куренной А.С., Стецюк П.И. Метод Левенберга-Марквардта для задачи безусловной оптимизации // Вестник Тамбовского университета. Серия: естественные и технические науки. – 2019. – Т. 24. № 125. – С. 60-74.
22. Прохорцов А. В., Минина О. В. Аналитическое решение навигационной задачи на основе псевдодальномерного метода // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2020. – Вып. 11. – С. 395-398.
23. Барабанов О. О., Барабанова Л. П. Математические задачи дальномерной навигации. – М.: Физматлит, 2007.
24. Деревянкин А.В., Матасов А.И. О конечном алгоритме определения местоположения объекта по разностям измерений псевдодальностей // Гироскопия и навигация. – 2015. – № 2. – С. 106-117.

REFERENCES

1. Inzartsev A.V., Matvienko Yu.V., Rylov N.I. i dr. Primenenie avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata dlya nauchnykh issledovaniy v Arktike [Application of an autonomous uninhabited underwater vehicle for scientific research in the Arctic], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater research and robotics], 2007, No. 2, pp. 5-14.
2. Ligu Tan, Shenmin Song, Xiaoyan Yang and Jianwen Song. An overview of marine recovery methods of UAV for small ships, *Journal of Harbin institute of technology*, 2019, 10 (51), pp. 1-10.
3. Kebkal K.G., Mashoshin A.I. Gidroakusticheskie metody pozitsionirovaniya avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov [Hydroacoustic methods of positioning autonomous uninhabited underwater vehicles], *Гироскопия и навигация* [Gyroscopy and navigation], 2016, No. 3, pp. 115-130.
4. Matvienko Yu.V. Gidroakusticheskiy kompleks navigatsii podvodnogo robota: dis. ... kand. tekhn. nauk [Hydroacoustic navigation complex of an underwater robot: cand. of eng. sc. diss.]: 01.04.06. Vladivostok, 2004, 271 p.
5. Wang J., Xu T. and Wang Z. Adaptive robust unscented Kalman filter for AUV acoustic navigation, *Sensors*, 2020, Vol. 20: 60.
6. Popescu Dan & Ichim Loretta. Image Recognition in UAV Application Based on Texture Analysis // International Conference on Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems. – 2015. – P. 693-704.
7. Pinheiro P.M., Neto A.A., Grando R.B. et al. Trajectory Planning for Hybrid Unmanned Aerial Underwater Vehicles with Smooth Media Transition // *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. – 2022. – 104, 46. – <https://doi.org/10.1007/s10846-021-01567-z>.
8. Vallicrosa G., Bosch J., Palomeras N., Ridao P., Carreras M., Gracias N. Autonomous homing and docking for AUVs using Range-Only Localization and Light Beacons // *IFAC-PapersOnLine*. – 2016. – Vol. 49. – Issue 23. – P. 54-60. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.321>.
9. Fan S., Liu C., Li B., et al. AUV docking based on USBL navigation and vision guidance, *Journal of Marine Science and Technology*, 2019, 24, pp. 673-685.
10. Zhong L., Li D., Lin M., Lin R., Yang C. A Fast Binocular Localization Method for AUV Docking, *Sensors (Basel)*, Apr. 2019, 19 (7), 1735.
11. Lin R., Zhang, F., Li, D., Lin, M., Zhou, G., Yang, C. An Improved Localization Method for the Transition between Autonomous Underwater Vehicle Homing and Docking, *Sensors*, 2021, 21, 2468. Available at: <https://doi.org/10.3390/s21072468>.
12. Li Y., Jiang Y., Cao J., Wang B., and Li Y. AUV docking experiments based on vision positioning using two cameras, *Ocean Engineering*, Dec. 2015, Vol. 110, pp. 163-173.
13. Liu S., Ozay M., Okatani T. Detection and Pose Estimation for Short-Range Vision-Based Underwater Docking, *IEEE Access*, 2019, Vol. 7, pp. 2720-2749.
14. Fujiyoshi Hironobu, Hirakawa Tsubasa, Yamashita Takayoshi. Deep learning-based image recognition for autonomous driving, *IATSS Research*, 2019, 43.
15. Stepanov D.N. Metody i algoritmy opredeleniya polozheniya i orientatsii bespilotnogo letatel'nogo apparata s primeneniem bortovykh videokamer [Methods and algorithms for determining the position and orientation of an unmanned aerial vehicle using onboard video cameras], *Programmnye produkty i sistemy* [Software products and systems], 2014, No. 1 (105).
16. Gruzlikov A.M. Navigatsiya ANPA v blizhnem pole v interesakh resheniya zadachi privedeniya k prichal'nomu ustroystvu [Navigation of the AUV in the near field in the interests of solving the ghost problem to the mooring device], *Sb. materialov XXIX Sankt-*

- Peterburgskoy mezhdunarodnoy konferentsii po integrirovannym navigatsionnym sistemam* [Collection of materials XXIX St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems]. Saint Petersburg, 2022, pp. 138-140.
17. Karaulov V.G., Gruzlikov A.M. Opredelenie marshruta i skorosti dvizheniya ANPA v zadache privedeniya k bazovoy stantsii [Determining the route and speed of AUV movement in the problem of driving to the base station], *Mater. XXIV KMU. «Navigatsiya i upravlenie dvizheniem»* [Collection XXIV KMU Navigation and motion control], 2022, pp. 26-29.
 18. Koshaev D.A. Otnositel'noe pozitsionirovanie i opredelenie orientatsii avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata po dannym ot gidroakusticheskikh mayakov [AUV relative position and attitude determination using acoustic beacons], *Mater. XXXIII konferentsii pamyati vydayushchegosya konstruktora giroskopicheskikh priborov N.N. Ostryakova* [Collection XXXIII conference in memory of the outstanding designer of gyroscopic devices N.N. Ostryakov]. Saint Petersburg, 2022, pp. 70-77.
 19. Koshaev D.A. Otnositel'noe pozitsionirovanie i opredelenie orientatsii avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata po dannym ot gidroakusticheskikh mayakov [AUV relative position and attitude determination using acoustic beacons], *Giroskopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and navigation], 2022, Vol. 30, No. 4 (119), pp. 122-141.
 20. Vyugin V.V. Matematicheskie osnovy teorii mashinnogo obucheniya i prognozirovaniya [Mathematical foundations of the theory of machine learning and forecasting]. Moscow, 2013, 387 p.
 21. Izmailov A.F., Kurennoy A.S., Stetsyuk P.I. Metod Levenberga-Markvardta dlya zadachi bezuslovnoy optimizatsii [Levenberg-Marquardt method for the problem of unconditional optimization], *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Vestnik of Tambov University. Series: Natural and Technical sciences], 2019, Vol. 24, No. 125, pp. 60-74.
 22. Prokhortsov A.V., Minina O.V. Analiticheskoe reshenie navigatsionnoy zadachi na osnove psevdodal'nomernogo metoda [Analytical solution of the navigation problem based on the pseudo-dimensional method], *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of TulSU. Technical sciences], 2020, Issue 11, pp. 395-398.
 23. Barabanov O. O., Barabanova L. P. Matematicheskie zadachi dal'nomernoy navigatsii [Mathematical problems of rangefinder navigation]. Moscow: Fizmatlit, 2007.
 24. Derevyankin A.V., Matasov A.I. O konechnom algoritme opredeleniya mestopolozheniya ob'ekta po raznostyam izmereniy psevdodal'nostey [On a finite algorithm for determining the location of an object based on the measurement differences of pseudo-distances], *Giroskopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and navigation], 2015, No. 2, pp. 106-117.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Н.В. Колесов.

Грузликов Александр Михайлович – Государственный научный центр Российской Федерации АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»; e-mail: agruzlikov@yandex.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 89312664852; к.т.н.; начальник отдела.

Караулов Владислав Германович – e-mail: vladkar0707@gmail.com; тел.: 89214027848; инженер-программист.

Мухин Дмитрий Алексеевич – e-mail: dmitriy.a.mukhin@yandex.ru; тел.: 89218974013; начальник сектора.

Шалаев Никита Александрович – e-mail: castollux@mail.ru; тел.: 89217582505; инженер 1 категории.

Gruzlikov Alexander Mikhailovich – State Research Center of the Russian Federation Concern CSRI Elektropribor; e-mail: agruzlikov@yandex.ru; Saint Petersburg, Russia; phone: +79312664852; cand. of eng. sc.; head of the department.

Karaulov Vladislav Germanovich – e-mail: vladkar0707@gmail.com; phone: +79214027848; software engineer.

Mukhin Dmitry Alekseevich – e-mail: dmitriy.a.mukhin@yandex.ru; phone: +79218974013; head of the sector.

Shalaev Nikita Alexandrovich – e-mail: castollux@mail.ru; phone: +79312664852; engineer of the 1st category.

Раздел V. Техническое зрение

УДК 004.383

DOI 10.18522/2311-3103-2023-1-275-287

Н.А. Бочаров

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДХОДОВ К УНИФИКАЦИИ БОРТОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Исследования в области создания специализированных вычислительных комплексов для роботов ведутся во многих мировых научных центрах и в том числе в нашей стране. Развитие возможностей сенсорных систем, систем глобальной навигации, рост вычислительной мощности и совершенствование алгоритмов позволяют создавать бортовые вычислительные комплексы, обладающие широкими интеллектуальными возможностями. Важной, но нерешенной проблемой остается оснащение таких вычислительных комплексов микропроцессорами отечественного производства. Одной из сложностей, препятствующей широкому внедрению отечественных средств вычислительной техники является проблема унификации и стандартизации составных бортовых частей вычислителей. Унификация модулей бортовых вычислителей позволила бы открыть новые возможности разработчикам робототехнических комплексов за счет снижения цены и упрощения разработки и модернизации. В данной статье рассмотрены подходы к унификации и стандартизации элементов бортовых вычислителей, описан опыт развития стандартов ANSI/VITA в области бортовых вычислителей, а также приведены примеры вычислительных модулей в унифицированном формате COM-Express на базе микропроцессоров Эльбрус для бортовых вычислителей РТК. Проведены эксперименты с использованием унифицированных вычислительных модулей на базе микропроцессоров Эльбрус-2С3, Эльбрус-1С+ и Эльбрус-4С. Показана их применимость для создания бортовых вычислительных комплексов. Показана необходимость разработки отечественного стандарта для корпусов и форм-факторов бортовых вычислителей.

Бортовые вычислители; робототехника; COM-Express; VITA90; Эльбрус.

N.A. Bocharov

STUDY OF APPROACHES TO THE UNIFICATION OF ON-BOARD COMPUTERS

Research in the field of creating specialized computing systems for robots is conducted in many world scientific centers, including our country. The development of capabilities of sensor systems, global navigation systems, growth of computing power and improvement of algorithms allow creating onboard computing systems with broad intellectual capabilities. An important, but unsolved problem remains the equipping of such computing systems with domestically produced microprocessors. One of the difficulties hindering the widespread integration of domestic hardware is the problem of unification and standardization of the components of the onboard computers. Unification of onboard computer modules would open up new opportunities for developers of robotic systems by reducing the price and simplifying development and modernization. This article discusses approaches to the unification and standardization of elements of onboard computers, describes the experience of the development of ANSI/VITA standards in the field of onboard computers, and also provides examples of computing modules in a unified COM-Express form-factor based on Elbrus microprocessors for onboard computers. Experiments were conducted using unified computing modules

based on Elbrus-2C3, Elbrus-1C+ and Elbrus-4C microprocessors. Their applicability for creation of onboard computing complexes is shown. The necessity of developing a domestic standard for on-board computer housings and form-factors is shown.

Onboard computers; robotics; VITA90; COM-Express; Elbrus.

Введение. Управление современными автономными робототехническими комплексами (РТК) осуществляются с помощью специализированных бортовых вычислительных комплексов [1]. Развитие возможностей сенсорных систем, систем глобальной навигации, рост вычислительной мощности и совершенствование алгоритмов позволяют создавать бортовые вычислительные комплексы, обладающие широкими интеллектуальными возможностями.

Использование отечественных вычислительных средств, таких как средства вычислительной техники (СВТ) на базе микропроцессоров Эльбрус позволяют решить вышеозначенные вопросы [2, 3]. Одной из сложностей, препятствующей широкому внедрению отечественных СВТ является проблема унификации и стандартизации [4]. Унификация модулей бортовых вычислителей позволила бы открыть новые возможности разработчикам робототехнических комплексов за счет снижения цены и упрощения разработки и модернизации.

Почему унификация бортовых вычислителей так важна? Множество проекты по созданию и модернизации РТК находятся в стагнации из-за бюджетных ограничений. Для заказчика наиболее экономичным вариантом является модернизация, так как разработка нового РТК с нуля дороже и дольше. Модернизация бортового вычислителя - это гораздо больше, чем просто повышение скорости обработки информации. Подобная модернизация зачастую добавляет принципиально новые возможности РТК. Появляется возможность извлекать больше информации из потоков данных, генерируемых датчиками всех типов. Появляется возможность добавлять новые более точные датчики.

Замена бортового вычислителя – наиболее эффективный способ выполнить такого рода модернизацию. Если габариты и внешние интерфейсы постоянны, то можно использовать одно и то же пространство РТК без необходимости проведения сложных конструкторских работ.

Еще одним преимуществом, которое можно получить на этих этапах обновления, является замена проприетарной или устаревшей подсистемы. Это открывает возможности для конкуренции, что приводит к появлению инноваций по более конкурентоспособным ценам. Особенно актуально это в условиях технологических ограничений, когда поставки определенных компонентов бортовых вычислителей сопряжены с большими трудностями.

Кроме того, модульный подход обеспечивает превосходное снижение рисков с точки зрения устаревания технологий и возможность внедрения экономически эффективных технологий. По мере развития технологий модули могут быть заменены и / или обновлены по мере необходимости, что позволяет поддерживать программы с длительным жизненным циклом. Хотя замена модуля не будет производиться в полевых условиях, фактическое обновление может быть выполнено с минимальным эффектом и вполне может не оказать влияния на охлаждение или энергопотребление платформы.

Целью данной работы является исследование подходов к унификации и стандартизации элементов бортовых вычислителей. Приведены примеры отечественных вычислительных модулей в унифицированном формате COM-Express на базе микропроцессоров Эльбрус для бортовых вычислителей РТК.

Особенности СВТ бортовых вычислительных комплексов. Средства вычислительной техники (СВТ) для РТК обычно входят в состав бортовых систем этих комплексов, поэтому требования к этим СВТ во многом определяются требо-

ваниями к самим РТК. Кроме того, в зависимости от области применения и целей робототехнических комплексов, задачи, исполняемые СВТ, могут существенно различаться, а как следствие, могут существенно различаться требования к производительности и набору внешних интерфейсов самих вычислителей. Обобщая, можно сказать, что производительность СВТ должна быть достаточной для обработки данных с датчиков РТК (при автономном функционировании), а внешние интерфейсы должны обеспечивать возможность подключения датчиков и системы связи. Суммируя сказанное, в зависимости от типа РТК, могут предъявляться различные требования по следующим параметрам:

- ◆ предельные массогабаритные требования;
- ◆ требования к системе охлаждения СВТ;
- ◆ требования к бортовой электросети и потребляемой мощности СВТ
- ◆ требования к производительности
- ◆ требования к внешним интерфейсам.

Кроме того, надо учесть, что по конструктивным требованиям блок вычислителя должен быть выполнен в виде отдельного конструктивного элемента, который должен иметь возможность надежного крепления на шасси РТК и обладать одним или несколькими удобными разъемами, обеспечивающими высокоскоростной обмен и возможность быстрого монтажа/демонтажа блока на шасси РТК.

На данный момент требования к этим параметрам не описаны государственными стандартами Российской Федерации. Существующие и разрабатываемые бортовые вычислители производятся малыми сериями и, как правило, не взаимозаменяемые. Однако, за рубежом существует большое количество стандартов (например стандарты ANSI VITA), которые формализуют требования к различным параметрам бортовых вычислителей.

Стандарт VNX VITA 74. Спецификация VNX VITA 74 основана на стандартах VPX и OpenVPX, адаптированная к меньшему форм-фактору. Цель спецификации VNX – взять концепции, которые сделали VPX успешным, и применить их к платформе малого форм-фактора с аналогичной архитектурой, а также использовать другие успешные стандарты для разъемов, подключаемости и форм-факторов, чтобы конкретно снизить риск разработки и время вывода на рынок. В следующем обсуждении будет проведено сравнение и противопоставление VNX и VPX в отношении размера, веса, мощности и стоимости, также известных как SWaP-C.

VNX – это коммерческий стандарт готовых модулей (COTS) для одноплатных компьютеров малого форм-фактора (SFF) с кондуктивным охлаждением, чрезвычайно прочных, сигнальных процессоров и модулей ввода-вывода, которые будут использоваться как часть интегрированной системы.

При разработке нового стандарта компании, разработавшие стандарт VNX SFF, стремились минимизировать экономические, технические и календарные риски. Интерфейсы электрических сигналов и топология заимствованы непосредственно из VPX (VITA 46) и OpenVPX (VITA 65). Структура электрических сигналов VITA 74.0 и шины данных PCIe идентична структуре, указанной в VITA 46. Профили слотов модулей разрабатываются с самого начала аналогично профилям VITA 65. Разъем VNX является производным от разъема FMC (VITA 57); та же серия разъемов, но с другим расположением контактов. Этот разъем показал свою работоспособность на скоростях PCIe Gen3 и выше, что делает его применимым для высокоскоростных подключений к шине передачи данных, видео, хранилищу данных.

Множество модулей одноплатных компьютеров VNX используют процессорные мезонинные платы PCI COM Express Mini типа 2 и 10, что еще сокращает время вывода устройства на рынок, риски и стоимость. Модули ввода-вывода VNX используют другой стандарт Mini PCI Express (miniPCIe). Модули miniPCIe

были интегрированы в носитель VNX, что позволяет использовать множество существующих модулей ввода-вывода от многих различных производителей в системе, вдохновленной VNX.

Стандарт COM Express. COM Express – это отраслевой стандарт, который существует уже более десяти лет и получил широкое распространение в индустрии. Модуль COM Express предоставляет все компоненты, необходимые для управляющего компьютера, со стандартным набором интерфейсов ввода-вывода, включая Ethernet, PCIe, SATA, USB и видео. Для передачи сигналов требуется несущая плата. Для модулей COM Express было определено несколько типоразмеров, обеспечивающих хорошую масштабируемость для широкого спектра применений. Базовый формат COM Express имеет размеры 95 мм x 125 мм.

Несмотря на то, что COM Express хорошо подходит для встраиваемых приложений, он изначально не подходит для очень экстремальных применений, таких как удары и вибрация, часто встречающиеся в воздушных и наземных транспортных средствах. Исторически сложилось так, что эта технология в основном применялась в безопасных промышленных условиях.

Однако этот недостаток базового модуля можно устранить, добавив дополнительные монтажные отверстия. Базовая спецификация определяет пять монтажных отверстий по краям модуля для монтажа. Такая конфигурация оставляет середину платы (особенно в области разъема на модуле Type 6) подверженной сильной вибрации. Добавление трех дополнительных отверстий (рис. 1) для снижения влияния вибраций обеспечивает очень крепкий модуль, который можно легко использовать в жестких условиях.



Рис. 1: Дополнительные монтажные отверстия в модуле COM Express

Для бортового применения, где размер, вес, мощность и цена ограничены, охлаждение требует применения современных методов монтажа для обеспечения теплового контакта с процессором. Эти методы особенно важны при работе с современными процессорами повышенной мощности, такими как Эльбрус-8С, Эльбрус-2С3 и Эльбрус-16С.

Стандарт мезонина ХМС. ХМС – это мезонинный стандарт, который поддерживает высокоскоростные протоколы (такие как PCIe Gen 1/2/3). Использование ХМС в качестве мезонина внутри подсистемы обеспечивает возможность использования возможностей, специфичных для конкретного применения, таких как связь, обработка графической информации, хранение данных и многие другие. Кроме того, он определяет надежную систему соединителей, обеспечивающую поддержку широкого спектра применений.

Обновлением стандарта ХМС (ХМС 2.0) является добавление альтернативного разъема (VITA 61), который обеспечивает поддержку 7,5 Гбит/с, что дает поддержку PCIe Gen 2 (с большим запасом) и возможность поддержки Gen 3. Поскольку ХМС предназначен для работы как с воздушным, так и с кондуктивным охлаждением, его удобно применять в жестких условиях.

VITA 75. VITA 75 – это стандарт, определяющий жесткий малогабаритный форм-фактор компонентов бортовых вычислителей. Хотя подсистемы по стандарту VITA 75 предназначены для эксплуатации в жестких условиях, стандарт не включает устойчивость к климатическим воздействиям в спецификации. Отчасти это связано с тем, что климатические требования будут сильно различаться в зависимости от целевой платформы и области применения. Разработчики подсистем VITA 75 сами определяют климатические требования к поставляемым ими подсистемам.

VITA 75 отличается от VITA 73 и VITA 74 тем фактом, что в ней основное внимание уделяется корпусу, как в части габаритов, так и в части устойчивости к механическим воздействиям. Также в VITA 75 включены спецификации типов разъемов для подключения внешних устройств.

К разработке стандарта VITA 75 приложили руку такие ведущие производители вычислительной техники, как Curtiss-Wright Controls Defense Solutions, CSP, Inc., Elma Bustronic, GE Intelligent Platforms, General Dynamics Canada, Lockheed Martin, Mercury Computer Systems, TE Connectivity и Xellerix.

VITA 75 появился в ответ на растущий спрос на все более компактные и легкие встраиваемые вычислительные подсистемы. Он определяет оболочку, в которую должна вписываться подсистема, внешние интерфейсы питания и данных, интерфейсы монтажа и интерфейсы охлаждения. VITA 75 – это стандарт жесткого малогабаритного форм-фактора (*rugged small form factor*), который доступен уже более пяти лет.

Несколько особенностей VITA 75 делают его особенно привлекательным для бортовых применений, где необходимо минимизировать размер, вес, потребляемую мощность и цену. Во-первых, это позволяет использовать различные передние панели, таким образом требования к разъемам питания и ввода-вывода могут быть решены на более поздних этапах разработки РТК. Также стандарт определяет широкий диапазон типоразмеров корпусов. Одним из наиболее привлекательных элементов VITA 75 является то, что он определяет различные типы модулей, поддерживающих объединение как блэйдов через объединительную плату, так и без необходимости использования объединительной платы.

В настоящее время определены три типа охлаждения, обеспечивающие широкий спектр применений: кондуктивное, принудительное воздушное и подача на холодную стенку.

Объединение COM Express и XMC в VITA 75. Проектирование бортовых вычислителей неизбежно включает в себя ряд компромиссов, при которых разработчик выбирает компромисс между производительностью с одной стороны, и размер, вес, потребляемая мощность и цена – с другой. Обычно целью является максимизация производительности при минимизации размера, веса и потребляемой мощности.

Примером бортового вычислителя по стандарту VITA 75 является MAGIC1 от GE (рис. 2). Основанная на стандарте VITA OpenVPX в формате 3U, система объемом менее 3 кубических дециметров, весе менее 5.5 кг и энергопотреблении менее 120 Вт. Комбинируя одноплатный компьютер и графический процессор (GPU), он позволяет относительно небольшой и легкой подсистеме обеспечивать пиковую производительность > 900 ГФЛОПС.



Рис. 2. GE MAGIC1

Не смотря на множество потенциальных применений такого вычислителя, он может не подходить для случаев, где не требуется значительная вычислительная мощность, но требуется минимальные размер, вес, и потребляемая мощность.

Используя другие модули стандарта VITA 75, можно создать вычислитель (см. рис. 3) с существенно меньшими размером, весом, и потребляемой мощностью по сравнению с системой 3U VPX, описанной выше. При использовании другого модуля COM Express (например E2C3-COM на основе Эльбру-2С3), наряду с другой подсистемой ввода-вывода, может быть создан вычислитель, обеспечивающая пиковую вычислительную производительность около 300 ГФЛОПС, при этом размер и вес уменьшаются более чем вдвое, а потребляемая мощность составляет менее 50 Вт. За счет еще большего уменьшения производительности может быть получена очень низкая мощность (например, для увеличения продолжительности автономной работы), до менее чем 25 Вт.

Одним из существенных преимуществ использования такого блочного подхода является то, что можно избежать дорогостоящих соединителей и бэкплейнов, путем простого объединения вычислительных модулей (например, модуль COM Express, подключенный к общему носителю с дополнительной возможностью размещения мезонина ХМС). Такой подход также может избежать проблем с целостностью сигнала, которые могут возникать при традиционном подходе с бэкплейном. При проектировании по-прежнему требуется особое внимание, поскольку для поддержки высокоскоростных протоколов, таких как PCIe Gen 3, необходимо тщательно учитывать потери в разъеме, диэлектрик печатной платы и сигнал.

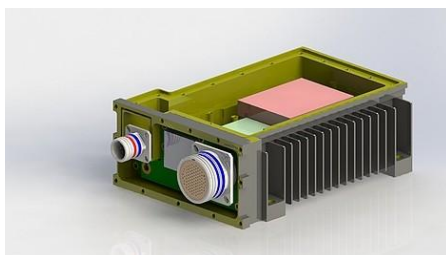


Рис. 3. VITA 75/COM Express

VITA 90. VITA 90 – это новый проект стандарта жесткого малогабаритного форм-фактора (SFF), который является прямым потомком VITA 74, который идеально подходит для бортовых вычислителей для военных и аэрокосмических применений.

Типичные модули VITA 74 и VITA 90 имеют размер примерно колоды игральных карт (рис. 4). Оба имеют электронную архитектуру, аналогичную OpenVPX. За последние несколько лет рабочими группами была проделана большая работа по преобразованию VITA 74 в VITA 90.



Рис. 4. Типовой модуль VITA74/90 19 мм

Оригинальный стандарт VNX был разработан и оптимизирован для военных / аэрокосмических применений, требующих больших вычислительных ресурсов. Первые вычислители по этому стандарту основывались на базе одного или нескольких одноплатных компьютеров на основе процессоров Intel, таких как Intel Atom и AMD G-Series, со встроенной графикой и относительно маломощными ядрами общего назначения. В этих системах первого поколения использовался готовый компьютер-на модуле (COM), модули ввода-вывода и флэш-память, установленные на носителях VNX, в которых размещены модули COM Express Type 2 и Type 10, Mini PCI Express (mPCIe) I/O модули и диск mSATA.

Базовый стандарт ANSI/VITA 74.0-2017 был выпущен со списком будущих подстандартов, которые должны были быть разработаны и внедрены для оптимизации сложных систем ввода-вывода VNX. Два из этих подстандартов добавили бы концепцию бэкплейна “Соединительные модули”, необходимого для обеспечения высокоскоростной/широкополосной оптической и коаксиальной передачи данных как для между модулями, так и внутри одного модуля. Другие подстандарты определили бы электромеханику для одномодульных вычислителей и определили бы особенности для высокоэффективного / высокомоощного модуля VNX в части охлаждения.

VITA 74.4, также известный как SpaceVNX, документирует конкретные электронные и механические особенности, необходимые для внедрения радиационно-стойких модулей VNX для применения в малых космических аппаратах. В процессе разработки этих подстандартов технический комитет VITA 74 рассмотрел требования правительства и промышленности к производительности модулей и варианты их использования. Комитет решил пойти ва-банк и полностью оптимизировать назначение выводов оригинального вычислительного модуля VITA 74.0 VNX и модуля ввода-вывода для обеспечения максимальной целостности сигнала, а также внедрить в стандарт панели в стиле OpenVPX для управления, данных, расширений и ввода-вывода.

Эволюция VNX от простого стандарта модулей к семейству стандартов, которые будут описывать технологию, необходимую для сборки сложных бортовых вычислителей, была обусловлена военными и аэрокосмическими разработчиками семейства стандартов VITA 65 OpenVPX в сообществах VSO, SOSA и Hardware Open Systems Technologies (HOST). В результате эволюционных изменений в разьеме SEARAY целостность сигнала всех высокоскоростных каналов обмена заметно повысилась, и обновленные платы теперь могут обеспечивать поддержку PCI Express 4.0 и других современных протоколов.

В дополнение к разьему SEARAY новые соединительные модули VNX были специально разработаны для поддержки высокоскоростной передачи данных с использованием различных интерфейсов: волоконно-оптического, коаксиального и изолированных медных контактов. Пример такого соединительного модуля показан на рис. 5.



Рис. 5. Базовая плата модуля VITA 90 VNX+ с 240-контактным разъемом

Эти эволюционные изменения были сочтены настолько революционным улучшением по сравнению с возможностями базового стандарта ANSI/VITA-74.0 VNX, что руководство VITA и SOSA решило, что новые возможности должны быть закреплены в новом семействе стандартов – ANSI/VITA 90, а конкретно в стандарте VNX-Plus (VNX+).

VNX + включает в себя не только 400-контактный разъем SEARAY от Samtec, как определено в базовом стандарте VITA 90.0, но и новые дополнения, необходимые для поддержки сигнальных процессоров, радиопередатчиков, графических процессоров, сетевых коммутаторов и других модулей ввода-вывода, требующих коаксиальной или оптической передачи сигналов. Эти модули будут использовать 240 или 320-контактный высокоскоростной разъем SEARAY для передачи данных, как определено в подстандарте VITA 90.2. VITA 90.3 описывает модуль источника питания VNX+, использующий 320-контактный разъем SEARAY, и модуль накопления энергии (накопительный конденсатор и/или аккумулятор), использующий 240-контактный разъем SEARAY. Пример реализации VNX+ показан на рис. 6.

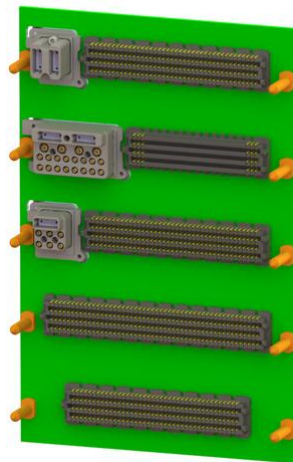


Рис. 6. Пример бэкплейна VITA 90 VNX+

В настоящее время уже доступны или официально объявлено о разработке множества модулей с функциональностью, необходимой для вычислений, обработки сигналов, связи и ввода-вывода. Примеры модулей VNX +, которые существуют сегодня, модифицируются из VNX или находятся в процессе разработки, включают:

- ◆ Модули преобразования мощности и хранения энергии для систем малой, средней и высокой мощности.
- ◆ Вычислительные модули с двухъядерными процессорами Intel Core i7 11-го поколения (ранее Tiger Lake) и четырехъядерными процессорами Intel Atom текущего поколения.
- ◆ Модули NVIDIA GPGPU, использующие графический процессор Jetson AGX Xavier.
- ◆ Модули FPGA, использующие различные SOC и MPSoC с ядрами Arm.
- ◆ Модули RFSOCs и MPSoCs и сопутствующий приемопередатчик.
- ◆ Радиационно стойкие модули управления для космических применений.
- ◆ Модули ввода-вывода для шин данных MIL-STD-1553, ARINC 429 и MIL-1394B/AS5643.

- ♦ Модули ввода-вывода с интерфейсами RS-232/422/485, CAN и Gigabit Ethernet.
- ♦ Коммутаторы Gigabit Ethernet и 10 GbE.
- ♦ Модули хранения данных, использующие твердотельные накопители mSATA.
- ♦ Инерциальные измерительные устройства MEMS с GPS.

По мере того как военные и аэрокосмические разработчики переходят на более компактные и интеллектуальные платформы, потребность в создании вычислителей меньшего размера становится все более важной. Чтобы получить больше “отдачи”, происходит все больший сдвиг парадигмы от электроники на заказ к решениям COTS и mCOTS. Чтобы свести к минимуму усилия, необходимые для модернизации систем за счет использования общего оборудования, интерфейсов связи и управления, необходимо создавать аппаратное обеспечение, которое может соответствовать стандартам MOSA от ANSI/VITA, SOSA, HOST и других консорциумов. VNX+ разрабатывается и внедряется с учетом всех этих требований.

Модули COM-Express на основе микропроцессоров Эльбрус. В настоящий момент на базе микропроцессоров Эльбрус реализовано три варианта вычислительных модулей в формате COM Express.

Вычислительный модуль «E4C/COM [5] реализован на базе микропроцессора «Эльбрус-4С». На базе отечественного микропроцессора Эльбрус-1С+ ПАО «ИНЭУМ им. И.С. Брука» разработан процессорный модуль МП18 [6], выполненный в форм-факторе Com Express Type 6. Модуль E2C3-COM [7], разработанный также в ИНЭУМ, основан на процессоре Эльбрус-2С3, выполнен в форм-факторе COM Express Type 6 Basic.

Сравнение характеристик рассмотренных вычислительных модулей приведено в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики модулей

	E4C/COM	МП18	E2C3-COM
Микропроцессор	Эльбрус-4С, 4 ядра, 800 МГц	Эльбрус-1С+, 1 ядро, 1 ГГц	Эльбрус-2С3, 2 ядра, 2 ГГц
Архитектура процессора	Эльбрус v4	Эльбрус v4	Эльбрус v6
Видеоядро	Нет	Встроенное	Встроенное
Контроллер ввода-вывода	КПИ	КПИ-2	Встроенный
Производительность, ГФлопс (FP32/FP64)	50/25	24/12	192/96
Оперативная память	4 Гбайта DDR3	4 Гбайта DDR3	8 Гбайт, ECC DDR4
Форм-фактор	COM Express Type 6	COM Express Type 6	COM Express Type 6
Габаритные размеры, мм	125×95×9,8	125×95×12	125×95×12
Масса, кг	0,14	0,12	0,11
Потребляемая мощность, Вт, не более	65	30	30
Год выпуска	2016	2018	2022

Рассмотренные вычислительные модули по условиям эксплуатации и характеру применения соответствуют условиям:

- ♦ пониженная рабочая температура окружающего воздуха минус 50 °С;

- ◆ пониженная предельная температура окружающего воздуха минус 60 °С;
- ◆ повышенная рабочая температура окружающего воздуха плюс 55 °С;
- ◆ повышенная предельная температура окружающего воздуха плюс 60 °С;
- ◆ пониженное атмосферное давление 84 кПа (630 мм рт.ст.);
- ◆ повышенное атмосферное давление 106,7 кПа (800 мм рт.ст.);
- ◆ повышенная относительная влажность воздуха 80 % при температуре плюс 25 °С без выпадения конденсата.

Перечень внешних интерфейсов рассмотренных вычислительных модулей приведен в табл. 2.

Таблица 2

Перечень внешних интерфейсов

Интерфейс	E4C/COM	МП18	E2C3-COM
Ethernet	1xEthernet 1000Base-T	1x10/100/1000 Mbit/s	1x10/100/1000 Mbit/s
USB 2.0	2	8	7
USB 3.0	0	0	4
Видео	нет	2xHDMI, 2-х ка- нальный LVDS	2xHDMI, 2-х ка- нальный LVDS
SATA	3xSATA 2.0	4xSATA 3.0	3xSATA 3.0
RS232	2	2	2
Другое	SPI, I2C	SPI, I2C, SMBus	SPI, I2C, SMBus

Использование вычислительных модулей на основе микропроцессоров Эльбрус для решения задач РТК. Исследования по применимости вычислительной техники на базе микропроцессоров Эльбрус для задач робототехники проводились в ряде работ [8, 9], однако публикации на тему применимости процессоров Эльбрус 6-го поколения (Эльбрус-2С3, Эльбрус-12С, Эльбрус-16С) для задач робототехники на данный момент в открытых источниках отсутствуют.

Одной из самых сложных и важных задач мобильной робототехники является автономное движение в заранее неизвестной среде с препятствиями. Решение этой задачи состоит из нескольких подзадач:

- ◆ составления цифрового описания рабочей среды с определением зон, в которых робот может двигаться безопасно с заданной скоростью [10, 11]
- ◆ определение положения мобильного робота в заданной системе координат [12, 13];
- ◆ планирование траектории с учетом препятствий, кинематических и динамических возможностей мобильного шасси [14, 15];
- ◆ осуществления автономного движения вдоль спланированной траектории [16, 17].

Как показано в работе [18] задача поиска пути произвольно масштабируется до достижения оптимальных по времени характеристик и производительности самого слабого из рассмотренных процессоров (Эльбрус-4С) уже достаточно для ее решения. Задача диагностики рассмотрена в работе [19]. Использование средств ОС Эльбрус и модуля привязки времени позволяет добиться времени реакции на отказ менее 0.1 с.

Самой ресурсоемкой задачей для решения на борту РТК является задача технического зрения [20]. С использованием рассмотренных вычислительных модулей рабочая производительность на задаче стереозрения составила от 8 до 30 кадров в секунду, причем максимальная производительность достигнута на E2C3-COM. Из полученных результатов можно сделать вывод, что вычислительная тех-

ника на основе микропроцессоров серии Эльбрус в унифицированном форм-факторе COM Express применима для создания бортовых вычислительных комплексов.

Заключение. В данной статье рассмотрены подходы к стандартизации и унификации компонентов бортовых вычислительных комплексов. Проанализирован опыт разработки стандартов в США консорциумом VITA. Подробно рассмотрены стандарты VITA74, VITA75, VITA90.

Рассмотренные унифицированные вычислители основываются на стандартных форм-факторах типа COM Express и ХМС. В Российской Федерации есть опыт создания вычислителей в таких форм-факторах. В качестве примера рассмотрены вычислительные модули на базе отечественных микропроцессоров Эльбрус, выполненные в форм-факторе COM Express. Проведены экспериментальные исследования и сделан вывод о применимости рассмотренных вычислителей для бортовых вычислительных комплексов РТК.

Проведение исследование показывает, что стандартизация в области бортовых вычислителей положительно повлияла на зарубежных производителей вычислительной техники. Отсутствие аналогичных стандартов в РФ может быть одним из ограничений, сдерживающих как развитие направления бортовых вычислителей, так и области робототехники в целом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Романов А.М. Обзор аппаратно-программного обеспечения систем управления роботов различного масштаба и назначения. Ч. 3. Экстремальная робототехника // Российский технологический журнал. – 2020. – Т. 8. – № 3 (35). – С. 14-32. – DOI: 10.32362/2500-316X-2020-8-3-14-32.
2. Бычков И.Н., Лобанов И.Н., Молчанов И.А. Решения по включению средств защиты информации в вычислительные комплексы на основе платформы "Эльбрус" // Наноиндустрия. – 2020. – Т. 13, № S4 (99). – С. 103-104. – DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.4s.103.104.
3. Бочаров Н.А. Программно-аппаратная платформа "Эльбрус" для решения задач искусственного интеллекта // Наноиндустрия. – 2021. – Т. 14, № S7 (107). – С. 638-640. – DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.638.640.
4. Чучко П.А., Бычков И.Н., Панченко Е.Г. Проблема унификации модулей на основе процессора "Эльбрус-2С3" // Наноиндустрия. – 2021. – Т. 14, № S7 (107). – С. 96-97. – DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.96.97.
5. Режим доступа: <http://www.mcst.ru/e4c-com>.
6. Режим доступа: <http://www.sm1820.ru/2018/09/04/mp18/>.
7. Режим доступа: <http://www.sm1820.ru/2021/12/10/e2c3-com/>.
8. Бочаров Н.А., Зуев А.Г., Славин О.А. Производительность микропроцессора Эльбрус-8СВ для решения задач технического зрения в условиях ограничений энергопотребления // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 1 (218). – С. 259-271. – DOI: 10.18522/2311-3103-2021-1-259-271.
9. Бочаров Н.А. Моделирование алгоритмов катастрофоустойчивости групп роботов на программно - аппаратной платформе "Эльбрус" // Радиопромышленность. – 2019. – № 3. – С. 8-14. – DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-3-8-14.
10. Suman Harapanahalli, Niall O Mahony, Gustavo Velasco Hernandez, Sean Campbell, Daniel Riordan, Joseph Walsh. Autonomous Navigation of mobile robots in factory environment // Procedia Manufacturing. – 2019. – Vol. 38. – P. 1524-1531. – ISSN 2351-9789. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.134>.
11. Pileun Kim, Jisoo Park, Yong K. Cho, Junsuk Kang. UAV-assisted autonomous mobile robot navigation for as-is 3D data collection and registration in cluttered environments // Automation in Construction. – 2019. – Vol. 106, 102918. – ISSN 0926-5805. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102918>.
12. Pieter M. Blok, Koen van Boheemen, Frits K. van Evert, Joris IJsselmuiden, Gook-Hwan Kim. Robot navigation in orchards with localization based on Particle filter and Kalman filter // Computers and Electronics in Agriculture. – 2019. – Vol. 157. – P. 261-269. – ISSN 0168-1699, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.046>.

13. *Vasiliki Balaska, Loukas Bampis, Moses Boudourides, Antonios Gasteratos*. Unsupervised semantic clustering and localization for mobile robotics tasks // *Robotics and Autonomous Systems*. – 2020. – Vol. 131, 103567. – ISSN 0921-8890, <https://doi.org/10.1016/j.robot.2020.103567>.
14. *Lin S. et al.* A Review of Path-Planning Approaches for Multiple Mobile Robots // *Machines*. – 2022. – Vol. 10, No. 9. – P. 773.
15. *Lamini, Said Benhlila, Ali Elbekri*. Genetic Algorithm Based Approach for Autonomous Mobile Robot Path Planning // *Procedia Computer Science*. – 2018. – Vol. 127. – P. 180-189. – ISSN 1877-0509, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.01.113>.
16. *Haitao Zhao, Lingchu Mao, Jibo Wei*. Coverage on demand: A simple motion control algorithm for autonomous robotic sensor networks // *Computer Networks*. – 2018. – Vol. 135. – P. 190-200. – ISSN 1389-1286. – <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.02.004>.
17. *Guilherme Maeda, Okan Koç, Jun Morimoto*. Phase portraits as movement primitives for fast humanoid robot control // *Neural Networks*. – 2020. – Vol. 129. – P. 109-122. – ISSN 0893-6080, <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2020.04.007>.
18. *Bocharov N.A., Paramonov N.B., Alexandrov A.V., Slavin O.A.* Solving of tasks of cognitive control a robots group in multi-core microprocessors "elbrus" // *CEUR Workshop Proceedings: Selected Papers of the 2nd International Scientific Conference "Convergent Cognitive Information Technologies", Convergent 2017, Moscow, 24–26 ноября 2017 года*. – М., 2017. – P. 234-244.
19. *Бочаров Н.А., Гладких А.С., Парамонов Н.Б., Сенченков С.В.* Возможности микропроцессоров Эльбрус-8С и Эльбрус-8СВ для решения задач робототехники // *Роботизация Вооружённых Сил Российской Федерации: Сб. статей V военно-научной конференции, Анапа, 29–30 июля 2020 г.* – Анапа: Федеральное государственное автономное учреждение "Военный инновационный технополис "ЭРА", 2020. – С. 71-83.
20. *Бочаров Н.А., Парамонов Н.Б., Славин О.А., Суминов К.А.* Математические и программные модели задач технического зрения робототехнических комплексов на основе микропроцессоров "Эльбрус" // *Тр. Института системного программирования РАН*. – 2022. – 34 (6). – P. 85-100. – [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2022-34\(6\)-6](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2022-34(6)-6).

REFERENCES

1. *Romanov A.M.* Obzor apparatno-programmnogo obespecheniya sistem upravleniya robotov razlichnogo masshtaba i naznacheniya. Ch. 3. Ekstremal'naya robototekhnika [Review of hardware and software for robot control systems of various scales and purposes. Part 3. Extreme robotics], *Rossiyskiy tekhnologicheskiy zhurnal* [Russian Technological Journal], 2020, Vol. 8, No. 3 (35), pp. 14-32. DOI: 10.32362/2500-316X-2020-8-3-14-32.
2. *Bychkov I.N., Lobanov I.N., Molchanov I.A.* Resheniya po vklyucheniuyu sredstv zashchity informatsii v vychislitel'nye komplekсы na osnove platformy "El'brus" [Solutions for the inclusion of information security tools in computing complexes based on the Elbrus platform], *Nanoindustriya* [Nanoindustry], 2020, Vol. 13, No. S4 (99), S. 103-104. DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.4s.103.104.
3. *Bocharov N.A.* Programmno-apparatnaya platforma "El'brus" dlya resheniya zadach iskusstvennogo intellekta [Software and hardware platform "Elbrus" for solving artificial intelligence problems], *Nanoindustriya* [Nanoindustry], 2021, Vol. 14, No. S7 (107), pp. 638-640. DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.638.640.
4. *Chuchko P.A., Bychkov I.N., Panchenko E.G.* Problema unifikatsii moduley na osnove protsessora "El'brus-2S3" [The problem of unification of modules based on the processor "Elbrus-2C3"], *Nanoindustriya* [Nanoindustry], 2021, Vol. 14, No. S7 (107), pp. 96-97. DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.96.97.
5. Available at: <http://www.mcst.ru/e4c-com>.
6. Available at: <http://www.sm1820.ru/2018/09/04/mp18/>.
7. Available at: <http://www.sm1820.ru/2021/12/10/e2c3-com/>.
8. *Bocharov N.A., Zuev A.G., Slavin O.A.* Proizvoditel'nost' mikroprotsessora El'brus-8SV dlya resheniya zadach tekhnicheskogo zreniya v usloviyakh ogranicheniy energopotrebleniya [The performance of the Elbrus-8SV microprocessor for solving problems of technical vision in conditions of limited energy consumption], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. 1 (218), pp. 259-271. DOI: 10.18522/2311-3103-2021-1-259-271.

9. Bocharov N.A. Modelirovanie algoritmov katastrofoustoychivosti grupp robotov na programmno - apparatnoy platforme "El'brus" [Modeling of algorithms for disaster tolerance of robot groups on the Elbrus hardware and software platform], *Radiopromyshlennost'* [Radio Industry], 2019, No. 3, pp. 8-14. DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-3-8-14.
10. Suman Harapanahalli, Niall O Mahony, Gustavo Velasco Hernandez, Sean Campbell, Daniel Riordan, Joseph Walsh. Autonomous Navigation of mobile robots in factory environment, *Procedia Manufacturing*, 2019, Vol. 38, pp. 1524-1531. ISSN 2351-9789. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.134>.
11. Pileun Kim, Jisoo Park, Yong K. Cho, Junsuk Kang. UAV-assisted autonomous mobile robot navigation for as-is 3D data collection and registration in cluttered environments, *Automation in Construction*, 2019, Vol. 106, 102918. ISSN 0926-5805. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102918>.
12. Pieter M. Blok, Koen van Boheemen, Frits K. van Evert, Joris IJsselmuiden, Gook-Hwan Kim. Robot navigation in orchards with localization based on Particle filter and Kalman filter, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, Vol. 157, pp. 261-269. ISSN 0168-1699, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.046>.
13. Vasiliki Balaska, Loukas Bampis, Moses Boudourides, Antonios Gasteratos. Unsupervised semantic clustering and localization for mobile robotics tasks, *Robotics and Autonomous Systems*, 2020, Vol. 131, 103567. ISSN 0921-8890, <https://doi.org/10.1016/j.robot.2020.103567>.
14. Lin S. et al. A Review of Path-Planning Approaches for Multiple Mobile Robots, *Machines*, 2022, Vol. 10, No. 9, pp. 773.
15. Lamini, Said Benhlila, Ali Elbekri. Genetic Algorithm Based Approach for Autonomous Mobile Robot Path Planning, *Procedia Computer Science*, 2018, Vol. 127, pp. 180-189. ISSN 1877-0509, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.01.113>.
16. Haitao Zhao, Lingchu Mao, Jibo Wei. Coverage on demand: A simple motion control algorithm for autonomous robotic sensor networks, *Computer Networks*, 2018, Vol. 135, pp. 190-200. ISSN 1389-1286. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.02.004>.
17. Guilherme Maeda, Okan Koç, Jun Morimoto. Phase portraits as movement primitives for fast humanoid robot control, *Neural Networks*, 2020, Vol. 129, pp. 109-122. ISSN 0893-6080, <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2020.04.007>.
18. Bocharov N.A., Paramonov N.B., Alexandrov A.V., Slavin O.A. Solving of tasks of cognitive control a robots group in multi-core microprocessors "elbrus", *CEUR Workshop Proceedings: Selected Papers of the 2nd International Scientific Conference "Convergent Cognitive Information Technologies"*, Convergent 2017, Moscow, 24–26 ноября 2017 года. Moscow, 2017, pp. 234-244.
19. Bocharov N.A., Gladkikh A.S., Paramonov N.B., Senchenkov S.V. Vozmozhnosti mikroprotssessorov El'brus-8S i El'brus-8SV dlya resheniya zadach robototekhniki [Capabilities of Elbrus-8C and Elbrus-8SV microprocessors for solving robotics problems], *Robotizatsiya Vooruzhennykh Sil Rossiyskoy Federatsii: Sb. statey V voenno-nauchnoy konferentsii, Anapa, 29–30 iyulya 2020 g.* [Robotization of the Armed Forces of the Russian Federation: Collection of articles of the V Military Scientific Conference, Anapa, July 29-30, 2020]. Anapa: Federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe uchrezhdenie "Voennyi innovatsionnyy tekhnopolis "ERA", 2020, pp. 71-83.
20. Bocharov N.A., Paramonov N.B., Slavin O.A., Suminov K.A. Matematicheskie i programnye modeli zadach tekhnicheskogo zreniya robototekhnicheskikh kompleksov na osnove mikroprotssessorov "El'brus" [Mathematical and software models of technical vision problems of robotic complexes based on "Elbrus" microprocessors], *Tr. Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN* [Proceedings of the Institute of System Programming of the Russian Academy of Sciences], 2022, 34 (6), pp. 85-100. Available at: [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2022-34\(6\)-6](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2022-34(6)-6).

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.Б. Пармонов.

Бочаров Никита Алексеевич – ПАО «ИНЭУМ им. И.С. Брука»; e-mail: bocharov.na@phystech.edu; г. Москва, Россия; тел.: +79167346437; к.т.н.; начальник отдела.

Bocharov Nikita Alexeevich – JSC «INEUM»; e-mail: bocharov.na@phystech.edu; Moscow, Russia; phone: +79167346437; cand. of eng. sc.; chief of department.

Н.В. Колесов, Е.В. Лукоянов, В.С. Тюльников, Р.Л. Крючков**МАСШТАБИРУЕМАЯ ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ В БОРТОВОЙ
РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ АНПА***

Рассмотрению вопросов разработки распределенных вычислительных систем (РВС) уделяется большое внимание в современной научно-технической литературе. При этом, как правило, в работах обсуждается только один из наиболее значимых аспектов, например, производительность, надежность, отказоустойчивость, энергоэффективность и масштабируемость. Основным вклад настоящей статьи состоит в попытке комплексного рассмотрения проблемы проектирования РВС, опирающегося на пример многоканальной бортовой РВС обработки информации автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА). Целью статьи является формулировка единой концепции многоканальной бортовой РВС обработки информации в реальном времени. В результате предложены архитектура и принципы функционирования многоканальной бортовой РВС, основывающиеся на известных подходах к обеспечению отказоустойчивости и энергоэффективности, но учитывающие особенности масштабируемых систем. Предлагаемые решения можно рассматривать как усиление традиционных подходов к проектированию масштабируемых систем. Отказоустойчивость достигается путем применения средств тестового диагностирования. При этом для сокращения сложности этих средств в каждый программный модуль (ПМ) системы предварительно вводится избыточность, для которой далее строится тест. В работе показывается, что этот тест обнаруживает ошибки в адресации обменов между функциональными блоками ПМ, реализующими процесс обработки информации. По результатам анализа реакции на тест происходит обнаружение отказавшего ПМ, после чего он прекращает свою работу, а вместо него запускается новый ПМ, реализующий тот же процесс. Предложения в части энергоэффективности рассчитаны на случай присутствия в системе избыточных процессоров (в том числе многоядерных), которые привлекаются к исполнению ПМ системы с одновременным снижением тактовой частоты и напряжения питания. Поскольку потребляемая в РВС мощность существенно зависит от этих параметров, происходит ее заметное снижение. Для решения задачи используется оптимальный жадный алгоритм, предполагающий последовательное введение в систему дополнительных процессоров. Важно, что данное предложение по увеличению энергоэффективности РВС сообщает последней дополнительные возможности по отказоустойчивости. Практическая значимость предложенной концепции заключается в возможности её использования не только в АНПА, но и в других случаях комплексного проектирования современных масштабируемых многоканальных бортовых РВС обработки информации в реальном времени с повышенными требованиями по отказоустойчивости и энергоэффективности.

Отказоустойчивость; энергоэффективность; распределенные вычислительные системы; масштабируемые системы; автономные необитаемые подводные аппараты.

N.V. Kolesov, E.V. Lukoyanov, V.S. Tyulnikov, R.L. Kryuchkov**SCALABLE DATA PROCESSING IN AUV ONBOARD DISTRIBUTED
COMPUTING SYSTEM**

Development of distributed computing systems (DCS) takes an important place in modern scientific and technical literature. Generally, only one of the most significant features of DCS is discussed in the papers, for example, performance, reliability, fault tolerance, energy efficiency and scalability. In this paper authors attempt to overall consider the problem of DCS design, based on the example of a multi-channel onboard DCS for data processing places in autonomous underwater vehicle (AUV). The aim of this paper is to formulate a unified concept of a multi-channel onboard DCS for real-time data processing. As a result, the architecture and principles of operation of a multi-channel onboard DCS are proposed, based on well-known approaches to fault tolerance and ener-

* Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 22-29-00339.

gy efficiency, taking into account the features of scalable systems. The proposed solutions can be viewed as an advancement of traditional approaches to scalable systems development. Fault tolerance is achieved by using test-based diagnostic tools. In order to reduce the complexity of these tools, redundancy is preliminarily added into each software module (SM) of the system. Then tests for the redundancies are built. It is shown that this test detects failures in the addressing of exchanges between SM blocks that implement the data processing. Based on the results of the analysis of the diagnostic tool reaction to the test, a failed software module is detected. Then failed module stops its work, and a new SM that implements the same algorithm is started execute instead. Energy efficiency proposals are suitable for the case of the presence of redundant processors in the system which could support multi-core technology. These processors could be involved in the execution process of the system SMs with a simultaneous decrease in the clock frequency and supply voltage. Since the power consumption in the DCS significantly depends on frequency and supply voltage, it decreases along with this parameter values. An optimal greedy algorithm is used to solve described problem, which assumes sequential involving of additional processors into the system. It is important that energy efficiency proposal of the DCS provides the latter additional fault tolerance capabilities. The practical importance of the proposed concept consists in the possibility of using not only in AUVs application. It also could be used in other cases of scalable multi-channel onboard DCS development with real-time data processing which have fault tolerance and energy efficiency requirements.

Fault tolerance; energy efficiency; distributed computing systems; scalable systems; autonomous uninhabited underwater vehicles.

Введение. Проблемы создания и применения АНПА являются актуальными [1–4], при этом большое внимание уделяется и проектированию их РВС [5–8]. В каждой из указанных работ, как правило, обсуждается только один из наиболее значимых аспектов проектирования, например, производительность, надежность, отказоустойчивость, энергоэффективность и масштабируемость. Основной вклад настоящей работы состоит в попытке комплексного рассмотрения проблемы проектирования РВС. Будем предполагать, что объектом дальнейшего рассмотрения является масштабируемая многоканальная бортовая РВС реального времени, степень «жесткости» которого не будет уточняться. В результате прототипом системы, на наш взгляд, может служить, например, многоканальная система обработки информации в гидроакустическом комплексе АНПА. Далее для подобных масштабируемых систем последовательно обсуждаются вопросы отказоустойчивости и энергоэффективности. Предлагаемые решения можно рассматривать как усиление традиционных подходов к проектированию масштабируемых систем.

Основными понятиями при описании математической модели масштабируемой РВС являются понятия "процесса" и "программного ресурса" [9, 10]. При этом под процессом понимается последовательность блоков (команд, процедур) $Q_1, Q_2, \dots, Q_S$. В рассматриваемой системе процессы представляются в виде ПМ, которые исполняются процессорами системы. Будем считать допустимой ситуацию, когда в системе выполняются параллельно во времени многочисленные копии одного и того же ПМ. Исполняемые ПМ будем называть программным ресурсом. Текущий размер программного ресурса в масштабируемой системе в каждый момент времени ограничен и может меняться в зависимости от режима работы РВС, определяемого условиями применения. В результате намеченные к исполнению ПМ оказываются в роли конкурирующих.

Отказоустойчивость масштабируемых РВС. Традиционный подход к обеспечению отказоустойчивости масштабируемых систем предполагает наличие в системе средств диагностирования, обнаруживающих нарушение в работе любого ПМ. После этого ПМ с нарушением прекращает свою работу, а вместо него запускается новый ПМ, реализующий тот же процесс, что и в остановленном ПМ. При этом остается вопрос о средствах обнаружения нарушения. В конкретных приложениях он решается по-разному и с разным успехом. Ниже предлагается использовать путь, который, как нам кажется, хорошо сочетается с особенностями масштабируемой РВС. Решение основано на упрощенной версии авторского подхода к тестовому диагностированию РВС реального времени [11, 12].

Коротко изложим основную идею. Прежде заметим, что подход можно считать составной частью иерархического процесса проектирования средств диагностирования для сложных систем [5]. В этом случае компоненты системы с соблюдением отношения включения размещаются по уровням сложности, после чего для каждого уровня синтезируются свои средства диагностирования, опирающиеся на свои модели и методы. В данном случае речь идет о диагностировании на верхнем уровне, на котором распределенная система представляется композицией локальных систем или ПМ, составляющих программное обеспечение системы. При этом рассматриваемый класс отказов включает всевозможные нарушения в адресации обменов между ПМ, размещенными на процессорах РВС и обменивающимися необходимой информацией асинхронно, т.е. по ее готовности.

Итак, в системе используются средства тестового диагностирования (СТД), представленные отдельным ПМ. Они генерируют для каждого ПМ (каждого запущенного в работу процесса) персональный тест, проверяющий правильность его «сборки» из набора блоков. Однако известно, что в общем случае, как процедура построения теста, так и длина самого теста будут характеризоваться экспоненциальной по отношению к размерности модели [13]. В связи с этим постановка задачи тестового диагностирования изменяется, а именно, она предполагает предварительное введение в каждый ПМ системы избыточности с целью упрощения процедуры построения тестов и сокращения их длины. Остается решить вопросы о способе введения избыточности и о процедуре построения теста.

Вводимая избыточность представляет собой встраиваемую в каждый ПМ цепочку из простых динамических звеньев M_i (по одному звену на каждый функциональный блок Q_i), исполняемую параллельно основному алгоритму ПМ (рис. 1). Как уже отмечалось, в системе присутствуют СТД, но они формируют тесты не для сложного ПМ, а для введенной в ПМ простой цепочки из динамических звеньев. В результате и процедура построения теста и сам тест оказываются простыми. При этом, поскольку реакция звеньев M_i на тест передается в общих массивах с основной информацией от блоков Q_i , то в случае неправильной адресации основной информации от Q_i неправильной окажется и адресация тестовой информации от M_i . Таким образом, контролируя выходную тестовую информацию с выхода цепочек, можно контролировать правильность адресации основной информации внутри цепочек. Отсюда следует, что встраиваемая цепочка может рассматриваться как диагностическая модель ПМ.

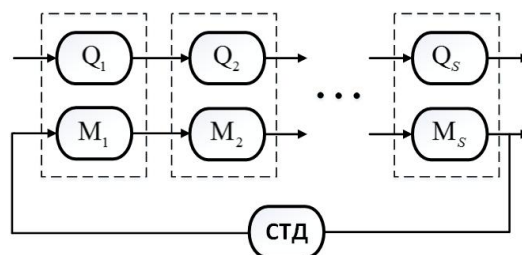


Рис. 1. Иллюстрация идеи тестового диагностирования процесса,
 Q_i – функциональный блок, M_i – диагностическое звено, СТД – средства
 тестового диагностирования

Уточним модели звена в цепочке. Из теории технического диагностирования известно [5], что наибольшей эффективности диагностирования при наименьших затратах можно достичь в случае, когда объект диагностирования – линейный.

Кроме того, ясно, что, поскольку речь идет об анализе последовательности событий (последовательности выполнения блоков), то этот алгоритм должен быть динамическим. В результате получаем, что моделью звена должна быть линейная динамическая система, матрицы которой определены в двоичном поле $\mathbb{F} = \{0,1\}$:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{i,j}(k+1) &= \mathbf{f}_{i,j} \mathbf{x}_{i,j}(k) + \mathbf{g}_{i,j} \mathbf{u}_{i,j}(k), \\ \mathbf{y}_{i,j}(k) &= \mathbf{h}_{i,j} \mathbf{x}_{i,j}(k), \\ i &= \overline{1, l(j)}, j = \overline{1, m}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\mathbf{x}_{i,j}(k) \in \mathbb{F}^n$, $\mathbf{u}_{i,j}(k) \in \mathbb{F}^q$, $\mathbf{y}_{i,j}(k) \in \mathbb{F}^p$ – векторы состояния, входа и выхода соответственно для i -го звена модели j -й цепи, n – размерность вектора состояния, q – размерность входного вектора, p – размерность выходного вектора, $\mathbf{f}_{i,j} \in \mathbb{F}^{n \times n}$, $\mathbf{g}_{i,j} \in \mathbb{F}^{n \times q}$, $\mathbf{h}_{i,j} \in \mathbb{F}^{p \times n}$ – матрицы динамики, входа и выхода, $l(j)$ – число динамических звеньев (функциональный блоков) в ПМ _{j} , j – количество ПМ (процессов) в системе.

Обсуждая настоящую тему, следует упомянуть важное направление в моделировании сложных систем, получившее широкое распространение в последние годы. Имеется в виду использование модели дискретной событийной системы [14]. В этом случае поведение системы описывается в виде последовательности событий. Данная модель достаточно часто применяется и при решении задач диагностирования [15]. Рассматриваемую далее модель также можно отнести к классу дискретных событийных моделей, поскольку в этом случае поведение системы представляется как последовательность событий обмена между блоками ПМ.

Описание модели цепи получается по следующим правилам. Формируется вектор состояния цепи $\mathbf{X}(k)$, составленный из векторов состояния входящих в нее звеньев $\mathbf{x}_i(k)$, $i = \overline{1, l}$, динамика которых описывается уравнениями типа (1). С помощью блочных матриц $\mathbf{F}(j(k))$, $\mathbf{G}(j(k))$, $\mathbf{H}(j(k))$ описывается перенос информации между блоками ПМ или средствами диагностирования и ПМ в каждом $j(k)$ -м информационном обмене. В силу периодичности процесса съема информации с датчиков в системе реального времени обработка информации носит также периодический характер. Для удобства описания свяжем с каждой последовательностью матриц на интервале, равном этому периоду, свою последовательность индексов, множество которых обозначим через $\Gamma = \{\gamma_s\}_{s=1}^N$, где $N = l + 1$, так как добавляются дополнительные сеансы обмена информацией со средствами диагностирования. Тогда описание модели для системы принимает вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}(k+1) &= \mathbf{F}(\gamma_s(j(k)))\mathbf{X}(k) + \mathbf{G}(\gamma_s(j(k)))\mathbf{u}(k), \\ \mathbf{y}(k) &= \mathbf{H}(\gamma_s(j(k)))\mathbf{X}(k), \end{aligned} \quad (2)$$

где $\mathbf{x}(k) \in \mathbb{F}^{N \cdot n}$, $\mathbf{u}(k) \in \mathbb{F}^{N \cdot q}$, $\mathbf{y}(k) \in \mathbb{F}^{N \cdot p}$ – векторы состояния, входа и выхода, $\mathbf{F}(\gamma_s(j(k))) \in \mathbb{F}^{N \cdot n \times N \cdot n}$, $\mathbf{G}(\gamma_s(j(k))) \in \mathbb{F}^{N \cdot n \times N \cdot q}$, $\mathbf{H}(\gamma_s(j(k))) \in \mathbb{F}^{N \cdot p \times N \cdot n}$ – матрицы динамики входа и выхода соответственно, $j(k) = \overline{1, N}$ – счётчик информационных обменов.

Если цепь состоит из l звеньев, то уравнения (2) описывают $l-1$ межзвенных обменов и два обмена со средствами диагностирования: прием теста на вход цепи и выдача реакции модели на тест. Если предположить, что при обмене информацией срабатывает лишь звено принимающее информацию, то в соответствии с выражением (2) получим следующие значения для матриц модели цепи:

- ♦ при приеме информации от средств диагностирования ($j(k)=1$) срабатывает только модель принимающего звена цепи $M_1 : F(1) \neq 0, G(1) \neq 0, H(1) = 0, u(1) = test$;

- ♦ при передаче информации между звеньями цепи M_i и M_{i+1} ($1 < j(k) < l+1$) срабатывает модель звена $M_{i+1} : F(j(k)) \neq 0, G(j(k)) \neq 0, H(j(k)) \neq 0, u_{i+1}(k) = y_i(k)$, при этом на его вход подается информация с выхода предыдущего звена;

- ♦ при выдаче информации в средства диагностирования ($j(k)=l+1$) не срабатывает модель ни одного звена, $M_l : F(l+1) \neq 0, G(l+1) = 0, H(l+1) \neq 0, y(l+1) = reaction$.

Для создания отказоустойчивой системы требуется дополнительно решить еще несколько вопросов. Среди них построение теста с использованием рассмотренной выше модели, а также определение процедур диагностирования отказавшего ПМ и восстановления системы после отказа. Эти вопросы могут быть решены с применением РМС-модели [5, 16] с распределенным принятием решения об отказе, что позволит реализовать децентрализованную отказоустойчивую систему, лишенную «узких» мест [17].

Обсудим реализацию РМС-модели, предварительно определив модель отказа ПМ как утрату функции обработки информации при сохранении функции ее трансляции со входа на выход. Таким образом, процесс диагностирования можно разбить на три этапа: проверка, сбор диагностической информации и принятие решения об отказе. На первом этапе предполагается, что ПМ осуществляют взаимные проверки. Каждая из проверок характеризуется малой длительностью, поскольку нацелена на диагностирование лишь небольшой части объекта диагностирования, опираясь на которую объект может далее построить процесс самодиагностирования. Вторым этапом, очевидно, должен отличаться наибольшей длительностью, поскольку предполагает передачу результатов взаимных проверок и самодиагностирования от каждого ПМ к каждому. Наконец, на третьем этапе в каждом из ПМ происходит анализ результатов диагностирования и принятие решения об отказе.

Проанализируем требования, предъявляемые к коммуникационной системе. Понятно, что с одной стороны число информационных связей между ПМ необходимо сокращать, однако с другой стороны число и геометрия этих связей влияет на эффективность диагностирования. Действительно, применяемая коммуникационная система должна не только допускать организацию в системе принятой архитектуры диагностики, но и не увеличивать чрезмерно её длительность.

Моделирование. С целью получения таких характеристик системы коммуникации было проведено моделирование в среде YACSIM [18]. При этом исследовались коммуникационные системы трех типов – решетка, тор, гиперкуб. Целевой характеристикой моделирования была длительность диагностического эксперимента, включающего взаимные межпроцессные проверки и сбор всех результатов в каждом из ПМ. Моделирование проводилось в предположении, что реализуется эксперимент с проверкой соседних ПМ, причем время проверки одного ПМ другим было принято равным 2,1 усл. ед., а время трансляции диагностической информации со входа ПМ на его выход равным 1,4 усл. ед. На рис. 2 для каждого из трех типов приведены зависимости времени принятия решения об отказе от числа

реализуемых информационных связей. Последовательности расчетных точек на графиках соответствуют последовательности размерностей коммуникационной системы – 2х2, 3х3, 4х4, 5х5.

В ходе диагностического эксперимента получено, что наиболее эффективной коммуникационной системой с точки зрения времени принятия решений является схема типа «тор».

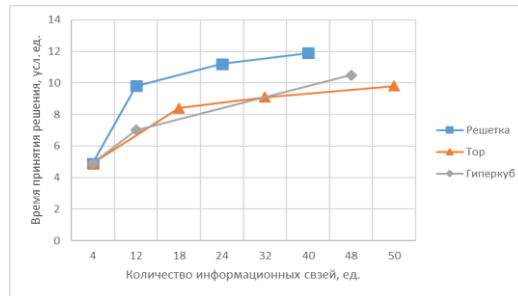


Рис. 2. Результаты моделирования различных систем коммуникации

Энергоэффективность масштабируемых РВС. Коротко опишем предлагаемое решение для обеспечения энергоэффективности бортовой РВС. Предположим, что осуществлено предварительное назначение задач на процессоры, в результате которого каждая задача задания выполняется на отдельном процессоре. В дальнейшем процессор в исходной архитектуре системы будем называть стадией. Предположим, что в системе существуют дополнительные неиспользуемые процессоры. Постановка задачи состоит в определении такой архитектуры A и такого перераспределения вычислительной нагрузки между всеми процессорами, чтобы мощность P , потребляемая системой, была бы минимальной:

$$A^* = \arg \min_A P(A). \quad (3)$$

Обсудим соотношения, описывающие потребляемую системой мощность P , поскольку именно она будет составлять основу критерия оптимизации (3) на этапе назначения задач. Сразу отметим, что случай с минимизацией энергии вместо мощности аналогичен рассматриваемому ниже, поскольку энергия, потребляемая системой, равна произведению мощности на время работы системы. Известно [19, 20], что мощность имеет две составляющие – динамическую P_d и статическую P_s . Выражения, описывающие эти составляющие без излишней для данного изложения детализации, имеют вид:

$$P_d = aNV^2 f, P_s = bN, \quad (4)$$

где a, b – коэффициенты пропорциональности, зависящие от свойств кристалла, N – число процессоров в системе, V – напряжение питания, f – тактовая частота. Поскольку вклад статической мощности в суммарную потребляемую мощность невелик, далее будем учитывать лишь динамическую составляющую. Для ее анализа полезна приближенная формула, определяющая задержку, вносимую схемой при напряжении питания V [21]:

$$D = \frac{c}{V}, \quad (5)$$

где c – коэффициент пропорциональности, зависящий от свойства кристалла.

При снижении частоты тактовых импульсов в обратной пропорции возрастает их период, ограничивающий допустимое время для переходных процессов, возникающих в системе при каждом срабатывании. При исходном значении напряжения питания фактическое время переходных процессов будет мало по отношению к новому увеличенному значению периода, а значит, возникает возможность пропорционально снизить напряжение питания с увеличением задержки в рамках периода тактовых импульсов в соответствии с (5). В результате выполнения этих двух шагов может быть достигнуто существенное снижение потребляемой мощности (4). Описанный факт положен в основу предлагаемого подхода к определению архитектуры системы. Суть подхода состоит в последовательном определении для каждой стадии числа реализующих ее процессоров. При этом предполагается, что все процессоры стадии работают на одной частоте и при одном напряжении питания, а также что для системы известен допустимый исходный вариант значений параметров f_0, V_0 . Безусловно, проектируя систему, разработчик всегда ограничен не только по потребляемой мощности, но по числу запасных процессоров, а также по напряжению питания и частоте.

В общем случае, когда стадий несколько, возникает вопрос о том, как наилучшим образом с точки зрения минимизации потребляемой мощности распорядиться дополнительными процессорами в рамках ограничений. На этот вопрос отвечает приводимый ниже алгоритм определения энергоэффективной архитектуры. Будем называть процессоры исходной архитектуры системы "исходными", процесс добавления в i -ю стадию $n_{d,i}$ дополнительных процессоров – "расщеплением i -го исходного процессора", а образованное в результате этого расщепления множество процессоров – "расщепленным множеством i -го процессора". Кроме того, будем считать расщепленное множество i -го процессора предельным, если исключение из него одного процессора делает его среднюю по множеству потребляемую мощность максимальной среди стадий системы. Интуитивно, по-видимому, ясно, что экономия мощности будет максимальной, если разгружаться будут наиболее загруженные процессоры, а распределение нагрузки между процессорами в расширенном множестве будет осуществляться сбалансированным образом, т.е. равномерно. По этому принципу работает предлагаемый алгоритм. Заметим, что идеальная сбалансированность при распределении нагрузки, когда нагрузка делится на равные части между процессорами стадии, на практике в общем случае невозможна. В связи с этим речь идет лишь о приближенной сбалансированности. Архитектуру системы представим вектором состава $A = (a_1 \ a_2 \ \dots \ a_n)$, где a_i – число процессоров в расщепленном множестве i -го процессора, и вектором средней потребляемой мощности $\bar{P} = (\bar{P}_1 \ \bar{P}_2 \ \dots \ \bar{P}_n)$, где $\bar{P}_i$ – средняя по расщепленному множеству i -го процессора потребляемая мощность. Итак, предлагается следующий простой и оптимальный алгоритм.

Алгоритм 1 (определение энергоэффективной архитектуры).

Шаг 1. Сделать начальные присвоения: $M = n_d$ – допустимое число дополнительных процессоров, $A = (1 \ 1 \ \dots \ 1)$, $\bar{P} = (\bar{P}_1 \ \bar{P}_2 \ \dots \ \bar{P}_n)$.

Шаг 2. Выбрать в $\bar{P} = (\bar{P}_1 \ \bar{P}_2 \ \dots \ \bar{P}_n)$ компоненту с максимальным значением $\bar{P}_{\max}$. Пусть ее номер равен единице. Ввести дополнительный процессор в 1-ю стадию. Произвести между процессорами 1-ой стадии приближенно сбалансированное перераспределение нагрузки. Пересчитать параметры алгоритма: $\bar{P}$, $a_i := a_i + 1$, $M := M - 1$. Если $M \neq 0$, то повторить шаг 2, иначе конец.

Поскольку приведенный алгоритм оперирует не с абсолютными значениями мощностей, а с их соотношением, то с инженерной точки зрения возможен переход к оперированию не потребляемыми в стадиях мощностями, а их вычислительными сложностями.

Поскольку обычно сбалансированное распределение задач невозможно, возможен переход к оперированию вычислительными сложностями решаемых в стадиях задач. Итак, пусть планируется m заданий $\{\tau_j\}_{j=1}^m$, каждое j -е из которых включает n задач $\{\tau_{j,i}\}_{i=1}^n$. Введем понятие вычислительной сложности Ψ_j задания τ_j , под которой будем понимать число составляющих это задание операций. В относительных расчетах, проводимых далее в примере, в качестве оценок можно использовать его исходную длительность (до снижения частоты). Аналогично введем вычислительную сложность $\Psi_{j,i}$, для задачи $\tau_{j,i}$, а также вычислительную сложность Ψ^i для стадии i . При этом

$$\Psi_j = \sum_{i=1}^n \Psi_{j,i}, \quad \Psi^i = \sum_{j=1}^m \Psi_{j,i}.$$

Выбирая в расщепленном множестве каждого i -го исходного процессора процессор с максимальной нагрузкой $\Psi_{\max}^i$, рассчитываем для стадии минимальную тактовую частоту, как пропорциональную вычислительной сложности:

$$f_{\min}^i = f_0 \frac{\Psi_{\max}^i}{\Psi^i}. \quad (6)$$

Далее в той же пропорции снижается напряжение питания: $V_{\min}^i = V_0 \frac{\Psi_{\max}^i}{\Psi^i}$.

Подчеркнем, что выбор варианта размещения задач стадии целесообразно делать в пользу сбалансированного назначения, поскольку в этом случае вычислительная сложность максимального блока будет минимальной, а, значит, и минимальной будет выбираемая тактовая частота стадии (6). Рассмотрим иллюстративный пример.

Пример. Пусть система содержит три процессора, на которых выполняются четыре задания $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$, имеющие длительности стадий, приведенные в табл. 1, которые выражены в условных единицах.

Таблица 1

Длительности стадий для заданий $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$

№	Параметр	$\tau_{j,1}$	$\tau_{j,2}$	$\tau_{j,3}$
1	τ_1	3	2	1
2	τ_2	3	1	1
3	τ_3	3	1	1
4	τ_4	2	1	1
5	τ_{Σ}	11	5	4
6	$\bar{P}$	22	10	8

В 5-ой строке таблицы приведены суммарные длительности для всех задач каждой из стадий. Далее они будут использованы как оценки вычислительной сложности и оценки потребляемой на каждой стадии мощности в условных единицах. В 6-ой строке приведены значения потребляемой в стадиях мощности. Необходимо определить наилучшее расщепление для каждого процессора при условии, что запас свободных процессоров позволяет добавить в систему четыре процессора ($n_d = 4$). Для решения задачи воспользуемся вышеприведенным алгоритмом с анализом длительностей стадий.

Делаем начальные присвоения $M = 4$, $A = (1 \ 1 \ 1)$, $\bar{P} = (22 \ 10 \ 8)$.

Расщепляем процессор первой стадии, вводя два дополнительных процессора. Распределяем нагрузку примерно равномерно между тремя процессорами: $\{5, 3, 3\}$. Вычисляем коэффициент снижения тактовой частоты (напряжения питания)

на основании (6) $k_1 = \frac{\Psi^1}{\Psi_{\max}^1} = \frac{\tau_{\Sigma,1}}{\tau_{3,1} + \tau_{4,1}} = 2,2$. Вычисляем новое значение

удельной мощности, потребляемой процессорами расщепленного множества 1-й

стадии: $\bar{P}_1' = \frac{\bar{P}_1}{k_1^3} = 2,1 < 10$. Вычисляем количество запасных процессоров

$n_d = 2 \neq 0$. Переходим к следующему шагу расщепления.

Расщепляем процессор второй стадии, вводя один дополнительный процессор. Распределяем нагрузку примерно равномерно между двумя процессорами: $\{3, 2\}$. Вычисляем коэффициент снижения тактовой частоты (напряжения питания) на

основании (6) $k_2 = \frac{\Psi^2}{\Psi_{\max}^2} = \frac{\tau_{\Sigma,2}}{\tau_{1,2} + \tau_{2,2}} = 1,7$. Вычисляем новое значение удельной

мощности, потребляемой ядрами расщепленного множества 2-ой стадии:

$\bar{P}_2' = \frac{\bar{P}_2}{k_2^3} = 2 < 8$. Вычисляем количество запасных процессоров $n_d = 1 \neq 0$. Пере-

ходим к следующему шагу расщепления.

Расщепляем процессор третьей стадии, вводя один дополнительный процессор. Распределяем нагрузку равномерно между двумя процессорами: $\{2, 2\}$. Вычисляем коэффициент снижения тактовой частоты (напряжения питания) на осно-

вании (6) $k_3 = \frac{\Psi^3}{\Psi_{\max}^3} = \frac{\tau_{\Sigma,3}}{\tau_{1,3} + \tau_{2,3}} = 2$. Вычисляем новое значение удельной мощно-

сти, потребляемой процессорами расщепленного множества 3-й стадии:

$\bar{P}_3' = \frac{\bar{P}_3}{k_3^3} = 1$. Вычисляем количество запасных процессоров $n_d = 0$. Конец.

Таким образом, результирующая система содержит семь процессоров и характеризуется следующим вектором удельных нагрузок для стадий $\bar{P} = (2,1 \ 2 \ 1)$. Оценим приближенно результирующее снижение потребляемой мощности. В качестве оценки мощности в условных единицах, потребляемой исходной системой, будем использовать, как уже отмечалось $P_0 = \sum_j \bar{P}_{\Sigma,j} = 40$. При

этом для преобразованной системы выражение будет иметь вид

$P = \sum_j \frac{\bar{P}_{\Sigma,j}}{k_j^3} = 12,3$, где $k_j = \frac{\tau_{\Sigma,j}}{\tau_{j,\max}}$ – коэффициент снижения частоты (напряжения

питания), $\bar{P}_{j,\max}$ – наибольшая средняя мощность, потребляемая процессорами расщепленного множества j -ой стадии. В результате снижение мощности выражается величиной $l = \frac{P_0}{P} = 3,3$.

Важно отметить, что рассмотренное предложение по увеличению энергоэффективности РВС сообщает последней дополнительные возможности по отказоустойчивости. Действительно, при отказах процессоров возможно производить их замещение работоспособными с одновременным повышением таковой частоты и напряжения питания.

Заключение. В работе предложен подход к построению масштабируемой отказоустойчивой и энергоэффективной бортовой РВС. Подход включает два этапа, во-первых, решение проблемы отказоустойчивости средствами тестового диагностирования, и, во-вторых, определение для системы энергоэффективной архитектуры за счет введения в состав системы дополнительных процессоров, сопровождающегося снижением тактовой частоты и напряжения питания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ramírez I. S., Bernalte Sánchez P. J., Papaelias M., Márquez F. P. G. Autonomous underwater vehicles and field of view in underwater operations // Journal of Marine Science and Engineering. – 2021. – Vol. 9, No. 3. – P. 277.
2. Yang Y., Xiao Y., Li T. A survey of autonomous underwater vehicle formation: Performance, formation control, and communication capability // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2021. – Vol. 23, No. 2. – P. 815-841.
3. Sahoo A., Dwivedy S.K., Robi P.S. Advancements in the field of autonomous underwater vehicle // Ocean Engineering. – 2019. – Vol. 181. – P. 145-160.
4. Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Щербатюк А.Ф. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение. – Владивосток: Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук, 2018. – 368 с.
5. Колесов Н.В., Толмачева М.В., Юхта П.В. Системы реального времени. Планирование, анализ, диагностирование. – СПб.: ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электрон", 2014. – 185 с.
6. Kshemkalyani A. D., Singhal M. Distributed computing: principles, algorithms, and systems. – Cambridge University Press, 2011. – 731 p.
7. Топорков В.В. Модели распределенных вычислений. – М.: Физматлит, 2011. – 320 с.
8. Воеводин В.В., Воеводин Вл.В. Параллельные вычисления. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – 608 с.
9. Kapitonova Y.V., Kovalenko N.S., Pavlov P.A. Optimality of systems of identically distributed competing processes // Cybernetics and Systems Analysis. – 2005. – Vol. 41, No. 6. – P. 793-799.
10. Павлов П.А. Эффективность распределённых вычислений в масштабируемых системах // Информатика, телекоммуникации и управление. – 2010. – Т. 93, № 1. – С. 83-89.
11. Грузликов А.М., Колесов Н.В. Дискретно-событийная диагностическая модель распределенной вычислительной системы. Независимые цепи // Автоматика и телемеханика. – 2016. – № 10. – С. 140-155.
12. Грузликов А.М., Колесов Н.В., Лукьянов Е.В., Толмачева М.В. Диагностическая модель для распределенной вычислительной системы реального времени // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2020. – № 5. – С. 44-55.
13. Бурдонов И.Б., Косачев А.С., Кулямин В.В. Использование конечных автоматов для тестирования программ // Программирование. – 2000. – Т. 26, № 2. – С. 61-73.
14. Cassandras C.G., Lafortune S. Introduction to discrete event systems. – Boston, MA: Springer US, 2008. – 848 p.
15. Zaytoon J., Lafortune S. Overview of fault diagnosis methods for discrete event systems // Annual Reviews in Control. – 2013. – Vol. 37, No. 2. – P. 308-320.

16. Preparata F. P., Metze G., Chien R. T. On the connection assignment problem of diagnosable systems // IEEE Transactions on Electronic Computers. – 1967. – No. 6. – P. 848-854.
17. Gruzlikov A.M., Kolesov N.V., Kostygov D.V., Tolmacheva M.V. A real-time fault-tolerant and power-efficient multicore system on chip // 2019 IEEE 13th International Symposium on Embedded Multicore/Many-core Systems-on-Chip (MCSoc). – IEEE, 2019. – P. 354-361.
18. Молдованова О.В. Адаптивный алгоритм децентрализованной самодиагностики распределённых вычислительных систем различных топологий // Вестник СибГУТИ. – 2013. – Т. 22, № 2. – С. 22-30.
19. Panda P. R., Shrivastava A., Silpa B.V.N., Gummidipudi K. Power-efficient system design. – Springer Science & Business Media, 2010. – 253 p.
20. Rubavani R., Saranraj S., Saranya S., Ranjani Devi R. Power efficient scheduling for network on chip applications on multicore processor // International Journal of Applied Engineering Research. – 2016. – Vol. 11, No. 7. – P. 4751-4757.
21. Грузликов А.М., Колесов Н.В., Костыгов Д.В., Ошурев В.В. Энергоэффективное планирование в распределённых вычислительных системах реального времени // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2019. – № 3. – С. 66-76.

REFERENCES

1. Ramírez I. S., Bernalte Sánchez P. J., Papaalias M., Márquez F. P. G. Autonomous underwater vehicles and field of view in underwater operations, *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, Vol. 9, No. 3, pp. 277.
2. Yang Y., Xiao Y., Li T. A survey of autonomous underwater vehicle formation: Performance, formation control, and communication capability, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2021, Vol. 23, No. 2, pp. 815-841.
3. Sahoo A., Dwivedy S.K., Robi P.S. Advancements in the field of autonomous underwater vehicle, *Ocean Engineering*, 2019, Vol. 181, pp. 145-160.
4. Inzartsev A.V., Kiselev L.V., Kostenko V.V., Matvienko Yu.V., Pavin A.M., Shcherbatyuk A.F. Podvodnye robototekhnicheskie komplekсы: sistemy, tekhnologii, primeneniye [Underwater robotic complexes: systems, technologies, application]. Vladivostok: Institut problem morskikh tekhnologiy Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossiyskoy akademii nauk, 2018, 368 p.
5. Kolesov N.V., Tolmacheva M.V., Yukhta P.V. Sistemy real'nogo vremeni. Planirovaniye, analiz, diagnostirovaniye [Real-Time Systems: Planning, Analysis, Diagnostics]. St. Petersburg: OAO "Kontsern "TSNII "Elektropribor", 2014, 185 p.
6. Kshemkalyani A. D., Singhal M. Distributed computing: principles, algorithms, and systems. Cambridge University Press, 2011, 731 p.
7. Toporkov V.V. Modeli raspredelennykh vychisleniy [Models of Distributed Computing]. Moscow: Fizmatlit, 2011. – 320 s.
8. Voevodin V.V., Voevodin V.V. Parallel'nye vychisleniya [Parallel computing]. St. Petersburg: BKhV-Peterburg, 2002, 608 p.
9. Kapitonova Y.V., Kovalenko N.S., Pavlov P.A. Optimality of systems of identically distributed competing processes, *Cybernetics and Systems Analysis*, 2005, Vol. 41, No. 6, pp. 793-799.
10. Pavlov P.A. Effektivnost' raspredelennykh vychisleniy v masshtabiruemyykh sistemakh [Efficiency of distributed computing in scalable systems], *Informatika, telekommunikatsii i upravleniye* [Informatics, telecommunications and management], 2010, Vol. 93, No. 1, pp. 83-89.
11. Gruzlikov A.M., Kolesov N.V. Diskretno-sobytiynaya diagnosticheskaya model' raspredelennoy vychislitel'noy sistemy. Nezavisimye tsepi [Discrete-event diagnostic model for a distributed computational system. Independent chains], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control], 2016, No. 10, pp. 140-155.
12. Gruzlikov A.M., Kolesov N.V., Lukyanov E.V., Tolmacheva M.V. Diagnosticheskaya model' dlya raspredelennoy vychislitel'noy sistemy real'nogo vremeni [Diagnostic model for a distributed real-time computing system], *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Theory and control systems], 2020, No. 5, pp. 44-55.
13. Burdonov I.B., Kosachev A.S., Kulyamin V.V. Ispolzovanie konechnykh avtomatov dlya testirovaniya programm [The use of finite automata for program testing], *Programmirovaniye* [Programming], 2000, Vol. 26, No. 2, pp. 61-73.

14. *Cassandras C.G., Lafortune S.* Introduction to discrete event systems. Boston, MA: Springer US, 2008, 848 p.
15. *Zaytoon J., Lafortune S.* Overview of fault diagnosis methods for discrete event systems, *Annual Reviews in Control*, 2013, Vol. 37, No. 2, pp. 308-320.
16. *Preparata F. P., Metze G., Chien R. T.* On the connection assignment problem of diagnosable systems, *IEEE Transactions on Electronic Computers*, 1967, No. 6, pp. 848-854.
17. *Gruzlikov A.M., Kolesov N.V., Kostygov D.V., Tolmacheva M.V.* A real-time fault-tolerant and power-efficient multicore system on chip, *2019 IEEE 13th International Symposium on Embedded Multicore/Many-core Systems-on-Chip (MCSoc)*. IEEE, 2019, pp. 354-361.
18. *Moldovanova O.V.* Adaptivnyy algoritm detsentralizovannoy samodiagnostiki raspredelennykh vychislitel'nykh sistem razlichnykh topologiy [Adaptive algorithm for decentralized self-diagnostics of distributed computing systems of various topologies], *Vestnik SibGUTI* [Vestnik SibGUTI], 2013, Vol. 22, No. 2, pp. 22-30.
19. *Panda P.R., Shrivastava A., Silpa B.V.N., Gummidipudi K.* Power-efficient system design. Springer Science & Business Media, 2010, 253 p.
20. *Rubavani R., Saranraj S., Saranya S., Ranjani Devi R.* Power efficient scheduling for network on chip applications on multicore processor, *International Journal of Applied Engineering Research*, 2016, Vol. 11, No. 7, pp. 4751-4757.
21. *Gruzlikov A.M., Kolesov N.V., Kostygov D.V., Oshuev V.V.* Energoeffektivnoe planirovanie v raspredelennykh vychislitel'nykh sistemakh real'nogo vremeni [Energy-efficient planning in real-time distributed computing systems], *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya* [News of the Russian Academy of Sciences. Theory and control systems], 2019, No. 3, pp. 66-76.

Статью рекомендовала к опубликованию д.т.н. Л.А. Мартынова.

Колесов Николай Викторович – АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»; e-mail: kolesovnv@mail.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 89213886806; д.т.н.; профессор; г.н.с.

Лукоянов Егор Васильевич – e-mail: lukoyanov.egor@mail.ru; тел.: 89522665251; к.т.н.; научный сотрудник.

Тюльников Виктор Сергеевич – e-mail: viktor.tyulnikov@gmail.com; тел.: 89119757141; инженер-программист.

Крючков Роман Леонидович – e-mail: romankr@gmail.com; тел.: 89119580841; инженер-программист.

Kolesov Nikolai Viktorovich – Concern CSRI Elektropribor, JSC; e-mail: kolesovnv@mail.ru; Saint Petersburg, Russia; phone: +79213886806; dr. of eng. sc.; professor; chief researcher.

Lukoyanov Egor Vasilievich – e-mail: lukoyanov.egor@mail.ru; phone: +79522665251; cand. of eng. sc.s; researcher.

Tyulnikov Viktor Sergeevich – e-mail: viktor.tyulnikov@gmail.com; phone: +79119757141; software engineer.

Kryuchkov Roman Leonidovich – e-mail: romankr@gmail.com; phone: +79119580841; software engineer.

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 ссылки 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/>.