



№1-2022

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 (225). 2022 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. (и.о. гл. редактора); Курейчик В.М. (зам. гл. редактора);  
Бородянский И.М. (ученый секретарь); Абрамов С.М.; Агеев О.А.; Бабенко Л.К.;  
Веселов Г.Е.; Гонкальвес Ж.; Каляев И.А.; Колесников А.А.; Коноплев Б.Г.;  
Левин И.И.; Макаревич О.Б.; Маркович И.И.; Микрин Е.А.; Никитов С.А.;  
Обуховец В.А.; Осипов Г.С.; Панатов Г.С.; Панич А.Е.; Петров В.В.; Петровский А.Б.;  
Пшихопов В.Х.; Редько В.Г.; Румянцев К.Е.; Саламах М.; Солдатов А.В.;  
Стемпковский А.Л.; Сухинов А.И.; Сысоев В.В.; Тарасов С.П.; Фрадков А.Л.;  
Хашемипур М.; Чаплыгин Ю.А.; Чердниченко Д.И.; Четверушкин Б.Н.; Чичков Б.Н.

**Учредитель** Южный федеральный университет.

**Издатель** Южный федеральный университет.

**Ответственный за выпуск** Косенко Е.Ю.

**Технический редактор** Ярошевич Н.В.

**Оригинал-макет выполнен** Ярошевич Н.В.

Дата выхода в свет 13.05.2022 г. Формат 70×108  $\frac{1}{16}$ . Бумага офсетная.

Офсетная печать. Усл. печ. л. – 26,1. Уч.-изд. л. – 21,7.

Заказ № 8508. Тираж 250 экз.

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

**Адрес типографии:** Отпечатано в отделе полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции Издательско-полиграфического комплекса КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ. 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, тел (863) 247-80-51.

**Адрес 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, 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

### РАЗДЕЛ I. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

<b>И.И. Маркович, А.И. Паньчев, Е.Е. Завтур</b> ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В ПАССИВНОЙ МНОГОПОЗИЦИОННОЙ РЛС, СОЗДАННОЙ НА БАЗЕ ГРУППИРОВКИ БЛА.....	6
<b>Н.А. Соколов, Д.А. Рябухин</b> К ПРОБЛЕМЕ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТАМ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННЫХ РЕСУРСОВ. ОПЫТ КАРАБАХА.....	17
<b>Н.А. Соколов, А.В. Рычков</b> МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИЕ СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ МОРСКИХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ.....	29
<b>С.М. Соколов</b> ОНТОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД В СОЗДАНИИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ С ПОВЫШЕННОЙ СТЕПЕНЬЮ АВТОНОМНОСТИ .....	42
<b>А.И. Наговицин, Б.Б. Молоткова, Д.У. Азимов</b> АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ЗА НАЗНАЧЕНИЕМ РАДИОЧАСТОТ НА ОСНОВЕ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ РАДИОСВЯЗИ В ПОДРАЗДЕЛЕНИЯХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ.....	59
<b>П.А. Гессен, А.И. Лизин, В.А. Павлова, В.А. Тупиков</b> МОДУЛЬ КОРРЕКТИРОВКИ ПАРАМЕТРОВ АЛГОРИТМОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ И СОПРОВОЖДЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ .....	71
<b>З.В. Нагоев, В.М. Шуганов, А.У. Замоев, К.Ч. Бжихатлов, З.З. Иванов</b> РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ «УМНОЕ ПОЛЕ» .....	81
<b>И.А. Пшенокова, К.Ч. Бжихатлов, А.А. Унагасов, М.А. Абазоков</b> МУЛЬТИАГЕНТНЫЙ АЛГОРИТМ СБОРА ДАННЫХ С МЕТЕОСТАНЦИИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УРОЖАЙНОСТИ И СОСТОЯНИЯ ПОСЕВОВ .....	91
<b>И.С. Тренёв</b> СТАБИЛИЗАЦИЯ ДВИЖЕНИЯ КВАДРОКОПТЕРА ВДОЛЬ ЗАДАННОЙ ТРАЕКТОРИИ С ПОМОЩЬЮ СУБОПТИМАЛЬНОГО ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ С $H_2/H_\infty$ -КРИТЕРИЕМ .....	101

### РАЗДЕЛ II. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

<b>А.И. Савельев, В.В. Лебедева, И.В. Лебедев, К.В. Камынин,</b> <b>Л.Д. Кузнецов, А.Л. Ронжин</b> УПРАВЛЕНИЕ ГРУППОЙ БПЛА ПРИ ОТРАБОТКЕ КРИЗИСНЫХ ПОЛЕТНЫХ СИТУАЦИЙ В РЕШЕНИИ ТРАНСПОРТНЫХ ЗАДАЧ.....	110
<b>В.Х. Пшихопов, М.Ю. Медведев</b> СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО И ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО АЛГОРИТМОВ ДВИЖЕНИЯ СТРОЕМ БЛА МУЛЬТИКОПТЕРНОГО ТИПА.....	121
<b>А.А. Медельцев, П.А. Шаповалов, М.В. Воронов, А.И. Полухина,</b> <b>П.Н. Сигалева, А.В. Фролов</b> МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА ВНУТРИ ГЕРМЕТИЧНОГО КОРПУСА БИНС В МУЛЬТИФИЗИЧНОЙ ПОСТАНОВКЕ В ANSYS CFX И SYSTEM COUPLING.....	140
<b>Д.И. Малышев, Л.А. Рыбак, А.С. Писаренко, В.В. Черкасов</b> АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СИНГУЛЯРНОСТЕЙ НА РЕШЕНИЕ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ КИНЕМАТИКИ И ГЕОМЕТРИЮ РАБОЧЕГО ПРОСТРАНСТВА ПЛАТФОРМЫ ГОФА-СТЮАРТА .....	152

<b>А.В. Логунов, А.Л. Береснев</b> ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО ПОДХОДА ДЛЯ ДИАГНОСТИКА ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ .....	162
<b>А.А. Ткаченко, Д.Д. Девяткин</b> ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОНОМНОСТИ ДЛЯ МОБИЛЬНОГО ДВУХКОЛЕСНОГО РОБОТА .....	172

### РАЗДЕЛ III. СИСТЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ, ПРИВОДНАЯ И ДАТЧИКОВАЯ АППАРАТУРА

<b>А.Ю. Баранник, Е.А. Дудоров, А.В. Лагутина</b> ОБОСНОВАНИЕ КОМПЛЕКТА СПЕЦИАЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ ВЕДЕНИЯ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ РАБОТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ АВТОНОМНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ ПЛАТФОРМ .....	183
<b>А.А. Кабанов, А.В. Зуев, А.Н. Жирабок, В.Ф. Филаретов, В.А. Крамарь</b> ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДЕФЕКТОВ В ПРИВОДАХ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ .....	192
<b>Р.А. Жигалов, С.А. Матюнин, А.А. Иголкин</b> БЕСКОНТАКТНЫЙ ФЕРРОЗОНДОВЫЙ ДАТЧИК ПОЛОЖЕНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ КЛАПАНА .....	204

### РАЗДЕЛ IV. СВЯЗЬ, НАВИГАЦИЯ И НАВЕДЕНИЕ

<b>И.А. Шипов</b> РЕАЛИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ НА ОТЕЧЕСТВЕННЫХ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ УСТРОЙСТВАХ.....	218
<b>А.А. Черкасова, А.Ю. Шатилов, Т.А. Мухамедзянов</b> ПОДДЕРЖКА ПЕТЕЛЬ СЛЕЖЕНИЯ ЗА ФАЗОЙ В ПРИЕМНИКЕ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ С ПОМОЩЬЮ ИЗМЕРЕНИЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ.....	226

### РАЗДЕЛ V. ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗРЕНИЕ

<b>Н.А. Бочаров, А.В. Глухов, Н.Б. Парамонов</b> ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МОДУЛИ COM-EXPRESS НА БАЗЕ МИКРОПРОЦЕССОРОВ ЭЛЬБРУС ДЛЯ БОРТОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ.....	238
<b>А.Ю. Гагарина, П.А. Гессен, А.И. Лизин, В.А. Павлова, М.В. Созинова, В.А. Тупиков</b> КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ И СОПРОВОЖДЕНИЯ С ОБУЧЕНИЕМ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ .....	247
<b>Р.А. Горбачев, М.Н. Зарипов, Д.Л. Шишков</b> ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ПРЕПЯТСТВИЙ И ПРЕДСКАЗАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПУТЯХ.....	256
<b>В.П. Носков, А.Н. Курьянов</b> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЛЕКСИРОВАННЫХ ДЕСКРИПТОРОВ В РЕШЕНИИ SLAM-ЗАДАЧИ .....	268
<b>К.А. Суминов, Н.А. Бочаров</b> ИССЛЕДОВАНИЕ ОГРАНИЧЕНИЙ ПРИМЕНИМОСТИ МИКРОПРОЦЕССОРОВ РЯДА ЭЛЬБРУС ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ.....	279
<b>А.Е. Щелкунов, В.В. Ковалев, И.В. Сидько, Н.Е. Сергеев</b> УСКОРЕНИЕ ПРЯМОГО ПРОХОДА ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ СНС НА ОГРАНИЧЕННОМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОМ РЕСУРСЕ.....	289

## CONTENT

### SECTION I. PROSPECTS FOR THE USE OF ROBOTIC SYSTEMS

<b>I.I. Markovich, A.I. Panychev, E.E. Zavtur</b> DIGITAL SIGNAL PROCESSING IN A PASSIVE MULTI-POSITION RADAR, CREATED ON THE BASIS OF THE UAV GROUPING .....	6
<b>N.A. Sokolov, D.A. Ryabukhin</b> TO THE PROBLEM OF COUNTERING UNMANNED AERIAL VEHICLES IN CONDITIONS OF LIMITED RESOURCES. THE KARABAKH EXPERIENCE...	17
<b>N.A. Sokolov, A.V. Rychkov</b> MAGNETOMETRIC SENSOR SYSTEMS FOR MARINE MOBILE ROBOTS .....	30
<b>S.M. Sokolov</b> AN ONTOLOGICAL APPROACH TO THE CREATION OF ROBOTIC COMPLEXES WITH AN INCREASED DEGREE OF AUTONOMY .....	43
<b>A.I. Nagovitsyn, B.B. Molotkova, D.U. Azimov</b> 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 .....	60
<b>P.A. Gessen, A.I. Lizin, V.A. Pavlova, V.A. Tupikov</b> MODULE FOR ADJUSTING PARAMETERS OF ALGORITHMS FOR AUTOMATIC DETECTION AND TRACKING OF OBJECTS FOR OPTOELECTRONIC SYSTEMS.....	71
<b>Z.V. Nagoev, V.M. Shuganov, A.U. Zammoev, K.Ch. Bzhikhatlov, Z.Z. Ivanov</b> DEVELOPMENT OF INTELLIGENT INTEGRATED SYSTEM FOR "SMART" AGRICULTURAL PRODUCTION .....	82
<b>I.A. Pshenokova, K.Ch. Bzhikhatlov, A.A. Unagasov, M.A. Abazokov</b> MULTI-AGENT ALGORITHM FOR COLLECTING DATA FROM WEATHER STATION FOR FORECASTING PRODUCTIVITY AND CROPS CONDITION .....	92
<b>I.S. Trenev</b> MOVEMENT STABILIZATION OF THE QUADCOPTER ALONG A GIVEN TRAJECTORY USING A SUBOPTIMAL CONTROL LAW WITH $H_2/H_\infty$ -CRITERION .....	102

### SECTION II. CONTROL AND SIMULATION SYSTEMS

<b>A.I. Savelyev, V.V. Lebedeva, I.V. Lebedev, K.V. Kamynin, L.D. Kuznetsov, A.L. Ronzhin</b> UAV GROUP MANAGEMENT WHEN WORKING OUT OF CRISIS FLIGHT SITUATIONS IN SOLVING TRANSPORT PROBLEMS .....	110
<b>V.Kh. Pshikhopov, M.Yu. Medvedev</b> COMPARATIVE ANALYSIS OF CENTRALIZED AND DECENTRALIZED ALGORITHMS FOR THE MOVEMENT OF MULTICOPTER-TYPE UAVS.....	121
<b>A.A. Medel'tsev, P.A. Shapovalov, M.V. Voronov, A.I. Polukhina, P.N. Sigaleva, A.V. Frolov</b> MULTIPHYSICS SIMULATION IN ANSYS CFX AND SYSTEM COUPLING OF HEAT TRANSFER INSIDE HERMRTIC CASE OF STRAPDOWN INERTIAL NAVIGATION SYSTEM.....	140
<b>D.I. Malyshev, L.A. Rybak, A.S. Pisarenko, V.V. Cherkasov</b> ANALYSIS OF THE SINGULARITIES INFLUENCE ON THE FORWARD KINEMATICS SOLUTION AND THE GEOMETRY OF THE WORKSPACE OF THE GOUGH-STEWART PLATFORM .....	153
<b>A.V. Logunov, A.L. Beresnev</b> APPLICATION OF THE NEURAL NETWORK APPROACH TO DIAGNOSE THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE OF VEHICLES .....	163
<b>A.A. Tkachenko, D.D. Devyatkin</b> CONTROL SYSTEM DESIGN AND AUTONOMY FOR TWO-WHEELED MOBILE ROBOT .....	173

### SECTION III. ENERGY SYSTEMS, DRIVE AND SENSOR EQUIPMENT

<b>A.Yu. Barannik, E.A. Dudorov, A.V. Lagutina</b> JUSTIFICATION OF THE SET OF SPECIAL EQUIPMENT INTENDED FOR RESCUE OPERATIONS USING MULTIFUNCTIONAL AUTONOMOUS ROBOT PLATFORM .....	183
<b>A.A. Kabanov, A.V. Zuev, A.N. Zhirabok, V.F. Filaretov, V.A. Kramar</b> IDENTIFICATION OF FAULTS IN DRIVES BASED ON OPTIMAL CONTROL METHODS .....	193
<b>R.A. Zhigalov, S.A. Matyunin, A.A. Igolkin</b> NON-CONTACT FLUXGATE POSITION SENSOR FOR MONITORING THE STATE OF THE VALVE .....	205

### SECTION IV. COMMUNICATION, NAVIGATION AND GUIDANCE

<b>I.A. Shipov</b> THE METHOD OF SOLVING THE PROBLEM OF THE DISTRIBUTION OF GOALS IN THE GROUP OF UAVS BY NETWORK-CENTRIC CONTROL SYSTEM.....	218
<b>A.A. Cherkasova, A.Yu. Shatilov, T.A. Muhamedzyanov</b> PHASE TRACKING LOOPS SUPPORTING IN THE SATELLITE NAVIGATION RECEIVER USING INERTIAL NAVIGATION SYSTEM MEASUREMENTS .....	226

### SECTION V. TECHNICAL VISION

<b>N.A. Bocharov, A.V. Gluhov, N.B. Paramonov</b> COM-EXPRESS MODULES BASED ON ELBRUS MICROPROCESSORS FOR ONBOARD COMPUTING SYSTEMS .....	238
<b>A.Yu. Gagarina, P.A. Gessen, A.I. Lysine, V.A. Pavlova, M.V. Sozinova, V.A. Tupikov</b> CORRELATIONAL SUPPORT ALGORITHM WITH REAL-TIME LEARNING .....	248
<b>R.A. Gorbachev, M.N. Zaripov, D.L. Shishkov</b> AN INTELLIGENT SYSTEM OF TECHNICAL VISION FOR DETECTING OBSTACLES AND PREDICTING THE BEHAVIOR OF MOVING OBJECTS ON RAILWAY TRACKS .....	256
<b>V.P. Noskov, A.N. Kuryanov</b> THE APPLICATION OF COMPLEX DESCRIPTORS IN SOLVING A SLAM TASK .....	269
<b>K.A. Suminov, N.A. Bocharov</b> RESEARCH OF APPLICABILITY LIMITATIONS FOR ELBRUS MICROPROCESSORS FOR SOLVING TASKS OF TECHNICAL VISION .....	279
<b>A.E. Shchelkunov, V.V. Kovalev, I.V. Sidko, N.E. Sergeev</b> ACCELERATION OF THE DIRECT PASSAGE IN THE IMPLEMENTATION OF CNN ON A LIMITED COMPUTING RESOURCE .....	289

## Раздел I. Перспективы применения робототехнических комплексов

УДК 621.396.969.1

DOI 10.18522/2311-3103-2022-1-6-17

**И.И. Маркович, А.И. Паньчев, Е.Е. Завтур**

### **ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В ПАССИВНОЙ МНОГОПОЗИЦИОННОЙ РЛС, СОЗДАННОЙ НА БАЗЕ ГРУППИРОВКИ БЛА**

*Обоснована целесообразность создания пассивной многопозиционной РЛС на базе группировки беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Предложен вариант построения РЛС, оценены основные технические проблемы разработки такой РЛС и рассмотрены возможные пути их преодоления. Показано, что для обнаружения воздушных целей и определения их координат по радиоизлучению бортового оборудования наиболее перспективным является разностно-дальномерный метод, как не зависящий от модуляции сигналов и потенциально устойчивый к помехам. Для малоразмерных БЛА для передачи информации по открытым радиоканалам тиличными частотными диапазонами являются 2,4 и 5,0 ГГц. Разработана структурная схема пассивной многопозиционной РЛС, включающая цифровые формирователи квадратурных составляющих принятого сигнала, блоки обнаружения и определения координат цели. Рассчитаны основные параметры и приведены аналитические выражения алгоритмов цифровой обработки сигналов для обнаружения и определения координат цели. В цифровом формирователе квадратурных составляющих использован стробоскопический эффект, позволяющий для полосовых сигналов выбирать частоту дискретизации не по верхней граничной частоте спектра, а по его ширине, что позволяет существенно снизить требования к быстродействию АЦП и следующих за ним устройств ЦОС. Комплексные огибающие обнаруженных сигналов формируются цифровым методом во временной области с использованием цифровых фильтров нижней частоты. Обнаружение сигналов производится энергетическим обнаружителем, достоинствами которого являются простота реализации и работоспособность при отсутствии априорной информации о принимаемом сигнале. Для определения координат источника радиоизлучения вычисляются задержки сигналов между парами сигналов, принятых тремя БЛА из состава многопозиционной РЛС, которые определяются максимальными по модулю значениями взаимных корреляционных функций сигналов в этих парах. Показано, что предложенные алгоритмы хорошо адаптированы к обработке возможных источников радиоизлучения на борту малоразмерных БЛА. Установлено, что требуемая производительность вычислителя РЛС для работы в реальном масштабе времени не превышает 84,62 GFLOPS. Предложена конструкция бортового антенного модуля пассивной многопозиционной РЛС в виде микрополосковой реконфигурируемой антенны, перестраиваемой по частоте и поляризации.*

*Пассивная радиолокация; определение координат; источник радиоизлучения; разностно-дальномерный метод; цифровая обработка сигналов; беспилотный летательный аппарат.*

**I.I. Markovich, A.I. Panychev, E.E. Zavtur**

### **DIGITAL SIGNAL PROCESSING IN A PASSIVE MULTI-POSITION RADAR, CREATED ON THE BASIS OF THE UAV GROUPING**

*The expediency of creating a passive multi-position radar based on a grouping of unmanned aerial vehicles is substantiated. The variant of building of such radar is proposed, the main technical problems of the sonar developing are evaluated and possible ways to overcome them are*

*considered. It is shown that for detecting aerial targets and determining their coordinates from the radio emission of on-board equipment, the difference-rangefinder method is the most promising as it does not depend on signal modulation and is potentially resistant to interference. For small-sized UAV for transmitting information over open radio channels, the typical frequency ranges are 2.4 and 5.0 GHz. A block diagram of a passive multi-position radar has been developed, including digital shapers of the quadrature components of the received signal, blocks for detecting and determining the coordinates of the target. The main parameters are calculated and analytical expressions of digital signal processing algorithms for detecting and determining the coordinates of the target are given. A stroboscopic effect is used in the digital quadrature component shaper, which allows for bandpass signals to select the sampling frequency not by the upper boundary frequency of the spectrum, but by its width, which significantly reduces the requirements for the performance of the ADC and the DSP devices following it. The complex envelopes of the detected signals are generated by the method of digital generation in the time domain using digital low-frequency filters. The detection of signals is performed by an energy detector, the advantages of which are simplicity of implementation and operability in the absence of a priori information about the received signal. To determine the coordinates of the radio source, signal delays are calculated between pairs of signals received by three UAV from a multi-position radar, which are determined by the maximum modulo values of the mutual correlation functions of the signals in these pairs. It is shown that the proposed algorithms are well adapted to the processing of possible sources of radio emission on board small-sized UAV. It is established that the required performance of the radar computer for real-time operation does not exceed 84.62 GFLOPS. The design of an on-board antenna module of a passive multi-position radar in the form of a microstrip re-configurable antenna, tunable in frequency and polarization, is proposed.*

*Passive radar; determination of coordinates; source of radio emission; difference-rangefinder method; digital signal processing; unmanned aerial vehicle.*

**Введение.** Системы пассивной радиолокации выполняют обнаружение, определение координат и идентификацию объектов на основе приёма их собственного излучения или отражённых от них сторонних радиоволн без использования зондирующего сигнала. Это повышает скрытность работы пассивных локационных станций, существенно затрудняет их обнаружение и создание им помех. К достоинствам средств пассивной радиолокации относятся: возможность обнаруживать малозаметные цели; малые энергопотребление и габариты; относительная простота аппаратуры по сравнению с активными РЛС [1, 2].

В пассивной радиолокации широкое распространение получили методы локации, основанные на явлениях прямолинейного распространения электромагнитных волн в пространстве и постоянства их скорости.

Триангуляционный метод (ТМ) использует антенную базу из двух разнесенных антенн. Он позволяет вычислить дальность и координаты источника радиоизлучения (ИРИ) по задержке принятого сигнала в одной антенне относительно другой и по пеленгу на ИРИ, полученному любой антенной. Точность ТМ существенно зависит от точности определения направления на ИРИ и требует применения направленных антенн. Этот метод способен обеспечить высокую точность и разрешение только при наличии высокочувствительного приёмника и антенны с узкой диаграммой направленности, сканирующей в заданном секторе пространства [3].

Разностно-дальномерный метод (РДМ) основан на разнесенном приёме сигналов ИРИ всенаправленными антеннами, расположенными в нескольких точках, и измерении разностей времен прихода сигналов относительно некоторой опорной точки или относительно друг друга, что позволяет определить дальность до цели и ее координаты. РДМ позволяет работать как по импульсным, так и по непрерывным сигналам, в том числе по шумовым и шумоподобным. В этом случае для измерения задержек используются взаимные корреляционные функции (ВКФ) излучения. РДМ эффективен в случаях, когда для вычисления разности хода радиоволн применяется базово-корреляционная обработка, при которой вид принимаемых сигналов не имеет значения [4, 5].

Радиально-базовый метод (РБМ) относится к амплитудным и основан на измерении напряжённости поля радиоизлучения либо мощности сигнала приёмными устройствами. Используется как минимум две антенные системы, расположенные на известном базовом расстоянии друг от друга и направленные на ИРИ. Данный метод предпочтительно использовать для работы в дальней зоне. Точность РБМ зависит от характеристик измерителей амплитуды и мощности радиоволны, что предъявляет существенные требования к идентичности параметров антенн и приёмных трактов всех каналов РЛС [6–8].

**Целесообразность создания пассивной многопозиционной РЛС на базе группировки беспилотных летательных аппаратов (БЛА).** Проблема разработки многофункциональных малогабаритных бортовых РЛС для БЛА достаточно активно обсуждается в научной и технической литературе [9–16]. Однако в открытой печати отсутствуют сведения об успешных попытках создания многопозиционных РЛС на базе БЛА. Вместе с этим можно отметить следующие предпосылки для успешного решения такой задачи.

1. Естественная многопозиционность РЛС, базирующейся на группировке БЛА.
2. Применение ненаправленной (или слабонаправленной) антенной системы в РЛС БЛА. При этом простая конструкция микрополосковой антенны способна обеспечить антенные характеристики, требуемые для пассивной бортовой РЛС.
3. Применение потенциально устойчивого к помехам РДМ, который является базово-корреляционным методом обнаружения и не зависит от модуляции принимаемых сигналов, позволяет обнаруживать воздушные цели по применяемым в их бортовой радиоэлектронной аппаратуре непрерывным и квазинепрерывным сигналам.
4. Не требуется синхронизации при излучении необходимой в активной локации.
5. Алгоритмы цифровой обработки сигналов (ЦОС) на каждом БЛА не требуют высокой производительности. Достаточно накапливать отсчеты в реальном масштабе времени и передавать их с задержкой для обработки на командный пункт (КП).
6. Возможность (по команде с КП) перестройки БЛА на любое необходимое направление.
7. Повышение дальности обнаружения и определения координат ИРИ при патрулировании воздушного пространства, благодаря высокому расположению антенной системы на бортах группировки БЛА.
8. Возможность достижения высокой точности оценки координат ИРИ (по сравнению с угломерным методом) даже при неколлинеарном, но известном, расположении антенн.

Однако в процессе создания многопозиционной пассивной РЛС на базе группировки БЛА необходимо учесть следующие технические проблемы, стоящие перед разработчиками.

1. Многочастотность излучения ИРИ обуславливает использование широкополосной антенной системы или перестройку по частоте приемника РЛС.
2. Необходимость высокоточного позиционирования БЛА. Данная проблема может быть решена применением самоорганизующихся групп БЛА.
3. Требование строгой временной синхронизации принятых отсчетов приемниками РЛС каждого БЛА. Способом решения этой задачи является использование сигналов точного времени спутниковой навигационной системы.
4. Работа РЛС в условиях наличия большого числа мешающих сигналов в контролируемой полосе, например, промышленных ИРИ. Для преодоления данной проблемы требуется совершенствование РДМ локации.

**Источники радиоизлучения на борту малоразмерных БЛА.** Расположенными на борту малоразмерных БЛА источниками радиоизлучения, по сигналам которых возможно их обнаружения средствами пассивных РЛС, являются не менее двух систем связи, использующих открытые радиоканалы для передачи информации [9–11].

Во-первых, это система низкоскоростной дуплексной или полудуплексной связи для передачи командно-телеметрических помехозащищенных сигналов навигации и управления полетом между БЛА и наземным командным пунктом. Типичные параметры таких систем следующие: мощность излучаемого сигнала в канале не более 100 мВт; типичные частотные диапазоны 2,4 и 5,0 ГГц; использование псевдослучайной перестройки радиочастоты (ПСПРЧ) со скоростью от 350 до 2900 циклов в секунду; виды модуляции – частотная модуляция, фазовая модуляция, мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM); длительность импульса 0,5...2,5 мкс; полоса пропускания одиночного сигнала 0,3...2 МГц; полоса пропускания сигналов сетки ПСПРЧ до 80 МГц; количество каналов сетки ПСПРЧ до 40.

Во-вторых, это система односторонней высокоскоростной передачи данных полезной нагрузки с борта БЛА на КП, работающая, как правило, в диапазоне частот 2,4 ГГц.

**Структурная схема алгоритмов ЦОС пассивной многопозиционной РЛС.** Для решения радиолокационной задачи разностно-дальномерным методом необходимо совместное использование трех бортовых РЛС, разнесённых на заданное расстояние. Бортовые РЛС транслируют принятые сигналы ИРИ после предварительной обработки (формирования квадратурных составляющих) по служебным каналам, а их заключительная обработка производится наземной частью оборудования многопозиционной РЛС.

На рис. 1 приведена предлагаемая структурная схема алгоритмов ЦОС многопозиционной пассивной РДМ РЛС, включающая следующие блоки:

- ♦ три цифровых формирователя квадратурных составляющих (ЦФКС), содержащие аналого-цифровой преобразователь (АЦП), умножитель на комплексную экспоненту ( $Y$ ), запоминающее устройство (ЗУ), два цифровых фильтра нижних частот (ЦФНЧ) и два дециматора отсчетов сигнала (Д) [17];

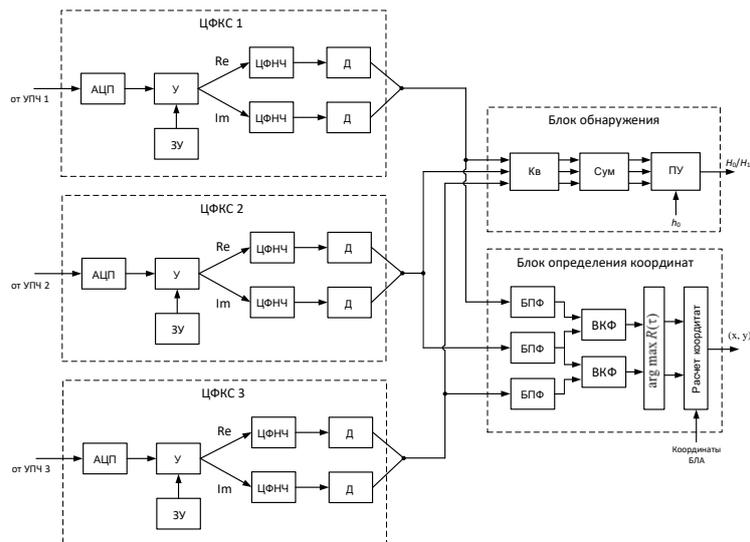


Рис. 1. Структурная схема алгоритмов ЦОС пассивной многопозиционной РЛС

♦ блок обнаружения, состоящий из квадратора (Кв), сумматора (Сум) и порогового устройства (ПУ);

♦ блок определения координат, содержащий блоки быстрого преобразования Фурье (БПФ), вычисления взаимокорреляционной функции (ВКФ), нахождения аргумента максимального значения ВКФ ( $\arg \max R(\tau)$ ) и расчета координат по формулам РДМ.

Известно несколько методов ЦФКС, в которых при дискретизации сигналов используется стробоскопический эффект. Все они основаны на том, что для полосовых сигналов частоту дискретизации  $F_d$  можно выбирать не по верхней граничной частоте спектра  $f_b$ , а по ширине полосы исследуемых частот  $\Delta f = f_b - f_n$  ( $f_n$  – нижняя граничная частота спектра сигнала). Это позволяет существенно снизить требования к быстродействию АЦП и следующих за ним устройств ЦОС. Эффективность использования стробоскопического эффекта при дискретизации полосовых сигналов показана в работах [17, 18].

При ЦФКС наибольшее распространение получил симметричный разнос граничных частот, при котором в результате дискретизации центральная частота спектра сигнала попадает точно на  $F_d/4$  или на  $3F_d/4$ . Обычно ЦФКС узкополосных сигналов осуществляется после их фильтрации в усилителе промежуточной частоты (УПЧ). Для получения комплексных огибающих (КО) принятых сигналов применим метод ЦФКС во временной области с использованием ЦФНЧ [18].

В качестве принятого от БЛА сигнала будем рассматривать сигнал канала управления и передачи данных, использующий технологию Wi-Fi. В диапазоне 2,4 ГГц стандартами IEEE 802.11 определено 14 каналов. Каждый канал занимает полосу частот 20 МГц.

Частота дискретизации КО на выходе ЦФКС должна удовлетворять теореме Котельникова для комплексных сигналов:

$$F_{d1} \geq \Delta f_c = 20 \text{ МГц.}$$

ЦФКС состоит из АЦП, умножителя на комплексную экспоненту  $\exp(j\pi n/2)$ , обеспечивающего сдвиг спектра сигналов вправо относительно нулевой частоты, и двух ЦФНЧ (в реальном и мнимом каналах) с децимацией выходных отсчетов в  $k_d = 4$  раза.

Преобразование спектров сигналов при формировании квадратурных составляющих представлено на рис. 2.

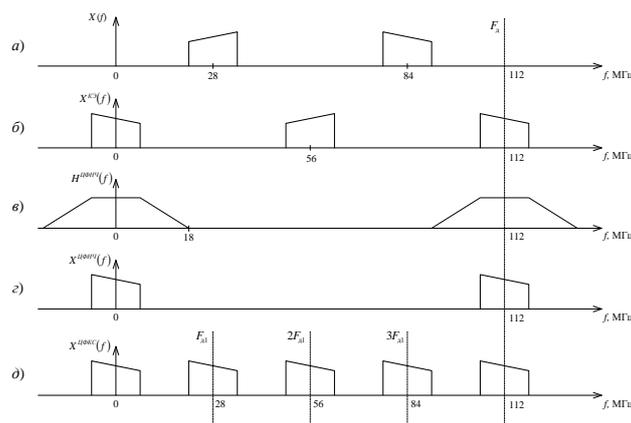


Рис. 2. Спектры сигналов при формировании квадратурных составляющих: а – спектр исходного сигнала; б – спектр умноженного сигнала; в – АЧХ ЦФНЧ; г – спектр КО сигнала; д – спектр КО сигнала после децимации

Алгоритм ЦФКС работает следующим образом. На вход АЦП каждого из трех приемников поступает непрерывный сигнал  $x_m(t)$  с выхода соответствующего УПЧ, где  $m = 1, 2, 3$  – порядковый номер приемника. Несущая частота непрерывного сигнала  $f_0 = f_{ПЧ} = 84$  МГц, полоса сигнала  $\Delta f = 20$  МГц. АЦП осуществляет дискретизацию сигнала  $x_m(t)$  с частотой  $F_d = 112$  МГц, квантование и представление отсчетов в двоичном коде. Спектр оцифрованного сигнала схематично показан на рис. 2,а).

Далее выполняется умножение сигнала  $x_m(nT)$  на комплексную экспоненту:

$$x_m^e(nT) = x_m(nT)e^{j\frac{\pi}{2}n}, n = 0, 1, \dots, N-1,$$

где  $N$  – количество отсчетов принятого за период накопления сигнала.

Данная операция выполняет сдвиг спектра сигнала на 28 МГц вправо относительно начала частот. В результате прямой спектр находится на нулевой частоте, зеркальный – на частоте 56 МГц (рис. 2,б).

На следующем этапе формирования КО требуется выделить спектр сигнала  $x_m^e(nT)$  в области нулевой частоты и подавить высокочастотные составляющие спектра на частоте 56 МГц, что обеспечивается с помощью ЦФНЧ в каждом из квадратурных каналов. В результате формируется КО сигнала  $x_m^{ко}(nT)$  со спектром на нулевой частоте, как показано на рис. 2,г). Поскольку ширина спектра полученной КО сигнала значительно меньше частоты дискретизации, то выполняется децимация сигнала в 4 раза. Спектр прореженного сигнала показан на рис. 2,д).

Зададим требования к ЦФНЧ, положив допустимую неравномерность АЧХ в полосе пропускания  $\delta_{П} = 0,2$  дБ и минимальное подавление в полосе задерживания  $\delta_3 = 60$  дБ:

- 1) частота гарантированного пропускания  $f_{П}$  по уровню  $\delta_{П}$  должна быть не менее  $\Delta f/2 = 10$  МГц (для предотвращения подавления полезного сигнала);
- 2) частота гарантированного задерживания  $f_{З}$  по уровню  $\delta_3$  должна быть не более  $F_d - \Delta f/2 = 18$  МГц (для предотвращения наложения спектров сигнала);
- 3) переходная полоса максимально широкая  $f_{ТЗ} = 18$  МГц (для обеспечения минимального порядка ЦФНЧ).

Коэффициенты фильтра были определены по минимаксному критерию с использованием метода замены Ремеза. В результате был синтезирован фильтр с импульсной характеристикой (ИХ) длиной  $N_{\phi} = 39$ , АЧХ которого приведена на рис. 3.

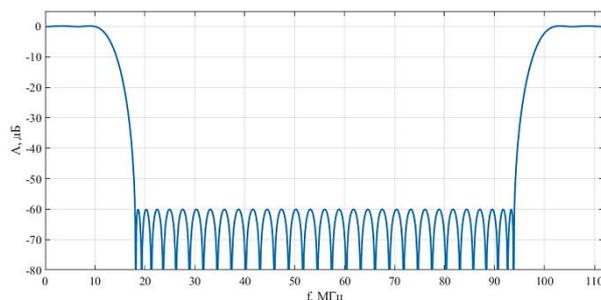


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика ЦФНЧ

После каждого ЦФНЧ производится децимация сигналов – снижение частоты дискретизации в 4 раза до  $F_{д1} = 28$  МГц:

$$x_m^{ко}(nT_1) = x_m^{ко}(nk_d T), n = 0, 1, \dots, N_1 - 1,$$

где  $N_1$  – количество отсчетов КО сигнала за период накопления.

В результате на выходе ЦФКС получаются отсчеты квадратурных составляющих КО сигнала  $x_m^{\text{КО}}(nT_1)$  с уменьшенной частотой дискретизации, близкой к ширине спектра сигнала.

Решение задачи обнаружения сигналов ИРИ осуществляется следующим образом. Сигнал на входе пассивной РЛС представляет собой широкополосный случайный процесс. Методы обнаружения таких сигналов и их схемная реализация во многом зависят от степени априорной неопределенности. Например, если неизвестны все параметры сигнала, то приемник должен производить поиск и обнаружение сигнала в широком диапазоне частот. В этом случае приемник представляет собой энергетический обнаружитель.

Классический энергетический обнаружитель является некогерентным устройством обнаружения, которое измеряет энергию принятого сигнала за определенное время наблюдения, сравнивает уровень этой энергии с заданной пороговой величиной и принимает решение о наличии или отсутствии неизвестного сигнала. Достоинствами энергетического обнаружителя являются простота реализации и работоспособность при отсутствии априорной информации об обнаруживаемом сигнале.

Для полученных на выходе ЦФКС КО сигналов с трех приемников  $x_m^{\text{КО}}(nT_1)$  в квадраторе выполняется вычисление модуля и возведение отсчетов во вторую степень:

$$y_m(nT_1) = |x_m^{\text{КО}}(nT_1)|^2.$$

Затем производится суммирование полученных отсчетов:

$$U_m = \sum_{n=0}^{N_1-1} y_m(nT_1).$$

Далее значение  $U_m$ , пропорциональное энергии сигнала, поступает на пороговую обработку, где сравнивается с заданным порогом  $h_0$ . В результате сравнения принимается решение об обнаружении по следующему правилу:

- ♦ принимается гипотеза  $H_1$  о наличии сигнала, если  $U_m \geq h_0$ ;
- ♦ принимается гипотеза  $H_0$  об отсутствии сигнала, если  $U_m < h_0$ .

Определение координат ИРИ реализуется следующим образом. С трех блоков ЦФКС КО сигналов поступают в блок БПФ, где выполняются процедуры БПФ согласно выражениям:

$$X_m(k) = \sum_{n=0}^{N_{\text{БПФ}}-1} x_m(nT_1) e^{-j \frac{2\pi}{N_{\text{БПФ}}} nk},$$

где  $m = 1, 2, 3$ ;  $k = 0, 1, \dots, N_{\text{БПФ}} - 1$ ;  $N_{\text{БПФ}} = 32K$  – размер БПФ.

Далее вычисленные спектры передаются в блок ВКФ, где вычисляются взаимные спектральные плотности сигналов:

$$W_{21}(k) = \frac{1}{N_{\text{БПФ}} T_1} X_2(k) X_1^*(k); \quad W_{32}(k) = \frac{1}{N_{\text{БПФ}} T_1} X_3(k) X_2^*(k).$$

По теореме Винера-Хинчина определяются ВКФ сигналов каждой пары приемников через процедуру ОБПФ взаимных спектральных плотностей сигналов:

$$R_{21}(r) = \frac{1}{N_{\text{БПФ}}} \sum_{k=0}^{N_{\text{БПФ}}-1} W_{21}(k) e^{j2\pi k r / N_{\text{БПФ}}}; \quad R_{32}(r) = \frac{1}{N_{\text{БПФ}}} \sum_{k=0}^{N_{\text{БПФ}}-1} W_{32}(k) e^{j2\pi k r / N_{\text{БПФ}}},$$

где  $r = 0, \dots, N_{\text{БПФ}} - 1$ .

Для расчета временных задержек определяются максимальные значения модулей ВКФ:

$$R_{21\max}(r_{21\max}) = \max_{0 \leq r \leq N_{\text{бит}} - 1} |R_{21}(r)|; \quad R_{32\max}(r_{32\max}) = \max_{0 \leq r \leq N_{\text{бит}} - 1} |R_{32}(r)|.$$

По аргументам ВКФ  $r_{21\max}$  и  $r_{32\max}$ , в которых достигаются максимальные значения модулей ВКФ, определяются взаимные временные задержки сигналов  $\tau_{21}$  и  $\tau_{32}$  по формулам, приведенным в [6].

По найденным задержкам сигналов  $\tau_{21}$  и  $\tau_{32}$  рассчитывается дальность до ИРИ относительно начала координат и координаты цели по формулам, приведенным в [5] для коллинеарного расположения трех антенн и по формулам, приведенным в [4] с учетом неточностей установки приемных антенн (для неколлинеарного расположение антенн).

На этом заканчивается решение задачи обнаружения и измерения координат воздушного объекта.

Проведен также расчет требуемой производительности вычислителя для реализации алгоритмов пассивной РЛС в реальном масштабе времени с использованием времени накопления сигналов 1 мс. Суммарная производительность вычислителя составила 84,62 GFLOPS. Следует отметить, что на практике отсутствует необходимость непрерывного проведения указанных вычислений для получения результатов через 1 мс (достаточно несколько раз или десятков раз в секунду). Следовательно, требования к производительности вычислителя РЛС могут быть снижены на два-три порядка.

**Бортовой антенный модуль БЛА в составе многопозиционной пассивной РЛС.** Антенны малогабаритных бортовых РЛС для малоразмерных БЛА в основном изготавливаются в виде микрополосковых излучателей и решеток из них. В тех случаях, когда позволяют параметры полезной нагрузки БЛА, могут применяться рупорные конструкции. Используется линейная и круговая поляризация [9, 10].

Антенны пассивных бортовых РЛС для патрулирования воздушного пространства в открытой печати не описаны. На основе анализа требований к функциональным возможностям пассивной многопозиционной РЛС на базе группировки БЛА можно сформировать основные параметры антенной системы.

1. Необходимо иметь не менее двух независимых антенн – для обнаружения сигналов ИРИ и для передачи командно-телеметрических и информационных данных.
2. Антенны должны иметь слабую направленность, достаточную широкополосность в пределах частотных диапазонов 2,4 и 5 ГГц, работать на круговой поляризации с различными коэффициентами эллиптичности и линейной поляризации с произвольным наклоном плоскости поляризации, иметь минимальные размеры и массу.
3. Оптимальной конструкцией антенны является микрополосковая patch-антенна.

В [19, 20] исследована микрополосковая реконфигурируемая антенна, перестраиваемая по частоте и поляризации. Антенна имеет компактные размеры и может быть использована в беспроводных системах связи, работающих в диапазоне 2...7 ГГц. Излучающая часть антенны представляет собой ромб, к которому с двух сторон может поступать сигнал из общего порта. Заземляющая сторона имеет крестообразную форму с плечами разной длины. В конструкции антенны имеется пять рpн-диодов, в зависимости от состояния которых изменяется резонансная частота и поляризация антенны. Замкнутые и разомкнутые состояния расположенных на излучающей стороне рpн-диодов изменяют поляризацию антенны вследствие нарушения симметрии её конструкции. Резонансная частота антенны зависит от состояния рpн-диодов на заземляющей стороне.

На рис. 4 представлены результаты моделирования частотных зависимостей коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) антенны, выполненного в системе 3D электромагнитного моделирования FEKO. При различных комбинациях коммутирующих рpн-диодов (замкнутое состояние диода или разомкнутое) антенна обладает набором резонансных частот, которым соответствуют минимальные значения КСВН.

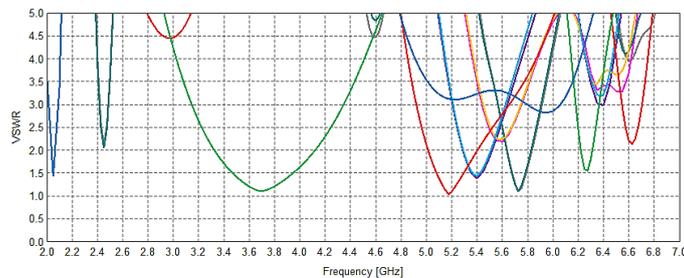


Рис. 4. Зависимость коэффициента стоячей волны по напряжению реконфигурируемой антенны от частоты

Для нижней части используемого диапазона частот (2,05; 2,45 и 3,7 ГГц) поляризация практически линейна, в более высоком поддиапазоне (5,4, 5,6 и 5,75 ГГц) антенна имеет близкую к круговой поляризацию, направление вращения которой изменяется в зависимости от состояния диодов. Возможность переключения поляризации на ортогональную на одной и той же частоте позволяет улучшить условия приема сигнала в условиях многолучевого распространения и тем самым повысить вероятность обнаружения ИРИ пассивной РЛС на базе группировки БЛА.

**Заключение.** Разработана структурная схема пассивной многопозиционной РЛС и приведены аналитические выражения алгоритмов обнаружения и определения координат цели. Рассчитаны основные параметры приемного тракта РЛС для наиболее вероятных источников радиоизлучения на борту БЛА. Оценена требуемая производительность вычислителя для реализации разработанных алгоритмов ЦОС в реальном масштабе времени, которая не превышает 84,62 GFLOPS. Предложена конструкция антенного модуля пассивной многопозиционной РЛС, который представляет собой микрополосковую реконфигурируемую в диапазоне 2...7 ГГц по частоте и поляризации антенну.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.
2. Караваев В.В., Сазонов В.В. Статистическая теория пассивной локации. – М.: Радио и связь, 1987. – 240 с.
3. Ильин Е.М., Климов А.Э., Пащин Н.С., Полубехин А.И., Черевко А.Г., Шумский В.Н. Пассивные локационные системы. Перспективы и решения // Вестник СибГУТИ. – 2015. – № 2. – С. 7-20.
4. Маркович И.И., Завтур Е.Е. Алгоритм определения координат целей разностно-дальномерным методом с учетом неточностей установки приемных гидроакустических антенн // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 8. – С. 162-171.
5. Марьев А.А., Маркович И.И., Завтур Е.Е. Исследование погрешностей разностно-дальномерного метода пассивной локации // Излучение и рассеяние электромагнитных волн: Тр. Международной научной конференции «Излучение и рассеяние электромагнитных волн» ИРЭМВ-2015. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2015. – С. 391-395.
6. Сытенький В.Д. Пассивная локация на основе амплитудных измерений // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2011. – Вып. 1. – С. 69-76.
7. Сытенький В.Д., Бакаев А.В. Определение координат объекта по известным параметрам источников излучения // Вестник воздушно-космической обороны. – 2018. – № 3 (19). – С. 94-101.

8. Сытенский В.Д., Маркович И.И., Завтур Е.Е. Определение координат источников излучения в пассивных РЛС амплитудным методом // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 1 (218). – С. 72-81.
9. Ильин Е.М., Савостьянов В.Ю., Самарин О.Ф., Черевко А.Г. Состояние и перспективы создания многодиапазонных малогабаритных радиолокационных систем // Вестник СибГУТИ. – 2015. – № 2. – С. 156-163.
10. Ильин Е.М., Кривов Ю.Н., Полубехин А.И., Кренив А.Н., Черевко А.Г. Многофункциональный бортовой РЛК с конформной антенной системой для беспилотных летательных аппаратов малой дальности // Вестник СибГУТИ. – 2018. – № 3. – С. 79-88.
11. Chandra R.S., Breheny S.H., D'Andrea R. Antenna array synthesis with clusters of unmanned aerial vehicles // Automatica. – 2008. – No. 44. – P. 1976-1984.
12. Канащенков А.А. Техничко-экономический анализ разработки многофункциональной радиолокационной станции для беспилотного летательного аппарата // Успехи современной науки и образования. – 2016. – Т. 2, № 8. – С. 132-135.
13. Tierney B.V., Rodenbeck C.T. 3D-Sensing MIMO Radar for UAV Formation Flight and Obstacle Avoidance // 2019 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS). – IEEE, 2019. – P. 1-3.
14. Гуськов Юрий, Савостьянов Владимир, Самарин Олег. Многофункциональные малогабаритные бортовые РЛС. Критические технологии создания // Радиоэлектронные технологии. – 2018. – № 1. – С. 40-46.
15. Савостьянов В.Ю., Карпов О.А., Ефимов А.В. Многофункциональная малогабаритная РЛС Ku-диапазона для лёгкого БЛА // Всероссийские открытые Армадовские чтения. – 2019. – С. 389-394.
16. Kim J. et al. Design and Implementation of Compact 77 GHz Synthetic Aperture Radar for Drone Based Applications // 2019 6th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR). – IEEE, 2019. – P. 1-5.
17. Маркович И.И. Реализация алгоритмов цифрового формирования квадратурных составляющих в локационных комплексах различного назначения // Вестник компьютерных технологий. – 2006. – № 6. – С. 16-21.
18. Маркович И.И. Цифровая обработка сигналов в системах и устройствах: монография. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2012. – 236 с.
19. Ваганова А.А., Кисель Н.Н., Панычев А.И. Направленные и поляризационные свойства микрополосковой реконфигурируемой антенны, перестраиваемой по частоте и поляризации // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 2 (219). – С. 74-83.
20. Vaganova A.A., Kisel N.N., Panychev A.I. Microstrip reconfigurable antenna with tunable frequency and polarization // Conference Proceedings – 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEMW 2021. – 2021. – P. 127-130.

#### REFERENCES

1. Chernyak V.S. Mnogopozitsionnaya radiolokatsiya [Multi-position radar]. Moscow: Radio i svyaz', 1993, 416 p.
2. Karavaev V.V., Sazonov V.V. Statisticheskaya teoriya passivnoy lokatsii [Statistical theory of passive location]. Moscow: Radio i svyaz', 1987, 240 p.
3. Il'in E.M., Klimov A.E., Pashchin N.S., Polubekhin A.I., Cherevko A.G., Shumskiy V.N. Passivnye lokatsionnye sistemy. Perspektivy i resheniya [Passive location systems. Prospects and solutions], *Vestnik SibGUTI* [Bulletin of SibGUTI], 2015, No. 2, pp. 7-20.
4. Markovich I.I., Zavtur E.E. Algoritm opredeleniya koordinat tseley raznostno-dal'nomernym metodom s uchetom netochnostey ustanovki priemnykh gidroakusticheskikh anten [Algorithm for determining the coordinates of targets by the difference-range-measuring method, taking into account the inaccuracies of the installation of receiving hydroacoustic antennas], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 8, pp. 162-171.
5. Mar'ev A.A., Markovich I.I., Zavtur E.E. Issledovanie pogreshnostey raznostno-dal'nomernogo metoda passivnoy lokatsii [Research of errors of the difference-range-measuring method of passive location], *Izluchenie i rasseyaniye elektromagnitnykh voln: Tr. Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Izluchenie i rasseyaniye elektromagnitnykh voln» IREMV-2015* [Radiation and scattering of electromagnetic waves: Proceedings of the International Scientific Conference "Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves" IREMV-2015]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2015, pp. 391-395.

6. Syten'kiy V.D. Passivnaya lokatsiya na osnove amplitudnykh izmereniy [Passive location based on amplitude measurements], *Izvestiya vuzov Rossii. Radioelektronika* [Izvestiya of Russian universities. Radio electronics], 2011, Issue 1, pp. 69-76.
7. Syten'kiy V.D., Bakaev A.V. Opredelenie koordinat ob"ekta po izvestnym parametram istochnikov izlucheniya [Determination of object coordinates by known parameters of radiation sources], *Vestnik vozdušno-kosmicheskoy oborony* [Bulletin of Aerospace Defense], 2018, No. 3 (19), pp. 94-101.
8. Syten'kiy V.D., Markovich I.I., Zavtur E.E. Opredelenie koordinat istochnikov izlucheniya v passivnykh RLS amplitudnym metodom [Determination of the coordinates of radiation sources in passive radars by the amplitude method], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. 1 (218), pp. 72-81.
9. Il'in E.M., Savost'yanov V.Yu., Samarin O.F., Cherevko A.G. Sostoyanie i perspektivy sozdaniya mnogodiapazonnykh malogabaritnykh radiolokatsionnykh sistem [The state and prospects of creating multi-band small-sized radar systems], *Vestnik SibGUTI* [Bulletin of SibGUTI], 2015, No. 2, pp. 156-163.
10. Il'in E.M., Krivov Yu.N., Polubekhin A.I., Krenev A.N., Cherevko A.G. Mnogofunktsional'nyy bortovoy RLK s konformnoy antennoy sistemoy dlya bespilotnykh letatel'nykh apparatov maloy dal'nosti [Multifunctional airborne radar with conformal antenna system for short-range unmanned aerial vehicles], *Vestnik SibGUTI* [Bulletin of SibGUTI], 2018, No. 3, pp. 79-88.
11. Chandra R.S., Breheny S.H., D'Andrea R. Antenna array synthesis with clusters of unmanned aerial vehicles, *Automatica*, 2008, No. 44, pp. 1976-1984.
12. Kanashchenkov A.A. Tekhniko-ekonomicheskii analiz razrabotki mnogofunktsional'noy radiolokatsionnoy stantsii dlya bespilotnogo letatel'nogo apparata [Technical and economic analysis of the development of a multifunctional radar station for an unmanned aerial vehicle], *Uspekhi sovremennoy nauki i obrazovaniya* [Successes of modern science and education], 2016, Vol. 2, No. 8, pp. 132-135.
13. Tierney B.B., Rodenbeck C.T. 3D-Sensing MIMO Radar for UAV Formation Flight and Obstacle Avoidance, *2019 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS)*, IEEE, 2019, pp. 1-3.
14. Gus'kov Yuriy, Savost'yanov Vladimir, Samarin Oleg. Mnogofunktsional'nye malogabaritnye bortovye RLS. Kriticheskie tekhnologii sozdaniya [Multifunctional small-sized airborne radars. Critical creation technologies], *Radioelektronnye tekhnologii* [Radioelectronic technologies], 2018, No. 1, pp. 40-46.
15. Savost'yanov V.Yu., Karpov O.A., Efimov A.V. Mnogofunktsional'naya malogabaritnaya RLS Kudiapazona dlya legkogo BLA [Multifunctional small-sized Ku-band radar for light UAV], *Vserossiyskie otkrytye Armandovskie chteniya* [All-Russian Open Armand readings], 2019, pp. 389-394.
16. Kim J. et al. Design and Implementation of Compact 77 GHz Synthetic Aperture Radar for Drone Based Applications, *2019 6th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR)*. IEEE, 2019, pp. 1-5.
17. Markovich I.I. Realizatsiya algoritmov tsifrovogo formirovaniya kvadraturnykh sostavlyayushchikh v lokatsionnykh kompleksakh razlichnogo naznacheniya [Implementation of algorithms for digital formation of quadrature components in location complexes for various purposes], *Vestnik komp'yuternykh tekhnologiy* [Bulletin of Computer Technologies], 2006, No. 6, pp. 16-21.
18. Markovich I.I. Tsifrovaya obrabotka signalov v sistemakh i ustroystvakh: monografiya [Digital signal processing in systems and devices: monograph]. Rostov-on-Donu: Izd-vo YuFU, 2012, 236 p.
19. Vaganova A.A., Kisel' N.N., Panychev A.I. Napravlennye i polarizatsionnye svoystva mikropoloskovoy rekonfiguriruemoy anteny, perestraivayemoy po chastote i polarizatsii [Directional and polarization properties of a microstrip reconfigurable antenna, tunable in frequency and polarization], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. 2 (219), pp. 74-83.
20. Vaganova A.A., Kisel' N.N., Panychev A.I. Microstrip reconfigurable antenna with tunable frequency and polarization, *Conference Proceedings – 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEMW 2021*, 2021, pp. 127-130.

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

**Маркович Игорь Ильич** – Научное конструкторское бюро цифровой обработки сигналов Южного федерального университета; e-mail: marko@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634394055; директор-главный конструктор; к.т.н.; с.н.с.

**Завтур Евгений Евгеньевич** – e-mail: zavtur90@mail.ru; тел.: 88634393075; начальник сектора.

**Паньчев Андрей Иванович** – Южный федеральный университет; e-mail: aipanychev@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371634; к.т.н.; доцент.

**Markovich Igor I'ich** – Research and Design Bureau of Digital Signal Processing Southern Federal University; e-mail: marko@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634394055; cand. of eng. sc.; senior fellow; director–chief designer.

**Zavtur Evgeny Evgenievich** – e-mail: zavtur90@mail.ru; phone: +78634393075; head of section.

**Panychev Andrey Ivanovich** – Southern Federal University; e-mail: aipanychev@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371634; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 629.7:531.55:004.94

DOI 10.18522/2311-3103-2022-1-17-29

**Н.А. Соколов, Д.А. Рябухин**

**К ПРОБЛЕМЕ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТАМ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННЫХ РЕСУРСОВ. ОПЫТ КАРАБАХА**

*На основе исследования опыта вооруженного конфликта в Нагорном Карабахе выявлены некоторые основные тенденции развития тактики применения беспилотных летательных аппаратов (БЛА) и определены возможные варианты противодействия в интересах повышения живучести подразделений тактического звена. Проведен анализ состояния вопроса разработки современных средств противовоздушной обороны (ПВО) в задачах борьбы с БЛА, в том числе малоскоростных и малоразмерных, способных осуществлять активное маневрирование и применяемых группами. Выявлены противоречия в требованиях скорейшей разработки специализированных средств (комплексов) противодействия БЛА и реальным, продолжительным временем на их разработку (5–15 лет), а также необходимыми затратами на создание, постановку серийного производства, закупку, и поставку в войска перспективных специализированных комплексов. Для решения тактических задач прикрытия от атак БЛА опорных пунктов отдельных подразделений, выполняющих задачи в отрыве от основных сил, предложено применение имеющихся в наличии инженерных боеприпасов – осколочных мин направленного поражения МОН-90, МОН-200. Проведено моделирование ситуации атаки малоразмерных низколетящих БЛА, и расчёт вероятности поражения БЛА инженерными осколочными минами, который показал приемлемую вероятность поражения низколетящих БЛА при их нахождении в секторе подрыва и разлета облака поражающих элементов мин.*

*Беспилотная авиационная система; беспилотный летательный аппарат; противодействие беспилотным летательным аппаратам.*

**N.A. Sokolov, D.A. Ryabukhin**

**TO THE PROBLEM OF COUNTERING UNMANNED AERIAL VEHICLES IN CONDITIONS OF LIMITED RESOURCES. THE KARABAKH EXPERIENCE**

*Based on the study of the experience of the armed conflict in Karabakh, some main trends in the development of tactics for the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) have been identified and possible counteraction options have been identified in the interests of increasing the survivability of tactical units. The analysis of the state of the issue of the development of modern means of air defense in the tasks of combating UAVs, including low-speed and small-sized, capable of active maneuvering and used by groups. Contradictions have been revealed in the requirements for the early development of specialized means (complexes) of countering UAVs and the real, long time*

*for their development (5–15 years), as well as the necessary costs for the creation, serial production, purchase, and delivery of promising specialized complexes to the troops. To solve the tactical tasks of covering the strongholds of individual units performing tasks in isolation from the main forces from UAV attacks, the use of available engineering ammunition – directed fragmentation mines MON-90, MON-200 is proposed. A simulation of the attack situation of small-sized low-flying UAVs was carried out, and the probability of hitting UAVs with engineering fragmentation mines was calculated, which showed an acceptable probability of hitting low-flying UAVs when they were in the sector of detonation and scattering of a cloud of damaging elements of mines.*

*Unmanned aircraft system; unmanned aerial vehicle; countering unmanned aerial vehicles.*

**Актуальность.** Вооруженные конфликты последних лет (Сирия, Ливия, Нагорный Карабах и др.) продемонстрировали возрастание роли беспилотной авиации среди средств воздушного нападения. В боевых действиях на территории Нагорного Карабаха в сентябре-ноябре 2020 года беспилотные летательные аппараты (БЛА – по ГОСТ Р 57258-2016 [1]) фактически выполняли задачи оперативно-тактической пилотируемой авиации. Относительно низкая стоимость производства, эксплуатации и обслуживания БЛА в сравнении с пилотируемой авиацией обусловили их массовое применение. Динамика изменения способов ведения боевых действий вызывает необходимость оперативной систематизации опыта современных вооруженных конфликтов и его внедрения в практическую деятельность подразделений своих войск.

Вместе с тем, как показал боевой опыт, в борьбе с БЛА важны не только современные комплексы ПВО, но и системная организация противодействия [2].

Авторами не рассматриваются вопросы применения систем ПВО против БЛА, т.к. имеется достаточно исследований по данной теме. Вместе с тем, следует отметить, что известные системы ПВО предназначены и, как правило, применяются для защиты наиболее крупных стационарных объектов (объекты промышленной инфраструктуры, аэродромы, командные пункты, узлы связи и т.п.) или воинских группировок сил и средств. И в обозримом будущем маловероятна возможность прикрытия от БЛА новейшими комплексами ПВО каждого опорного пункта или блок-поста, при том, что их живучесть на тактическом уровне является определяющим фактором контроля над территорией в современных вооруженных конфликтах. В этом отношении анализ опыта вооруженного конфликта в Нагорном Карабахе (сентябрь–ноябрь 2020 г.) и других конфликтов последнего времени является актуальным для выявления современного развития тактики противодействия БЛА. Следует отметить, что предлагаемые решения не являются абсолютной защитой, рассматриваются как дополнение к существующим методам и средствам в условиях ограниченных временных, материальных ресурсов, и требуют от личного состава высокого уровня дисциплины применения и строгого соблюдения требований безопасности.

**Состояние вопроса.** На основе исследования опыта вооруженного конфликта в Нагорном Карабахе выявлены некоторые основные тенденции развития тактики применения БЛА и определены варианты противодействия в интересах повышения живучести подразделений тактического звена.

Прежде всего, отмечаются следующие особенности данного вооруженного конфликта: ведение боевых действий в условиях горной местности, существенное различие уровней оснащённости воинских формирований современными средствами вооружённой борьбы и, соответственно, боевых возможностей противоборствующих сторон [3].

Особенностью тактики воинских формирований Азербайджана стало широкое применение разведывательно-ударных комплексов, созданных на основе беспилотной авиации. В составе смешанных групп для ведения разведки и нанесения ударов совместно с разведывательно-ударными БЛА (Bayraktar-TB2) также применялись ударные БЛА типа «барражирующий боеприпас» (SkyStriker, Harop, Orbiter) [4].

Турецкий БЛА Bayraktar-TB2 (Tactical Block 2) был принят на вооружение Турции в 2016 году. БЛА Harop был показан израильской компанией IAI в 2009 году. Основные технические параметры характерных БЛА представлены в табл. 1 [5, 2].

Таблица 1

**Основные технические параметры БЛА**

БЛА	Bayraktar-TB2	Harop	Orbiter-1K	Orbiter-2M	SkyStriker
Длина, м	6,5	2,5	1,2	1	1,5
Ширина, м	12	3	2,9	3	3
Скорость (крейсерская), км/ч	130	185	140	130	150
Взлетная масса, кг	500	135	13	10	35
Масса боевой нагрузки, кг	150	23	3	1,5	5

Также отмечаются такие характерные черты вооруженного конфликта в Нагорном Карабахе, как: рейдовые действия для овладения господствующими высотами, узлами дорог и опорными пунктами при поддержке ударными БЛА. Беспрепятственные групповые удары БЛА по сосредоточению в опорных пунктах и на позициях мотострелковых, танковых и артиллерийских подразделений наносили значительные потери и способствовали снижению морально-психологического состояния личного состава еще до вступления в бой [3].

Ударные БЛА (в основном израильского, турецкого, китайского производства) также активно применялись в Ливии и Сирии, в том числе против зенитных комплексов советского и российского производства в экспортном исполнении, как устаревших (зенитно-ракетный комплекс (ЗРК) «Оса»), так и считающихся современными (зенитный ракетно-пушечный комплекс (ЗРПК) «Панцирь») [5]. В последнее время в Сирии отмечается изменение тактики применения БЛА. Вместо одиночного применения или применения нескольких БЛА с одного направления террористы стали использовать их массировано с разных направлений и высот, преимущественно по заранее запрограммированным маршрутам [6].

Анализ публикаций в области противодействия БЛА, показывает, что в исследованиях по данной тематике встречаются диаметрально противоположные мнения, в ряде работ в этой области преобладают оптимистические выводы относительно успешности поражения всех видов БЛА существующими отечественными средствами ПВО или же глубокое убеждение авторов в неограниченных возможностях средств радиоэлектронного подавления (РЭП) и радиоэлектронной борьбы (РЭБ) [7].

В зарубежной научной печати введены относительно устоявшиеся термины, а также определены основные направления исследований. В предметной области: «противодействие БЛА» – используются такие термины, как «C-UAV», «CUAV», «C-UAVs», «CUAVs» (Counter Unmanned Aerial Vehicles). В области «системы противодействия БЛА» – используются такие термины, как «C-UAS», «CUAS» (Counter Unmanned Aircraft Systems), «C-UAV system», «CUAV-system», «AUDS» (Anti-UAV Defense System), Counter-Drone Systems. В направлении «технологии противодействия БЛА» – используются такие термины, как «AntiDrone Technologies» и «Counter-UAVs Technologies» [8].

При этом, если на начальном этапе появления задачи противодействия БЛА (в начале 2000-х гг.), эта задача решалась исключительно средствами поражениями (ракетами и снарядами) ЗРК ПВО, то в настоящее время специалисты осознали [8],

что прямое отражение массированного налета БЛА средствами ЗРК ПВО, во-первых, неоправданно экономически из-за использования дорогостоящих ракет по большому числу относительно дешевых БЛА, а во-вторых, это ведет к быстрому истощению боевого ресурса ЗРК и последующей их неспособности отразить удар уже пилотируемой авиации, а также крылатых ракет высокоточного оружия (ВТО).

Результаты исследований [6] возможностей обнаружения и уничтожения мины и микро БЛА средствами войск ПВО свидетельствует о том, что обнаружение малоразмерных целей радиолокационными станциями частей и подразделений войск ПВО малоэффективно. Существующие проблемы в обнаружении и подавлении мины и микро БЛА, обусловлены тем, что они являются нехарактерными целями для зенитных ракетных комплексов, т.к. они имеют малые значения эффективной отражающей поверхности и скоростей [6]. Групповое применение БЛА уже сегодня является серьезным фактором для достижения военного превосходства малыми затратами. Дальнейшее развитие технологии группового применения БЛА существенно усложняет условия функционирования комплексов ПВО и требует кардинального пересмотра идеологии создания систем ПВО [9].

Применение нескольких эшелонов налетов групп малых и относительно дешевых БЛА может парализовать любую ПВО [9]. В связи с этим, в настоящее время широко исследуются дополнительные способы противодействия БЛА, в том числе такие, как применение средств РЭП, а также средств направленного излучения энергии – лазерного оружия [8].

Также в рамках проводимых исследований [3] даются рекомендации по совершенствованию способов противодействия БЛА. Предлагается создание в тактическом звене качественно подготовленной помехоустойчивой системы ПВО, хорошо защищенной от ударов сил и средств воздушно-космического нападения противника. В составе данной системы ПВО предусматривается применение роботизированных средств, которые смогут быть эффективны для уничтожения малоразмерных воздушных целей на небольших высотах, в том числе путем устройства противовоздушных засад на труднодоступной местности [3].

Известные исследования [10] методов и средств нейтрализации БЛА определяют требования к системе противодействия БЛА. Она должна быть высокоэффективной при любых погодных условиях, оперативно развертываемой, простой в применении и обслуживании, готовой к многократному применению.

Среди методов противодействия выделяются контактные (обученные животные, противодроны, сети, кинетическое оружие и шрапнельные выстрелы) и бесконтактные (акустическое, лазерное, микроволновое воздействие, средства РЭБ). Из анализа методов противодействия БЛА делается вывод в приоритетности применения в условиях вооруженных конфликтов физических методов воздействия [10].

Для решения задачи своевременного обнаружения и противодействия мины и микро БЛА предприятиями оборонно-промышленного комплекса (ОПК) разрабатывается ряд перспективных средств [6]. Формируются предложения по повышению эффективности средств ПВО при их применении против БЛА:

- ◆ создание многофункциональной системы противодействия БЛА;
- ◆ модернизация существующих средств ПВО;
- ◆ оснащение существующих комплексов ПВО средствами РЭП;
- ◆ разработка нового комплекса ПВО, ориентированного на противодействие именно БЛА.

В работах [11, 12] предлагается адаптировать устаревшие образцы зенитных установок (ЗУ), например, таких как С-60, ЗУ-23-2 и КС-19, к борьбе с БЛА за счет оснащения их современными средствами разведки, точного целеуказания, автоматизированного управления процессами подготовки и ведения стрельбы, более

мощными боеприпасами с программируемым в процессе выстрела временем подрыва, адаптивной к параметрам движения цели областью разлета поражающих элементов и т.д.

Таким образом, на сегодняшний день, уже предложено множество путей решения проблемы противодействия БЛА, однако они не учитывают реалии текущей экономической ситуации и технологической стороны вопроса, и скорее направлены на далекую перспективу. Потому, что при разработке технических предложений и тактических приемов надо также учитывать и временной фактор, так как от волевого решения до появления конечного изделия может пройти от 5 до 15 лет [13].

**Технические предложения.** Исходя из конструктивных особенностей БЛА, можно выделить две зоны поражения (рис. 1), попадание снаряда в которые приводит к различным последствиям [9].

Первая зона – область гарантированного поражения. Это область, попадание снаряда в которую приводит к неизбежному разрушению конструкции БЛА. Например, для многодвигательного БЛА со взлётной массой 100–150 кг диаметр этой зоны составляет 0,95 м [9], а для БЛА классической компоновки самолетного типа, аналогичной массы (см. табл. 1) – может составлять 1-2 м.

Вторая зона – область возможного поражения, которая обусловлена низкой конструктивной плотностью БЛА, что существенно снижает вероятность попадания снаряда в какой-либо значимый элемент конструкции с последующим его разрушением. При этом надо иметь в виду, что разрушение периферийного элемента конструкции может привести к нарушению его целостности и потере функциональной работоспособности, но не всегда может привести к такому же эффекту для всего БЛА. Например, поражение лопасти и её разрушение одного из воздушных винтов малого БЛА (при количестве винтов не менее 4) приведёт к полной утрате функциональной работоспособности одного винта, а для всего БЛА это приведёт лишь к снижению его эксплуатационных возможностей [9].

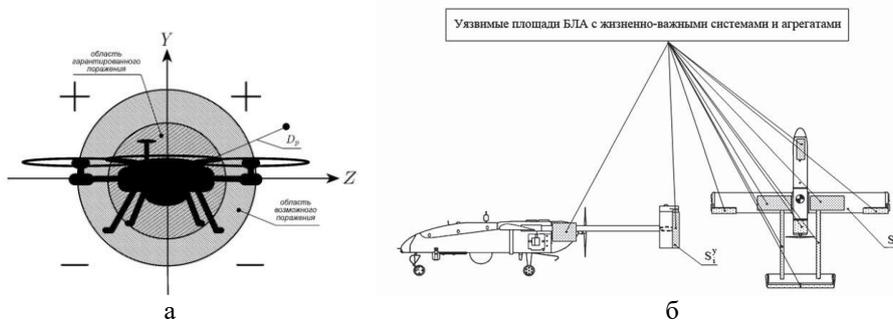


Рис. 1. Зоны поражения БЛА [9, 14]:  
а – БЛА типа квадрокоптер, б – БЛА самолетного типа

Вероятность поражения БЛА  $P_{пор}$  можно оценить в соответствии с выражением [14]:

$$P_{пор} = 1 - (1 - P_{поп} P_{пор1})^N, \quad (1)$$

где  $P_{поп}$  – вероятность попадания снаряда в область гарантированного поражения БЛА;  $P_{пор1}$  – вероятность поражения БЛА одним снарядом;  $N$  – количество снарядов, выпущенных по БЛА.

При этом, как показано в работе [14], вероятность поражения БЛА для отечественных ЗАК и ЗРПК составляет  $P_{пор} = 0,6 \dots 0,9$ , для случаев, когда БЛА с ЭПР не менее  $0,5 \text{ м}^2$  оказывается в зоне поражения соответствующих комплексов.

Следует отметить, что активное поражение БЛА существующими зенитными средствами возможно лишь с большими ограничениями по обнаружению и обстрелу целей с ЭПР не менее  $0,01 \text{ м}^2$ . Эффективная боевая работа по целям с меньшими ЭПР современными зенитными комплексами практически невозможна ввиду указанных выше ограничений. Для повышения эффективности поражения малоразмерных БЛА зенитным огнем необходима разработка специализированных систем зенитного оружия [7].

Обобщая, вышеизложенное можно сделать выводы о том, что основными причинами низкой эффективности средств ПВО при стрельбе по БЛА являются [9]:

- ◆ для зенитных ракет: высокая скорость полёта средства поражения и невозможность управления ею при наведении на БЛА;

- ◆ для зенитной артиллерии: низкая плотность средств поражения (снарядов, пуль) в объёме пространства, внутри которого находится БЛА из-за рассеивания, обусловленного колебаниями ствола, платформы, на которой установлена установка, и зависимостью внутренней баллистики от состояния и температуры ствола.

В работе [11] для создания высокой плотности зенитного огня при стрельбе предлагается применять скорострельные зенитные артиллерийские автоматы. Эту роль должны выполнять 4-8 зенитных стволов, размещенных на одной платформе (лафете, установке). Скорострельность зенитных автоматов должна достигать значений не менее 4000-4500 выстр./мин. Снаряды предлагаемого в [11] перспективного комплекса ПВО должны обладать повышенной пробивной и разрушающей способностью за счет увеличения числа поражающих элементов (около 100-150 в каждом снаряде), с поражающими элементами в виде игл, осколков, сетки-паутины и др. При этом облако осколков должно формироваться с учетом размеров и параметров движения малоразмерной цели, обеспечивая ее гарантированное поражение [11].

В отечественной истории не раз возникали ситуации, когда требовалось решать сложные задачи «здесь и сейчас» при ограниченных материальных, технических и временных ресурсах. Как было отмечено в [9, 11], в основе принципа перехвата зенитных средств положено поражение целей облаком осколков за счет создания высокой плотности огня. Такие средства имеются в инженерных войсках, кроме того, находятся в достаточном количестве на складах хранения – это инженерные боеприпасы класса осколочных мин направленного поражения. Более того, в свое время разрабатывались специальные инженерные боеприпасы для поражения низко летящих вертолетов [15].

Для целей поражения БЛА целесообразно рассмотреть осколочные мины МОН-200, МОН-100, МОН-90, МОН-50. Поражение при взрыве мин наносится готовыми поражающими элементами (ПЭ) в виде цилиндров с размерами  $10 \times 10$  мм. Основные тактико-технические характеристики (ТТХ) мин представлены в табл. 2 [16–18].

Таблица 2

**Основные ТТХ осколочных мин направленного поражения [16–18]**

Мина	МОН-200	МОН-100	МОН-90	МОН-50
Масса мины, кг	25	5	12,1	2
Масса взрывчатки, кг	12	2	6,2	0,7
Дальность сплошного поражения (вероятность поражения 0,9), м	200	115	80	50
Дальность разлета ПЭ (вероятность поражения 0,2), м	250	160	110	85
Количество готовых ПЭ, шт.	900	400	2000	485-540
Размер зоны сплошного поражения, м	14x8	10x6	60x8	50x4

Осколочные мины МОН-200, МОН-100, МОН-90, МОН-50 (рис. 2) предназначены для поражения живой силы противника, в том числе находящегося в грузовом и легковом транспорте, подрыв мин производится в управляемом варианте от электродетонатора.



Рис. 2. Осколочные мины направленного поражения:  
а – МОН-200, б – МОН-100, в – МОН-90, г – МОН-50

По методике, представленной в работе [14] проведено моделирование поражения БЛА инженерными осколочными минами с учетом выражения (1). Моделировалась тактическая ситуация атаки БЛА типа Orbiter-1К (табл. 1), летящего на высоте 100 м, для случая нахождения БЛА в секторе поражения на дальности разлета ПЭ мин в соответствии с их ТТХ (табл. 2).

За исходные технические данные приняты характеристики мин (дальности поражения, количество ПЭ), представленные в табл. 2.

Моделировалась ситуация худших условий при вероятности попадания ПЭ в область гарантированного поражения БЛА  $P_{\text{поп}} = 0,1$ ; вероятность поражения БЛА одним ПЭ на максимальной дальности  $P_{\text{пор1}} = 0,2$ ; вероятность поражения БЛА одним ПЭ на дальности сплошного поражения  $P_{\text{пор1}} = 0,5$ ; количество ПЭ  $N$  – в соответствии с ТТХ мин (табл. 2).

Результаты расчетов поражения БЛА осколочными минами для случая нахождения БЛА в секторе поражения на дальности разлета ПЭ представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Результаты моделирования поражения БЛА осколочными минами**

Мина	МОН-200	МОН-100	МОН-90	МОН-50
Вероятность поражения БЛА $P_{\text{пор}}$ на дальности сплошного поражения	0,999	0,999	1	0,999
Вероятность поражения БЛА $P_{\text{пор}}$ на максимальной дальности	0,999	0,99	0,999	0,99

Анализ данных моделирования показывает, что в случае попадания БЛА в зону разлета ПЭ осколочных мин, даже на максимальной дальности разлета ПЭ, обеспечивается его поражение с вероятностью не хуже 0,99. При этом количество атакующих БЛА не имеет значения, т.к. вероятность ситуации, при которой количество атакующих БЛА в зоне поражения превысит или сравняется с количеством ПЭ одной мины стремится к нулю. А для противодействия БЛА необходимо групповое применение осколочных мин направленного поражения.

Таким образом, моделированием вероятности поражения подтверждается целесообразность применения инженерных боеприпасов указанного класса в целях поражения низко летящих БЛА.

Следующим этапом необходимо выбрать наиболее подходящий боеприпас, обосновать рациональное количество и расположение мин для противодействия БЛА, которое будет определяться величиной зоны поражения на требуемой дальности. Для сравнения на рис. 3 показаны размеры зон сплошного поражения осколочных мин направленного действия в соответствии с их ТТХ (табл. 2).

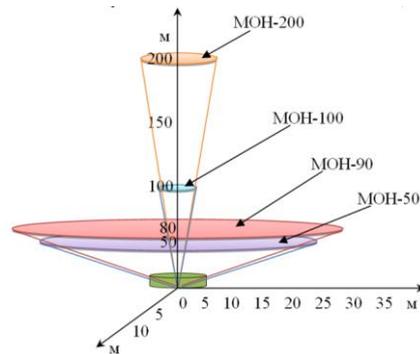


Рис. 3. Зоны сплошного поражения ( $P_{пор}=0,9$ ) осколочных мин направленного поражения

Из анализа параметров зон поражения можно сделать вывод, что наиболее подходящим инженерным боеприпасом исходя из соотношения дальности и величины зоны поражения для целей противодействия БЛА будет являться мина MOH-90. Дополнительно, с учетом самой большой дальности поражения, возможно прицельное применение мины MOH-200.

Для обоснования рационального количества и расположения мин MOH-90 (MOH-200) для противодействия БЛА по опыту вооруженного конфликта в Нагорном Карабахе выбрана наиболее характерная тактическая ситуация действий сторожевой заставы (опорного пункта) мотострелкового взвода в горных условиях.

В соответствии с боевым уставом [19] при подготовке и ведении обороны в горных районах учитывается возможность создания устойчивой обороны меньшими силами, сложность маневра войсками по фронту и из глубины. Оборона в горных районах строится отдельными опорными пунктами, подготовленными к круговой обороне и находящимися в огневой связи между собой. Промежутки между ними прикрываются огневыми засадами и инженерными заграждениями. Огневые средства располагаются ярусами на обратных скатах на удалении 100-200 м от топографического гребня высот. Система огня отделений при этом организуется таким образом, чтобы они находились в огневой связи между собой, обеспечивали круговую оборону и возможность сосредоточения огня основных средств на угрожаемом направлении в короткие сроки.

Соответственно, исходя из положений боевого устава [19] можно определить рациональное количество и расположение мин. Мины MOH-90 следует располагать по периметру опорного пункта с интервалом 50 м, обеспечивающим перекрытие зон поражения. Мины, в отличие от штатной установки, необходимо устанавливать на грунт боевой частью с надписью «к противнику» вверх (рис. 3). Безопасное расстояние от своих позиций определяется ТТХ мины [16, 17, 18] – не менее 50 м. С учетом требований [19] организации круговой обороны в горных районах для прикрытия опорного пункта взвода 200x200 м потребуются 16-20 мин MOH-90 (в зависимости от рельефа местности). Для прикрытия наиболее вероятных направлений или объектов (контрольно-пропускной пункт, позиции огневых средств) атаки БЛА следует прицельно применять мины MOH-200, обеспечивающие в два раза большую дальность поражения. Возможна эшелонированная установка мин с раздельным или одновременным подрывом для отражения нескольких налетов или массированных атак БЛА. Вариант установки мин MOH-90, MOH-200 с целью противодействия БЛА для случая прикрытия опорного пункта взвода показан на рис. 4

Обнаружение воздушного противника, атакующих или разведывательных БЛА организуется и непрерывно ведется методом визуального наблюдения. Разведка противника и местности в горных районах организуется большим, чем в обычных условиях, количеством наблюдателей [19].

Для разведки воздушного противника во взводе выставляется наблюдатель. В отделении наблюдение за противником ведется дежурным огневым средством. В ходе боя разведка наземного и воздушного противника ведется всем личным составом. Ночью и в других условиях ограниченной видимости наблюдение ведется с использованием приборов ночного видения, средств освещения и дополняется подслушиванием. Наблюдательный пост (наблюдатель) располагается в боевых порядках подразделений в местах, обеспечивающих наилучший просмотр противника. Пост оснащается приборами наблюдения, средствами связи, подсветки, подачи сигналов оповещения о воздушном противнике [19].

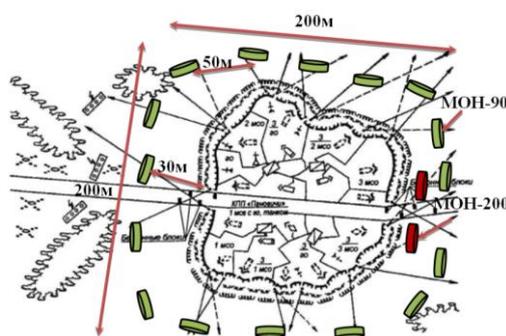


Рис. 4. Вариант установки мин МОН-90, МОН-200 с целью противодействия БЛА

Для удобства наблюдения и последовательного осмотра местности сектор наблюдения по глубине разбивается на зоны с привязкой к ориентирам: ближнюю – глубиной до 400 м; среднюю – от 400 м до 800 м и дальнюю – от средней зоны на глубину видимости. Наблюдение за воздушным противником ведется последовательным просмотром воздушного пространства, начиная от горизонта. Обнаружив воздушную цель, в том числе места раскрытия кассетных боевых частей ракет (бомб), наблюдатель немедленно подает сигнал оповещения, определяет характер воздушной цели, направление и высоту полета и докладывает командиру (старшему поста). Далее дается команда на подрыв мин в зоне поражения которых находится БЛА или по всему периметру, в зависимости от обстановки.

Кроме того, систему разведки БЛА должны дополнять силы и средства артиллерийской разведки, а также сеть постов визуального наблюдения, которая достаточно эффективна при обнаружении низколетящих малоразмерных целей. В состав средств визуального наблюдения таких постов следует включать средства оптико-электронной разведки круглосуточного наблюдения, способные обнаруживать малоразмерные, малоконтрастные цели [11, 20, 21]. Такие средства и комплексы уже имеются и производятся серийно предприятиями ОПК (рис. 5) [22].

Данные системы имеют в своем составе тепловизионный прибор, лазерный дальномер и сверхконтрастную камеру видимого диапазона, позволяющие получить максимальный объем информации о воздушной цели в оптическом диапазоне, кроме того они являются пассивными в режиме наблюдения, тем самым не привлекая внимания противорадиолокационных средств противника.



Рис. 5. Комплекс оптико-электронной разведки

Кроме физического поражения БЛА также необходимо принимать меры пассивной защиты. Места размещения личного состава и расположения боевой техники следует тщательно маскировать. Вблизи боевых машин (бронетранспортеров), танков следует оборудовать ложные позиции с установкой тепловых имитаторов.

**Выводы.** Обобщая изложенный материал, можно сделать вывод о том, что современные средства ПВО слабо приспособлены к борьбе против БЛА, особенно малоскоростных и малоразмерных, способных осуществлять активное маневрирование и применяемых группами [7]. Разработка специализированных средств (комплексов) противодействия БЛА занимает продолжительное время (5–15 лет) и потребует значительных затрат на создание, постановку серийного производства, закупку, поставку в войска и обучение личного состава.

Вместе с тем, для решения тактических задач прикрытия от атак БЛА опорных пунктов отдельных подразделений, выполняющих задачи в отрыве от основных сил, возможно применение имеющихся в наличии инженерных боеприпасов – осколочных мин направленного поражения МОН-90, МОН-200. Обеспечивающих приемлемую вероятность поражения низколетящих БЛА при их нахождении в секторе подрыва и разлета облака поражающих элементов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ Р 57258-2016. Системы беспилотные авиационные. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2018. – 22 с.
2. *Мураховский В.* Небо Карабаха // Арсенал Отечества. – 2020. – № 6 (50). – С. 14-17.
3. *Дульнев П.А., Сычев С.А., Гарвард А.В.* Основные направления развития тактики Сухопутных войск (по опыту вооруженного конфликта в Нагорном Карабахе) // Военная мысль. – 2021. – № 11. – С. 49-62.
4. *Афонин И.Е., Макаренко С.И., Петров С.В., Привалов А.А.* Анализ опыта боевого применения групп беспилотных летательных аппаратов для поражения зенитных ракетных комплексов системы противовоздушной обороны в военных конфликтах в Сирии, Ливии и Нагорном Карабахе // Системы управления, связи и безопасности. – 2020. – № 4. – С. 163-191.
5. *Мураховский В., Леонков А.* Учить тому, что нужно на войне // Арсенал Отечества. – 2021. – № 1 (51). – С. 12-16.
6. *Штигарь Н., Олейник А., Спичак Е.* Обнаружение и подавление БпЛА // Арсенал Отечества. – 2021. – № 1 (51). – С. 18-23.
7. *Макаренко С.И.* Противодействие беспилотным летательным аппаратам: монография. – СПб.: Научное издание, 2020. – 204 с.
8. *Макаренко С.И., Тимошенко А.В.* Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Ч. 2. Огневое поражение и физический перехват // Системы управления, связи и безопасности. – 2020. – № 1. – С. 147-197.
9. *Ростопчин В.В.* Ударные беспилотные летательные аппараты и противовоздушная оборона – проблемы и перспективы противостояния // Беспилотная авиация. – 2019. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/331772628\\_Udarnye\\_bespilotnye летательные\\_аппараты\\_и\\_противовоздушная\\_оборона\\_-\\_проблемы\\_и\\_перспективы\\_противостояния](https://www.researchgate.net/publication/331772628_Udarnye_bespilotnye летательные_аппараты_и_противовоздушная_оборона_-_проблемы_и_перспективы_противостояния) (дата обращения: 20.01.2022).

10. Скиба В.А., Кузьмин А.А. Анализ методов и средств противодействия беспилотным летательным аппаратам в интересах Ракетных войск стратегического назначения // Военная мысль. – 2021. – № 11. – С. 104-114.
11. Еремин Г.В., Гаврилов А.Д., Назарчук И.И. Организация системы борьбы с малоразмерными БПЛА // Арсенал Отечества. – 2014. – № 6 (14). – URL: <http://arsenal-otechestva.ru/new/389-antidrone> (дата доступа 20.01.2022).
12. Тимохин А. Решение проблемы «насыщающих» атак ПВО // Военное обозрение. – 2019. – URL: <https://topwar.ru/157073-reshenie-problemy-nasyschajuschih-atak-pvo-ono-est-i-nadnim-rabotajut.html> (дата доступа 20.01.2022).
13. Веремеенко С. Обнуление цифровой электроники // Арсенал Отечества. – 2021. – № 1 (51). – С. 38-40.
14. Лопаткин Д.В., Савченко А.Ю., Солоха Н.Г. К вопросу о борьбе с тактическими беспилотными летательными аппаратами // Военная мысль. – 2014. – № 2. – С. 41-47.
15. Российские противозенитные мины и зарубежная реакция // Военное обозрение. – URL: <https://topwar.ru/188195-rossijskie-protivovoznetnie-miny-i-zarubezhnaja-reakcija.html> (дата доступа 20.01.2022).
16. Колибернов Е.С., Корнев В.И., Сосков А.А. Справочник офицера инженерных войск / под ред. С.Х. Аганова. – М.: Воениздат, 1989. – 432 с.
17. МОН-100. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/МОН-100> (дата доступа 20.01.2022).
18. МОН-50. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/МОН-50> (дата доступа 20.01.2022).
19. Боевой устав по подготовке и ведению общевойскового боя. Ч. 3. Взвод, отделение, танк. – М.: Воениздат, 2005. – 201 с.
20. Бодров В.Н., Прудников Н.В., Панков С.Е. Многоканальные «смотрящие» ОЭС кругового и секторного обзора с высоким угловым разрешением и быстродействием // Технологии и материалы для экстремальных условий (прогнозные исследования и инновационные разработки): Матер. всероссийской научной конференции. – Звенигород: Межведомственный центр аналитических исследований в области физики, химии и биологии при Президиуме РАН, 2018. – С. 324-337.
21. Митрофанов Д.Г., Шишков С.В. Инновационный подход к вопросу обнаружения малогабаритных беспилотных летательных аппаратов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – № 1 (195). – С. 28-40.
22. АО «ЦНИИ «Циклон». Продукция. – URL: <http://cyclone.su/> (дата доступа 20.01.2022).

#### REFERENCES

1. GOST R 57258-2016. Sistemy bespilotnye aviatsionnye. Terminy i opredeleniya [GOST R 57258-2016. Unmanned aviation systems. Terms and definitions]. Moscow: Standartinform, 2018 22 p.
2. Murakhovskiy V. Nebo Karabakha [Sky of Karabakh], *Arsenal Otechestva* [Arsenal of the Fatherland], 2020, No. 6 (50), pp. 14-17.
3. Dul'nev P.A., Sychev S.A., Garvard A.V. Osnovnye napravleniya razvitiya taktiki Sukhoputnykh voysk (po opyту voozuzhennogo konflikta v Nagornom Karabakhe) [The main directions of the development of tactics of the Ground forces (based on the experience of the armed conflict in Nagorno-Karabakh)], *Voennaya mysl'* [Military Thought], 2021, No. 11, pp. 49-62.
4. Afonin I.E., Makarenko S.I., Petrov S.V., Privalov A.A. Analiz opyta boevogo primeneniya grupp bespilotnykh letatel'nykh apparatov dlya porazheniya zenitnykh raketnykh kompleksov sistemy protivovozdushnoy oborony v voennykh konfliktakh v Sirii, Livii i Nagornom Karabakhe [Analysis of the experience of combat use of groups of unmanned aerial vehicles to defeat anti-aircraft missile systems of the air defense system in military conflicts in Syria, Libya and Nagorno-Karabakh], *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti* [Control systems, communications and security], 2020, No. 4, pp. 163-191.
5. Murakhovskiy V., Leonkov A. Uchit' tomu, chto nuzhno na voyne [Teach what is needed in the war], *Arsenal Otechestva* [Arsenal of the Fatherland], 2021, No. 1 (51), pp. 12-16.
6. Shpigar' N., Oleynik A., Spichak E. Obnaruzhenie i podavlenie BpLA [Detection and suppression of UAVs], *Arsenal Otechestva* [Arsenal of the Fatherland], 2021, No. 1 (51), pp. 18-23.

7. *Makarenko S.I.* Protivodeystvie bespilotnym letatel'nykh apparatam: monografiya [Countering unmanned aerial vehicles: Monograph]. Saint Petersburg: Naukoemkie tekhnologii, 2020, 204 p.
8. *Makarenko S.I., Timoshenko A.V.* Analiz sredstv i sposobov protivodeystviya bespilotnym letatel'nykh apparatam. Ch. 2. Ognevoe porazhenie i fizicheskiy perekhvat [Analysis of means and methods of countering unmanned aerial vehicles. Part 2. Fire damage and physical interception], *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti* [Control, communication and security systems], 2020, No. 1, pp. 147-197.
9. *Rostopchin V.V.* Udarnye bespilotnye letatel'nye apparaty i protivovozdushnaya oborona – problemy i perspektivy protivostoyaniya [Shock unmanned aerial vehicles and air defense – problems and prospects of confrontation], *Bespilotnaya aviatsiya* [Unmanned aviation], 2019. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/331772628\\_Udarnye\\_bespilotnye\\_letatelnye\\_apparaty\\_i\\_protivovozdusnaa\\_oborona\\_problemy\\_i\\_perspektivy\\_protivostoania](https://www.researchgate.net/publication/331772628_Udarnye_bespilotnye_letatelnye_apparaty_i_protivovozdusnaa_oborona_problemy_i_perspektivy_protivostoania) (accessed 20 January 2022).
10. *Skiba V.A., Kuz'min A.A.* Analiz metodov i sredstv protivodeystviya bespilotnym letatel'nykh apparatam v interesakh Raketnykh voysk strategicheskogo naznacheniya [Analysis of methods and means of countering unmanned aerial vehicles in the interests of Strategic Missile Forces], *Voennaya mysl'* [Military thought], 2021, No. 11, pp. 104-114.
11. *Eremin G.V., Gavrilov A.D., Nazarchuk I.I.* Organizatsiya sistemy bor'by s malorazmernymi BPLA [Organization of a system for combating small-sized UAVs], *Arsenal Otechestva* [Arsenal of the Fatherland], 2014, No. 6 (14). Available at: <http://arsenal-otechestva.ru/new/389-antidrone> (accessed 20 January 2022).
12. *Timokhin A.* Reshenie problemy «nasyshchayushchikh» atak PVO [Solving the problem of "saturating" air defense attacks], *Voennoe obozrenie* [Military review], 2019. Available at: <https://topwar.ru/157073-reshenie-problemy-nasyshchajushchih-atak-pvo-ono-est-i-nad-nim-rabotajut.html> (accessed 20 January 2022).
13. *Veremeenko S.* Obnulenie tsifrovoy elektroniki [Zeroing digital electronics], *Arsenal Otechestva* [Arsenal of the Fatherland], 2021, No. 1 (51), pp. 38-40.
14. *Lopatkin D.V., Savchenko A.Yu., Solokha N.G.* K voprosu o bor'be s takticheskimi bespilotnymi letatel'nykh apparatami [On the issue of combating tactical unmanned aerial vehicles], *Voennaya mysl'* [Military thought], 2014, No. 2, pp. 41-47.
15. Rossiyskie protivovertoletnye miny i zarubezhnaya reaktsiya [Russian anti-helicopter mines and foreign reaction], *Voennoe obozrenie* [Military review]. Available at: <https://topwar.ru/188195-rossijskie-protivovertoletnye-miny-i-zarubezhnaya-reakcija.html> (accessed 20 January 2022).
16. *Kolibernov E.S., Kornev V.I., Soskov A.A.* Spravochnik ofitsera inzhenernykh voysk [Handbook of an officer of engineering troops], ed. by S.Kh. Aganova. Moscow: Voenizdat, 1989, 432 p.
17. MON-100. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/MON-100> (accessed 20 January 2022).
18. MON-50. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/MON-50> (accessed 20 January 2022).
19. Boevoy ustav po podgotovke i vedeniyu obshchevoyskovogo boya. Ch. 3. Vzvod, otdelenie, tank [Combat regulations for the preparation and conduct of combined arms combat. Part 3. Platoon, squad, tank]. Moscow: Voenizdat, 2005, 201 p.
20. *Bodrov V.N., Prudnikov N.V., Pankov S.E.* Mnogokanal'nye «smotryashchie» OES krugovogo i sektornogo obzora s vysokim uglovym razresheniem i bystrodeystviem [Multichannel "looking" OES of circular and sector survey with high angular resolution and speed], *Tekhnologii i materialy dlya ekstremal'nykh usloviy (prognoznnye issledovaniya i innovatsionnye razrabotki): Mater. vsrossiyskoy nauchnoy konferentsii* [Technologies and materials for extreme conditions (predictive research and innovative developments). Materials of the All-Russian scientific conference]. Zvenigorod: Mezhvedomstvennyy tsentr analiticheskikh issledovaniy v oblasti fiziki, khimii i biologii pri Prezidiume RAN, 2018, pp. 324-337.
21. *Mitrofanov D.G., Shishkov S.V.* Innovatsionnyy podkhod k voprosu obnaruzheniya malogabaritnykh bespilotnykh letatel'nykh apparatov [An innovative approach to the issue of detecting small-sized unmanned aerial vehicles], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2018, No. 1 (195), pp. 28-40.
22. AO «TSNII «Tsiklon». Produktsiya [JSC "Central Research Institute "Cyclone". Products]. Available at: <http://cyclone.su/> (accessed 20 January 2022).

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. И.В. Соколов.

**Соколов Николай Александрович** – Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центральный научно-исследовательский испытательный институт инженерных войск» Минобороны России; e-mail: cniiv@mail.ru; Нахабино, Россия; тел.: 89163658920; с.н.с.

**Рябухин Денис Алексеевич** – e-mail: cniiv@mail.ru; тел.: 89160096000; с.н.с.

**Sokolov Nikolay Aleksandrovich** – Federal State Budgetary Institution "Central Research and Testing Institute of Engineering Troops" of the Ministry of Defense of the Russian Federation; e-mail: cniiv@mail.ru; Nakhabino, Russia; phone: +79163658920; senior researcher.

**Ryabukhin Denis Alekseevich** – e-mail: cniiv@mail.ru; phone: +79160096000; senior researcher.

УДК 629.127.4, 623.958.2

DOI 10.18522/2311-3103-2022-1-29-42

**Н.А. Соколов, А.В. Рычков**

### **МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИЕ СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ МОРСКИХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ**

*В работе предложено применение морских мобильных роботов для противодействия минированию, обнаружения, классификации и локализации мин. В соответствии с предназначением выделены поисковые и разведывательные роботы для обследования акваторий, которые способны действовать автономно или в режиме телеуправления с поддержкой принятия решений. Проведен анализ возможностей существующих типов сенсорных систем для обследования акваторий. Представлены основные результаты теоретических и экспериментальных исследований возможных направлений совершенствования магнитометрических сенсорных систем для морских роботов. Предложено, исходя из критерия обеспечения наибольших возможностей морских роботов по обнаружению и темпу ведения поиска в автономном режиме, при известных массогабаритных ограничениях, построение магнитометрической сенсорной системы с автоматизированным распознаванием взрывоопасных объектов. Для целей автоматизированной классификации объектов поиска предложено воспользоваться преимуществом нейронных сетей, которые, в отличие от традиционного машинного обучения, обеспечивают возможность высокоуровневого абстрактного выражения семантики внутренних связей между данными посредством выбора вариантов архитектурных решений. Получена структура нейронной сети на основе линейной классификации взрывоопасных объектов по двум параметрам обучающей выборки. На основе проверенной обучающей выборки и классифицирующей функции по двум параметрам, для многоканальной магнитометрической системы разработана реализация структуры нейронной сети, учитывающей, кроме ферромагнитной массы и глубины залегания, параметры геометрической формы реальных взрывоопасных объектов. Определены направления совершенствования и увеличения дальности действия феррозондовых сенсоров, как наиболее подходящих для построения магнитометрических систем обнаружения морских мобильных роботов. Предложен способ повышения чувствительности феррозондовых магнитометрических сенсоров морских роботов за счет применения новых магнитных материалов и схмотехнических решений. Для создания высокочувствительных феррозондовых магнитометрических сенсоров предложено применение сердечников из аморфных сплавов на основе кобальта типа АМАГ-170, обеспечивающих потенциальную возможность повышения коэффициента преобразования (чувствительности) сенсорной системы за счет увеличения частоты возбуждения сердечника феррозонда. Представлена функциональная схема макета разработанной магнитометрической феррозондовой сенсорной системы на основе двух стержневых сердечников из аморфного сплава АМАГ-170.*

*Морские роботы; сенсорные системы; поиск морских мин; магнитометрия; феррозонд; феррозондовые преобразователи магнитного поля; магнитометр.*

N.A. Sokolov, A.V. Rychkov

## MAGNETOMETRIC SENSOR SYSTEMS FOR MARINE MOBILE ROBOTS

*The paper proposes the use of marine mobile robots to counter mining, detection, classification and localization of mines. In accordance with the purpose, search and reconnaissance devices have been identified for the survey of water areas that are capable of operating autonomously or in remote control mode with decision-making support. The analysis of existing types of sensor systems for the survey of water areas is carried out. The main results of theoretical and experimental studies of ways to improve magnetometric sensor systems of marine robots are presented. It is proposed, based on the criterion of ensuring the greatest capabilities of marine robots for detecting and the pace of searching in offline mode with known weight and size limitations, the construction of a magnetometric sensor system with automated recognition of explosive objects. For the purposes of automated classification of search objects, it is proposed to take advantage of neural networks, which, unlike traditional machine learning, provide the possibility of high-level abstract expression of the semantics of internal connections between data by choosing architectural solutions. The structure of the neural network is obtained based on the linear classification of explosive objects according to two parameters of the training sample. Based on a proven training sample and a classifying function by two parameters, for a multichannel magnetometric system, an implementation of the neural network structure has been developed that takes into account, in addition to the ferromagnetic mass and depth of occurrence, the parameters of the geometric shape of real explosive objects. The directions of improving and increasing the range of ferrosonde sensors as the most suitable for the construction of magnetometric detection systems for marine mobile robots are determined. A method is proposed to increase the sensitivity of ferrosonde magnetometric sensors of marine robots through the use of new magnetic materials and circuit solutions. To create highly sensitive ferrosonde magnetometric sensors, the use of cores made of amorphous cobalt-based alloys of the AMAG-170 type is proposed, providing a potential opportunity to increase the conversion coefficient (sensitivity) of the sensor system by increasing the excitation frequency of the core of the ferrosonde. The functional diagram of the layout of the developed magnetometric ferrosonde sensor system based on two rod cores made of amorphous alloy AMAG-170 is presented.*

*Marine robots; sensor systems; search for sea mines; magnetometry; ferrosonde; ferrosonde magnetic field converters; magnetometer.*

**Введение.** В настоящее время во всех странах идет активная разработка морских мобильных надводных и подводных роботов. Так США с 2017 г. в ВМС принята концепция «Призрачный флот», согласно которой беспилотники будут синхронно взаимодействовать, и выполнять боевые задачи. Осуществление данной концепции будет означать серьезные изменения в строительстве и применении флота. В России также усилия направлены на разработку автономных необитаемых подводных аппаратов-роботов с использованием в их системах управления элементов искусственного интеллекта [1].

В соответствии с предназначением можно выделить поисковые и разведывательные устройства для обследования акваторий, которые способны действовать автономно или в режиме телеуправления с поддержкой принятия решений.

Одной из основных задач подобных устройств будет противодействие минированию, обнаружение, классификация и локализация мин. Успешность выполнения данной задачи будет в свою очередь определяться номенклатурой применяемых сенсорных систем, таких, как: оптические, гидролокационные и датчики различных физических полей [2].

**Состояние вопроса.** Применение морских мобильных роботов позволяет или полностью исключить, или существенно снизить опасное воздействие на человека мероприятий по поиску взрывоопасных предметов (ВОП), а также вредных факторов глубоководных работ [3].

На морских мобильных роботах, как правило, устанавливается полный комплекс систем и устройств, обеспечивающих самостоятельное движение. Для применения под водой, большинство из них имеют торпедообразную форму корпуса, оснащены энергетической установкой, состоящей из аккумуляторной батареи и гребного электродвигателя (рис. 1) [4].



Рис. 1. Внешний вид подводного морского робота

Движение морских роботов при обследовании акваторий с целью обнаружения ВОП должно осуществляться по траектории связанных галсов, обеспечивающих перекрытие зон обнаружения сенсоров и охват всей обследуемой площади (рис. 2,а).

Как правило, бортовые системы обнаружения морских мобильных роботов включают оптические и гидролокационные сенсоры (локаторы бокового и курсового обзора, профилограф и т.п.). Которые достаточно хорошо обеспечивают обнаружение объектов в относительно благоприятных условиях среды. Например, расположенных в толще воды (между поверхностью и дном). Это наиболее простой случай, поскольку исключается влияние шума, возникающего при отражении волны от дна и объектов, расположенных на дне, на результат. Однако наличие помех значительно снижает достоверность результатов визуального осмотра дна и гидролокации, так как искомые объекты в момент проведения обследования могут быть полностью или частично укрыты, например, донными отложениями, покровом водорослей, и т.п. [5] (рис 2,б).

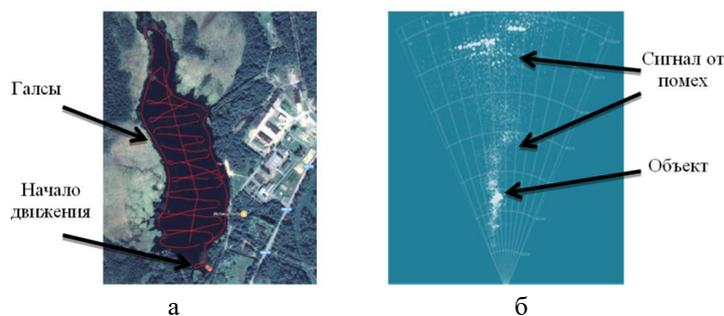


Рис. 2 Пример обследования акватории в сложных условиях:  
а – траектории галсов; б – экран гидролокатора курсового обзора

Среди существующих методов обнаружения скрытых объектов можно выделить метод измерений магнитных аномалий естественного магнитного поля Земли, который широко применяется в задачах геофизических и радиофизических исследований, и позволяет обнаруживать ВОП по косвенным признакам в условиях оптических и гидроакустических помех [6, 7].

Актуальность применения метода измерений магнитных аномалий при обследовании акваторий морскими мобильными роботами обусловлена наличием у большинства (не менее 85 %) морских и противодесантных мин, а также других

возможных взрывоопасных предметов ферромагнитного корпуса или ферромагнитных компонентов в конструкции [3]. Несмотря на то, что известные магнитометры имеют высокий уровень технических характеристик, еще остаются направления их совершенствования, такие, как:

- ◆ применение новых методов обработки сигналов, в том числе с применением алгоритмов, обеспечивающих распознавание объектов поиска.
- ◆ применение новых конструкционных материалов при разработке чувствительных элементов первичных преобразователей магнитного поля;
- ◆ применение новых схемотехнических решений при разработке электронных схем сенсоров.

**Применение новых методов обработки сигналов.** Возможности магнитометрического метода поиска любого взрывоопасного предмета ограничены наличием в его оболочке ферромагнитного материала (чем больше, тем лучше), поэтому не все предметы обнаруживаются с хорошей достоверностью. Потенциально обнаруживаются с высокой долей надежности фугасы, противодесантные или морские мины, авиационные бомбы, крупнокалиберные снаряды и минометные боеприпасы (не менее 76 мм), и т.д. [8]. На рис. 3 показаны характерные объекты поиска [9, 10].



Рис. 3. Характерные объекты поиска

Для целей автоматизированной классификации объектов поиска при выполнении задач противодействия минированию, обнаружения, классификации и локализации мин морскими мобильными роботами следует воспользоваться преимуществами нейронных сетей, которые, в отличие от традиционного машинного обучения, обеспечивают возможность высокоуровневого абстрактного выражения семантики внутренних связей между данными посредством выбора вариантов архитектурных решений [11]. Классификация ВОП по величине зарегистрированного полезного сигнала и вычисленного (на его основе) магнитного момента, глубины залегания и параметров формы (разнос экстремумов амплитуд сигналов) для «больших» предметов, например, авиабомб или морских мин, и т.п. обладает достаточной достоверностью и может быть на уровне 0,9...0,95 [12].

На основе полученной обучающей выборки (табл. 1) и классифицирующей функции по двум параметрам, для многоканальной магнитометрической системы возможна реализация структуры нейронной сети, учитывающей, кроме ферромагнитной массы и глубины залегания (проникновения в грунт), параметры геометрической формы реальных объектов поиска [13].

Таблица 1

Полученные усредненные значения статистических данных ВОП

Магнитный момент, Ам <sup>2</sup>	Глубина залегания (в грунт), м	Длина, м
0,18	0,10	0,2
0,25	0,40	0,33
0,75	1,20	0,6
0,90	0,20	0,3
1,80	2,10	1,1
2,60	3,40	1,6
5,00	2,30	1,1
9,50	3,30	1,5
20,00	6,50	1,9
50,00	6,80	2,5

Простая нейронная сеть состоит из одного входного слоя и одного выходного [14]. Базовая структура сети показана на рис. 4. Цель работы сети заключается в том, чтобы научиться предсказывать значения переменной класса для случаев, в которых за ней не осуществлялось наблюдение, и далее проводить классификацию обнаруженных магнитных аномалий по принадлежности к ВОП.

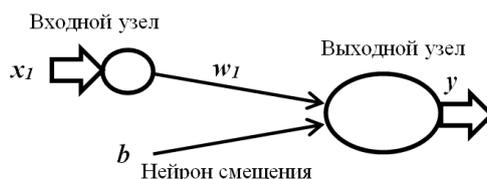


Рис. 4. Базовая архитектура однослойной нейронной сети

В первом приближении для упрощения задания классифицирующей функции на основе обучающей выборки (табл. 1) возможна классификация по двум параметрам. За значение  $x_1$  принимается магнитный момент  $M$ , Ам<sup>2</sup>, за значение  $y$  – глубина залегания ВОП в грунте, м. Распределение статистических данных обучающей выборки по ВОП для лучшего представления входных данных показано на рис. 5.

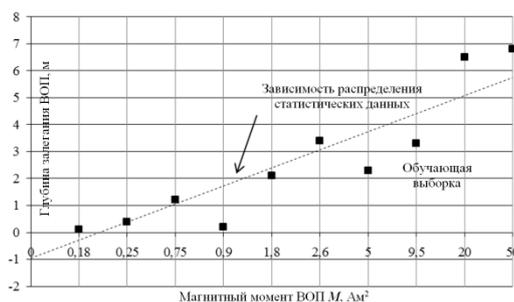


Рис. 5. Полученное распределение статистических данных обучающей выборки

Из рис. 5 следует, что распределение статистических данных имеет линейную зависимость, где данные находятся около значений условной линии. Для однослойной сети набор входов непосредственно транслируется на выход путем использования обобщенного варианта линейной функции [14]:

$$y = \sum_{i=1}^d w_i x_i, \quad (1)$$

Задача нейронной сети – провести классификацию ВОП относительно линейной функции, несмотря на то, что данные по всем точкам отсутствуют. Выражение классифицирующей функции по двум параметрам будет иметь вид [14]:

$$y = w_l x_l + b, \quad (2)$$

где  $y$  – предсказанное (расчетное) значение классифицирующей функции,  $x_l$  – значение аргумента функции из обучающей выборки,  $w_l$  – весовой коэффициент,  $b$  – коэффициент смещения функции (на начальном этапе построения сети равен 0).

Первоначальное значение коэффициентов может быть любым, и в программной реализации задается командой установки случайных чисел, а далее производится обучение нейронной сети и корректировка коэффициентов классифицирующей функции. Так для  $x = 5$  из обучающей выборки (табл. 1), при случайном значении  $w_l = 0,1$  и  $b = 0$  получено расчетное значение  $y = 0,5$ , однако соответствующее целевое значение из обучающей выборки составляет  $Y = 2,3$ .

Для корректировки результата применяется функция ошибки [14]:

$$E(x) = Y - y. \quad (3)$$

В данном случае  $E(5) = 1,8$ . После определения ошибки  $E$  проводится обновление коэффициентов и обучение классифицирующей функции через их взаимосвязь [14]:

$$W = w + \Delta w, \quad (4)$$

где  $W$  – искомое значение весового коэффициента,  $\Delta w_l$  – шаг изменения весового коэффициента.

Тогда целевое значение  $Y$  классифицирующей функции будет определяться [14]:

$$Y = (W + \Delta W)X. \quad (5)$$

Отсюда значение ошибки  $E = \Delta w \cdot x$ , а изменение весового коэффициента [13]:

$$\Delta w = E/x. \quad (6)$$

При  $x = 5$ ,  $w_l = 0,1$ ,  $E = 1,8$  значение изменения весового коэффициента составит  $\Delta w = 0,36$ . Тогда обновленное значение  $W = w + \Delta w = 0,46$ .

Проверка классифицирующей функции после обучения показывает  $y = Wx = 2,3$ , т.е., значение функции совпало с искомым значением из обучающей выборки (табл. 1). Далее, на основе определенного изменения весового коэффициента  $\Delta w = 0,36$ , проводится обучение нейронной сети на следующем значении  $x$  из обучающей выборки.

Для целевого значения  $Y = 0,2$  при  $x = 0,9$  и определенного  $\Delta w = 0,36$  расчетное значение классифицирующей функции составит  $y = wx = 0,324$ . Т.е.,  $y \neq Y$ , и необходим повтор действий по корректировке классифицирующей функции.

После очередного цикла обучения значение ошибки по (3) составит  $E(0,9) = -0,124$ , тогда по (6) новое  $\Delta w = -0,138$ , а обновленное значение  $W = 0,23$ .

Проверка правильности обучения классифицирующей функции на очередном значении данных из обучающей выборки (табл. 1) показывает, что при обновленных коэффициентах функция определяет в качестве результата значение  $y = 0,2 = Y$ , которое и является целевым показателем.

Из приведенных расчетных данных следует, что классифицирующая функция при такой структуре нейронной сети после обучения разделяется по объектам поиска, что в дальнейшем может вносить ошибку классификации ВОП. Поэтому для сглаживания функции вводится коэффициент скорости обучения  $L$ , который необходим для исключения скачков данных [14]:

$$\Delta w = L(E/x). \quad (7)$$

Коэффициент  $L$  определяется имеющимися вычислительными мощностями и временем обучения нейронной сети. При  $L = 0,5$ ,  $x = 5$  и  $w_1 = 0,1$  прогноз классифицирующей функции на первом шаге останется прежним  $y = 0,5$ , однако поправка по (7) составит  $\Delta w = 0,18$ , и тогда  $W = 0,28$ . Следовательно, сглаженное значение классифицирующей функции после обучения  $y(5) = 1,4$ . Применяя обновленное на первом прогоне  $W$  для второго значения обучающей выборки  $x = 20$ , получаем  $y = 5,6$ . Тогда по (3) ошибка  $E = 0,9$ , расчетное значение по (7)  $\Delta w = 0,0225$ , и обновленное по (4)  $W = 0,3$ . Отсюда сглаженная классифицирующая функция после обучения  $y(20) = 6,05$ . Начальный, улучшенный и обученный варианты классифицирующей функции показаны на рис. 6.

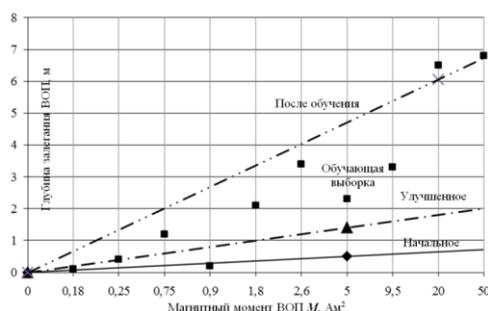


Рис. 6. Полученная эволюция функции классификации ВОП

Полученная структура нейронной сети на основе линейной классификации ВОП по двум параметрам обучающей выборки показывает удовлетворительные результаты. Однако не в полной мере учитывает особенности геометрической формы реальных ВОП и больше подходит для применения в одноканальных магнитометрических системах. Реальные предметы, в том числе ВОП, имеют полюса – положительный, откуда силовые линии выходят, и отрицательный, куда силовые линии входят, здесь концентрация силовых линий максимальная. Следовательно, вблизи этих точек магнитная индукция также максимальная, что и должно выявляться по карте магнитных аномалий. Как правило, полюса располагаются на крайних гранях максимального размера объекта в силу анизотропии формы [3]. Определение местоположения полюсов предмета позволяет уточнить его ориентацию в грунте и оценить геометрическую форму, а значит сделать процесс разминирования более контролируемым. Подобная оценка возможна, если карта магнитных аномалий построена с достаточно высокой точностью, что обеспечивается применением многоканальной магнитометрической системы [15, 16].

На основе проверенной обучающей выборки (табл. 1) и классифицирующей функции по двум параметрам, для многоканальной магнитометрической системы следует применить реализацию структуры нейронной сети, учитывающую, кроме ферромагнитной массы и глубины залегания, параметры геометрической формы реальных объектов поиска. Структура разработанной сети показана на рис. 7.

Для создания алгоритма работы подобной структуры возможно применение метода градиентного спуска для минимизации квадрата ошибки предсказания по отношению к случайно выбираемым тренировочным точкам [17, 18]. Функция классификации ВОП нейронной сетью (рис. 7) по трем параметрам в многоканальной магнитометрической системе будет иметь следующий вид:

$$y = w_1x_1 + w_2x_2 + w_3x_3, \quad (8)$$

где  $y$  – глубина залегания ВОП, м (в данном случае целевое значение, которое может меняться),  $x_1$  – магнитный момент  $M$ , Ам<sup>2</sup>,  $x_2$  – длина ВОП, м,  $x_3$  – пороговое значение магнитного момента  $M$ , Ам<sup>2</sup>,  $w_1$ ,  $w_2$ ,  $w_3$  – весовые коэффициенты.

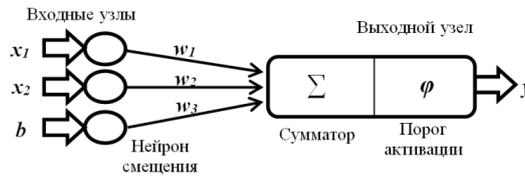


Рис. 7. Структура разработанной нейронной сети классификации объектов поиска в многоканальной магнитометрической системе

При увеличении количества входов данных нейронной сети необходимо задание условия, которое будет согласовывать весовые коэффициенты, уменьшая ошибку  $E$  с каждым проходом цикла в алгоритме программы. В случае применения метода градиентного спуска функция ошибки будет иметь вид [19]:

$$\frac{dE}{dw_{ij}} = \frac{d(Y-y)^2}{dw_{ij}}, \tag{9}$$

где  $w_{ij}$  – весовой коэффициент связи нейронов в цепи. Упрощая можно получить  $dE/dw_{ij} = -(Y - y) x_i$  (тут и далее  $x_i$  – количество входов сети).

Отсюда

$$\Delta w_{ij} = dE/dw_{ij}. \tag{10}$$

Аналогично

$$W = w_{ij} - L(dE/dw_{ij}). \tag{11}$$

Сумматор (рис. 6) агрегирует все входные сигналы во взвешенную сумму, далее для ее обработки применяется функция активации по порогу превышения  $M$  от уровня магнитного мусора [14].

Разработанный алгоритм классификации ВОП нейронной сетью (рис. 7) по трем параметрам в зависимости от данных по магнитному моменту, глубине залегания и параметров геометрии формы, показан на рис. 8.

Алгоритм позволяет основе проверенной обучающей выборки предсказывать значения переменной класса для случаев, в которых за ней не осуществлялось наблюдение и далее проводить классификацию входных данных по принадлежности к ВОП.

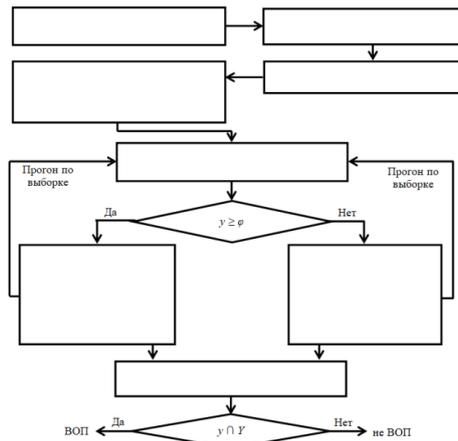


Рис. 8. Разработанный алгоритм классификации ВОП нейронной сетью в многоканальной магнитометрической системе

Для работы алгоритма нейронной сети данные, на начальном этапе обучения, могут подаваться из массива обучающей выборки для типовых объектов поиска или вводится непосредственно в «полевых» условиях путем запоминания параметров, обнаруженных ВОП при выполнении поисковых задач.

**Применение новых конструкционных материалов.** Анализ существующих типов преобразователей магнитного поля показал, что наиболее подходящими для построения магнитометрических сенсорных систем для морских мобильных роботов по совокупности характеристик являются феррозондовые. Они обладают более высокой надежностью и стойкостью к внешним воздействиям, меньшей себестоимостью (по сравнению с другими типами датчиков) ввиду технических и технологических особенностей производства данных изделий [19]. При том, что информационный сигнал феррозондового датчика содержит данные о величине и направлении действия вектора измеряемого магнитного поля.

При разработке магнитометрических сенсорных систем для морских мобильных роботов необходимо обеспечить максимальную дальность обнаружения, которая в общем случае определяется их чувствительностью [7].

Повышение чувствительности возможно за счет применения новых магнитных материалов и схмотехнических решений. Известно выражение характеризующее зависимость параметров дифференциального феррозонда от характеристик магнитопровода [20]

$$E_2 = 4 \omega S N_2 H_0 \mu_0 \mu_2, \text{ [мВ]}, \quad (12)$$

где  $E_2$  – амплитуда напряжения в сигнальной обмотке, охватывающей оба сердечника [мВ],  $\omega$  – циклическая частота возбуждения сердечника феррозонда [рад/мс],  $S$  – поперечное сечение сердечника [мм<sup>2</sup>],  $N_2$  – количество витков вторичной обмотки,  $H_0$  – внешнее поле направленное вдоль сердечников [А/м],  $\mu_0$  – магнитная постоянная [Гн/м],  $\mu_2$  – относительная магнитная проницаемость материала сердечника.

Из (12) видно, что при прочих равных условиях, например одинаковых конструктивных параметрах феррозонда, всегда имеется резерв повышения его чувствительности (коэффициента преобразования) за счет увеличения частоты возбуждения сердечника. В свою очередь, рабочая частота возбуждения сердечников феррозонда определяется магнитными свойствами материала, из которого они изготовлены.

В течение последних десятилетий объектом интенсивного изучения являются аморфные и нанокристаллические магнитные сплавы. Они проявили себя как новые перспективные материалы, привлекающие новыми возможностями их практического использования. К числу магнитных материалов с рекордно высокой магнитной проницаемостью, превосходящей проницаемость лучших пермаллоев, и одновременно обладающих высокой прочностью и пластичностью, относятся аморфные магнитомягкие материалы на основе кобальта. Их максимальная магнитная проницаемость достигает значений  $\mu_{\text{макс}} = 105 \dots 106$ , коэрцитивная сила  $H_C$  составляет около 0,002 А/см, а электросопротивление в два-три раза выше электросопротивления пермаллоев [21].

Для оценки параметров и определения оптимального материала для изготовления сердечника испытаны образцы пермаллового сплава 80НХС и аморфных сплавов 84КХСР, 82КЗХСР и АМАГ-170 (рис. 9).

Из полученной зависимости (рис. 9) следует, что для создания высокочувствительных феррозондовых датчиков целесообразно применение сердечников из аморфных сплавов на основе кобальта типа АМАГ-170, обеспечивающих работу в полосе частот до 100 кГц, и имеющих потенциальную возможность повышения коэффициента преобразования (чувствительности) датчика за счет увеличения частоты возбуждения сердечника феррозонда.

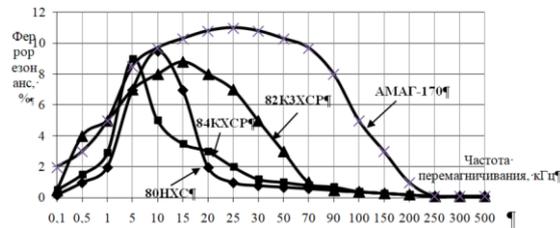


Рис. 9. Экспериментально полученные зависимости величины феррорезонанса от частоты перемагничивания сердечников

**Применение новых схемотехнических решений.** В настоящее время в схемах возбуждения и преобразования полезного сигнала феррозондовых сенсоров широко применяются электронные усилители напряжения. Однако их применение в целях совершенствования магнитометрических сенсорных систем морских мобильных роботов имеет ряд недостатков (ограничения по снижению массогабаритных, энергетических показателей и т.п.) [22].

При батарейном питании (от 1,5 до 3 В) автономных роботов исключить недостатки, присущие схемам, основанным на усилении напряжения полезного сигнала, позволит применение электронных усилителей тока. Благодаря этому возможно реализовать предельные возможности феррозондовых сенсорных систем [23].

Функциональная схема макета разработанной феррозондовой сенсорной системы на основе двух стержневых сердечников из аморфного сплава АМАГ–170 показана на рис. 10.



Рис. 10. Функциональная схема разработанной феррозондовой сенсорной системы

Разработанная феррозондовая сенсорная система (рис. 10) состоит из двух сердечников из аморфного ферромагнитного сплава АМАГ–170, усилителя  $DA1$  импульсного тока возбуждения, катушек возбуждения  $L_{B1}$ ,  $L_{B2}$ , измерительных катушек  $L1$ ,  $L2$ , конденсаторов  $C1$ ,  $C2$ , образующих измерительный колебательный контур, усилителей тока  $DA3$ ,  $DA4$ , включенных в режиме повторителей напряжения, обмотки отрицательной обратной связи  $L_{ООС}$ , резистора отрицательной обратной связи  $R_{ООС}$ , и усилителя постоянного тока  $DA2$  в цепи обратной связи. Для создания в объеме сердечников магнитного поля обмотки  $L_{B1}$ ,  $L_{B2}$  возбуждаются переменным током через усилитель  $DA1$ . Разработанная феррозондовая сенсорная система отличается от известных конструкций [24] применением сердечников из аморфного сплава АМАГ-170 с заданными расчетными размерами  $40 \times 2 \times 0,02$  мм, и возбуждением их слабым током с использованием глубокой отрицательной обратной связи.

На рис. 11 представлена передаточная характеристика макета разработанной феррозондовой сенсорной системы для различных частот возбуждения сердечника из аморфного сплава АМАГ-170.

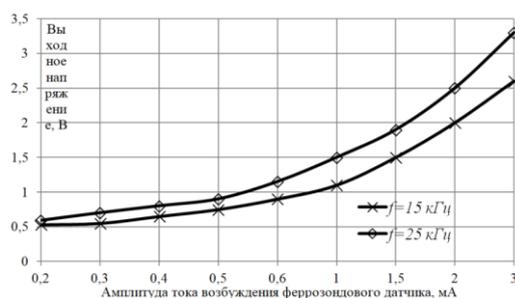


Рис. 11. Экспериментально полученная передаточная характеристика разработанной феррозондовой сенсорной системы

Анализ зависимостей, представленных на рис. 11 показывает, что передаточная характеристика разработанной феррозондовой сенсорной системы возрастает при работе на более высокой частоте ( $f = 25$  кГц) возбуждения сердечника.

**Заключение.** Таким образом, применение морских мобильных роботов для обнаружения, классификации и локализации мин является перспективным направлением их развития. Актуальность применения в аппаратном оснащении морских роботов магнитометрических сенсорных систем при выполнении задач обследования акваторий обусловлена наличием у большинства (не менее 85 %) морских и противодесантных мин ферромагнитного корпуса или ферромагнитных компонентов в конструкции. Совершенствование магнитометрических сенсорных систем морских роботов возможно по нескольким направлениям:

- ◆ применение новых методов обработки сигналов для обнаружения взрывоопасных предметов;
- ◆ применение новых конструкционных материалов и схемотехнических решений.

Реализация данных методов позволит повысить чувствительность феррозондовых магнитометрических сенсорных систем и темп поиска. При этом обеспечивается автоматизированная обработка поисковых данных и классификации обнаруженных магнитных аномалий по принадлежности к ВОП, что делает процесс поиска более контролируемым и безопасным. Новизна предложенных технических решений подтверждается патентами РФ на феррозондовый магнитометрический датчик № 2757650 [25], и свидетельством РФ на программу для ЭВМ № 2021617334 [26].

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дыбов В., Подгорных Ю. Робототехника в вооруженных силах // Арсенал Отечества. – 2021. – № 1 (51). – С. 60-65.
2. Быкова В.С., Машошин А.И., Пашкевич И.В. Алгоритм маневрирования автономного необитаемого подводного аппарата при проводке судна через заминированный район // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 1 (218). – С. 93-101.
3. Соколов Н.А. Рычков А.В. Повышение поисковых возможностей автономных необитаемых подводных аппаратов за счет применения многоканальных магнитометрических систем // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 1 (218). – С. 59-72.
4. Центральное конструкторское бюро морской техники «Рубин». – [http://ckb-rubin.ru/ckb\\_mt\\_rubin/](http://ckb-rubin.ru/ckb_mt_rubin/) (дата обращения: 05.05.2021).
5. Ольховский С.В., Степанов А.В. Магнитометрические разведки в акватории Фанагории // Вопросы подводной археологии. – 2013. – № 1. – С. 53-58.

6. *Звездинский С.С., Парфенцев И.В.* Метод магнитометрического обнаружения взрывоопасных предметов // Специальная техника. – 2008. – № 2. – С. 8-17.
7. *Щербаков Г.Н., Анцеливич М.А.* Новые методы обнаружения скрытых объектов: борьба с терроризмом, гуманитарное разминирование, защита информации, контроль подземных коммуникаций, археология, экология. – М.: Эльф ИПР, 2011. – 503 с.
8. *Billings S., Pasion C., Walker S., Beran L.* Magnetic models of unexploded ordnance // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2006. – Vol.: 44, Issue 8. – P. 2115-2124.
9. Системы минирования. АО «НИИИ». – URL: [http://aoniii.ru/?page\\_id=294](http://aoniii.ru/?page_id=294) (дата обращения: 23.12.2021).
10. Минное оружие. АО «Концерн морское подводное оружие – Гидроприбор». – URL: <https://gidropribor.ru/production/mines/> (дата обращения: 23.12.2021).
11. *Келлехер Дж., Мак-Нейми Б., д'Арси А.* Основы машинного обучения для аналитического прогнозирования. Алгоритмы, рабочие примеры и тематические исследования: пер. с англ. – СПб.: Диалектика, 2019. – 656 с.
12. *Tim Gätcke.* Working with Vallon Magnetometers. General Background for Operators and Trainers. – VALLON GmbH: Germany, 2019. – 54 p.
13. Детекторы и системы для разминирования. Мины, самодельные взрывные устройства, боевые элементы и неразорвавшиеся боеприпасы. – Энинген. Германия: Валлон, 2021. – 47 с.
14. *Аггарвал Ч.* Нейронные сети и глубокое обучение: учебный курс: пер. с англ. – СПб.: Диалектика, 2020. – 752 с.
15. *Рычков А.В., Щербаков Г.Н., Соколов Н.А., Рябухин Д.А.* К вопросу создания дорожных инженерных разведывательных машин с многоканальными системами обнаружения взрывоопасных предметов // Безопасность жизнедеятельности. – 2021. – № 11. – С. 51-60.
16. *Соколов Н.А., Шастин И.Д., Рябухин Д.А., Рудаков И.А.* Четырехзондовый магнитометрический искатель. Патент Российской Федерации от 30.11.2020 № RU201140U1.
17. *Паттанаяк С.* Глубокое обучение и TensorFlow для профессионалов: пер. с англ. – СПб.: Диалектика, 2020. – 480 с.
18. *Раика С., Мирджалили В.* Python и машинное обучение. Машинное и глубокое обучение с использованием Python, Scikit-Learn и TensorFlow. – СПб.: Диалектика, 2019. – 420 с.
19. *Амеличев В.В., Абанин В.В. и др.* Развитие технологий магнитополупроводниковых микросистем // Известия ВУЗов. Электроника. – 2015. – Т. 20, № 5. – С. 505-510.
20. *Власкин К.И.* Разработка электромагнитных систем малогабаритных первичных преобразователей феррозондового типа: дисс. ... канд. техн. наук. – Ижевск: ИжГТУ им. М.Т. Калашникова, 2014. – 150 с.
21. *Мушников Н.В., Попов А.Г., Потапов А.П., Лукишина В.А.* Нанокристаллические магнитные материалы. Физика магнитных материалов и наноструктур / под ред. В.В. Устинова, Н.В. Мушникова, В.Ю. Ирхина. – Екатеринбург: Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, 2020. – 664 с.
22. Классификация электронных усилителей. – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Классификация\\_электронных\\_усилителей](https://ru.wikipedia.org/wiki/Классификация_электронных_усилителей) (дата обращения: 20.11.2021).
23. *Рычков А.В., Соколов Н.А., Щербаков Г.Н., Прохоркин А.Г., Феценко Я.В.* Повышение чувствительности феррозондовых преобразователей магнитного поля для переносных магнитометров // Боеприпасы. – 2021. – № 2. – С. 70-76.
24. *Афанасьев Ю.В.* Феррозондовые приборы. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 187 с.
25. *Соколов Н.А.* Феррозондовый магнитометрический датчик. Патент РФ на изобретение от 19.10.2021 № 2757650.
26. *Соколов Н.А.* Программа обработки сигналов в многоканальном магнитометрическом обнаружителе. Свидетельство РФ на программу для ЭВМ от 13.05.2021 № 2021617334.

## REFERENCES

1. *Dybov V., Podgornykh Yu.* Robototekhnika v vooruzhennykh silakh [Robotics in the Armed Forces], *Arsenal Otechestva* [Arsenal of the Fatherland], 2021, No. 1 (51), pp. 60-65.
2. *Vykova V.S., Mashoshin A.I., Pashkevich I.V.* Algoritm manevrirovaniya avtonomnogo neobitaемого podvodnogo apparata pri provodke sudna cherez zaminirovannyy rayon [Increasing the search capabilities of autonomous uninhabited underwater vehicles through the use of multichannel magnetometric systems], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. 1 (218), pp. 93-101.

3. Sokolov N.A., Rychkov A.V. Povyshenie poiskovykh vozmozhnostey avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov za schet primeneniya mnogokanal'nykh magnetometricheskikh sistem [Increasing the search capabilities of autonomous uninhabited underwater vehicles through the use of multichannel magnetometric systems], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. 1 (218), pp. 59-72.
4. Tsentral'noe konstruktorskoe byuro morskoy tekhniki «Rubin» [Central Design Bureau of marine equipment "Rubin"]. Available at: [http://ckb-rubin.ru/ckb\\_mt\\_rubin/](http://ckb-rubin.ru/ckb_mt_rubin/) (accessed 05 May 2021).
5. Ol'khovskiy S.V., Stepanov A.V. Magnitometricheskie razvedki v akvatorii Fanagorii [Magnetometric surveys in the Phanagoria water area], *Voprosy podvodnoy arkhologii* [Questions of underwater archaeology], 2013, No. 1, pp. 53-58.
6. Zvezhinskiy S.S., Parfentsev I.V. Metod magnitometricheskogo obnaruzheniya vzryvoopasnykh predmetov [Method of magnetometric detection of explosive objects], *Spetsial'naya tekhnika* [Special technique], 2008, No. 2, pp. 8-17.
7. Shcherbakov G.N., Antselevich M.A. Novye metody obnaruzheniya skrytykh ob'ektov: bor'ba s terrorizmom, gumanitarnoe razminirovanie, zashchita informatsii, kontrol' podzemnykh kommunikatsiy, arkhologiya, ekologiya [New methods of detecting hidden objects: combating terrorism, humanitarian demining, information protection, control of underground communications, archeology, ecology]. Moscow: El'f IPR, 2011, 503 p.
8. Billings S., Pasion C., Walker S., Beran L. Magnetic models of unexploded ordnance, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, Vol.: 44, Issue 8, pp. 2115-2124.
9. Sistemy minirovaniya. AO «NIII» [Mining systems. JSC "NIII"]. Available at: [http://aoniii.ru/?page\\_id=294](http://aoniii.ru/?page_id=294) (accessed 23 Desember 2021).
10. Minnoe oruzhie. AO «Kontsern morskoe podvodnoe oruzhie – Gidropribor» [Mine weapons. JSC "Concern marine underwater weapons – Hydropribor"]. Available at: <https://gidropribor.ru/production/mines/> (accessed 23 Desember 2021).
11. Kellekher. Dzh., Mak-Neymi B., d'Arsi A. Osnovy mashinnogo obucheniya dlya analiticheskogo prognozirovaniya. Algoritmy, rabochie primery i tematicheskie issledovaniya [Fundamentals of machine learning for analytical forecasting. Algorithms, working examples and case studies]: Trans. from english. Saint Petersburg: Dialektika, 2019, 656 p.
12. Tim Gätcke. Working with Vallon Magnetometers. General Background for Operators and Trainers. VALLON GmbH: Germany, 2019, 54 p.
13. Detektory i sistemy dlya razminirovaniya. Miny, samodel'nye vzryvnye ustroystva, boevye elementy i nerazorvavshiesya boepripasy [Detectors and systems for mine clearance. Mines, improvised explosive devices, combat elements and unexploded ordnance]. Eningen. Germaniya: Vallon, 2021, 47 p.
14. Aggarval Ch. Neyronnye seti i glubokoe obuchenie: uchebnyy kurs [Neural networks and deep learning: a training course]: Trans. from english. Saint Petersburg: Dialektika, 2020, 752 p.
15. Rychkov A.V., Shcherbakov G.N., Sokolov N.A., Ryabukhin D.A. K voprosu sozdaniya dorozhnykh inzhenernykh razvedyvatel'nykh mashin s mnogokanal'nymi sistemami obnaruzheniya vzryvoopasnykh predmetov [On the issue of creating road engineering reconnaissance vehicles with multichannel systems for detecting explosive objects], *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Life safety], 2021, No. 11, pp. 51-60.
16. Sokolov N.A., Shastin I.D., Ryabukhin D.A., Rudakov I.A. Chetyrekhzondovyy magnitometricheskyy iskatel'. Patent Rossiyskoy Federatsii ot 30.11.2020 № RU201140U1 [Four-probe magnetometric finder. Patent of the Russian Federation No. RU201140U1 dated 11/30/2020].
17. Pattanayak S. Glubokoe obuchenie i TensorFlow dlya professionalov [Deep learning and TensorFlow for professionals]: Trans. from english. Saint Petersburg: Dialektika, 2020, 480 p.
18. Rashka S., Mirdzhalili V. Python i mashinnoe obuchenie. Mashinnoe i glubokoe obuchenie s ispol'zovaniem Python, Scikit-Learn i TensorFlow [Python and machine learning. Machine and deep learning using Python, Scikit-Learn and TensorFlow]. Saint Petersburg: Dialektika, 2019, 420 p.
19. Amelichev V.V., Abanin V.V. i dr. Razvitie tekhnologiy magnitopoluprovodnikovyykh mikrosistem [Development of technologies of magnetopoluprovodnik Microsystems], *Izvestiya VUZov. Elektronika* [Proceedings of Universities. Electronics], 2015, Vol. 20, No. 5, pp. 505-510.

20. *Vlaskin K.I.* Razrabotka elektromagnitnykh sistem malogabaritnykh pervichnykh preobrazovateley ferrozondovogo tipa: diss. ... kand. tekhn. nauk [Development of electromagnetic systems of small-sized primary ferrosonde type converters: cand. of eng. sc. diss.]. Izhevsk: IzhGTU im. M.T. Kalashnikova, 2014. 150 p.
21. *Mushnikov N.V., Popov A.G., Potapov A.P., Lukshina V.A.* Nanokristallicheskie magnitnye materialy. Fizika magnitnykh materialov i nanostruktur [Nanocrystalline magnetic materials. Physics of magnetic materials and nanostructures], ed. by V.V. Ustinova, N.V. Mushnikova, V.Yu. Irkhina. Ekaterinburg: Institut fiziki metallov im. M.N. Mikheeva UrO RAN, 2020, 664 p.
22. Klassifikatsiya elektronnykh usiliteley [Classification of electronic amplifiers]. Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Klassifikatsiya\\_elektronnykh\\_usiliteley](https://ru.wikipedia.org/wiki/Klassifikatsiya_elektronnykh_usiliteley) (accessed 20 Desember 2021).
23. *Rychkov A.V., Sokolov N.A., Shcherbakov G.N., Prokhorkin A.G., Feshchenko Ya.V.* Povyshenie chuvstvitel'nosti ferrozondovykh preobrazovateley magnitnogo polya dlya perenosnykh magnetometrov [Increasing the sensitivity of ferrosonde magnetic field converters for portable magnetometers], *Boepripasy* [Ammunition], 2021, No. 2, pp. 70-76.
24. *Afanas'ev Yu.V.* Ferrozondovye pribory [Ferrosonde devices]. Leningrad: Energoatomizdat, 1986, 187 p.
25. *Sokolov N.A.* Ferrozondovyy magnitmetricheskiy datchik. Patent RF na izobretenie ot 19.10.2021 № 2757650 [Ferrosonde magnetometric sensor. RF Patent for invention No. 2757650 dated 19.10.2021].
26. *Sokolov N.A.* Programma obrabotki signalov v mnogokanal'nom magnitmetricheskom obnaruzhitele. Svidetel'stvo RF na programmu dlya EVM ot 13.05.2021 № 2021617334 [Signal processing program in a multichannel magnetometric detector. Certificate of the Russian Federation for a computer program dated 13.05.2021 No. 2021617334].

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.С. Звездинский.

**Соколов Николай Александрович** – Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центральный научно-исследовательский испытательный институт инженерных войск» Минобороны России; e-mail: [cniii\\_iv@mail.ru](mailto:cniii_iv@mail.ru); Нахабино, Россия; тел.: 89163658920; с.н.с.

**Рычков Андрей Владимирович** – Военный учебно-научный центр Сухопутных войск «Общевойсковая ордена Жукова академия Вооруженных Сил Российской Федерации»; e-mail: [cniii\\_iv@mail.ru](mailto:cniii_iv@mail.ru); г. Москва, Россия; тел.: 84997665759; д.т.н.; доцент.

**Sokolov Nikolai Alexandrovich** – FGBU «CNIII IV» of the Ministry of Defense of the Russian Federation; e-mail: [cniii\\_iv@mail.ru](mailto:cniii_iv@mail.ru); Nakhabino, Russia, phone: 89163658920; senior researcher.

**Rychkov Andrey Vladimirovich** – VUNTS SV «OVA VS RF»; e-mail: [cniii\\_iv@mail.ru](mailto:cniii_iv@mail.ru); Moscow, Russia; phone: 84997665759; dr. of eng. sc.; associate professor.

УДК 28.23.24: 28.23.27:004.82

DOI 10.18522/2311-3103-2022-1-42-59

**С.М. Соколов**

## **ОНТОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД В СОЗДАНИИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ С ПОВЫШЕННОЙ СТЕПЕНЬЮ АВТОНОМНОСТИ**

*Рассматриваются аспекты, необходимые для воплощения робототехнических комплексов с повышенной степенью автономности (РТК с ПСА) в практическую работу. Указываются отличительные особенности таких комплексов, потребности соответствующих интеллектуальных информационно управляющих систем (ИИУС). Выделяется требование ситуационной осведомлённости и, как следствие, необходимость разнообразной системы представления знаний, средств восприятия внешней среды и сопоставления оперативной информации с моделями и априорной информацией об этой среде. Кроме того, указывается на необходимость автоматизации процессов создания РТК с ПСА, доступности, упрощения их использования. С целью ответа на поставленные вопросы в работе предлагается исполь-*

зывать концепцию и механизмы онтологий применительно к автономной робототехнике. Приводятся примеры уже имеющихся решений в этой области. В робототехнике онтологии используются для определения и концептуализации знаний, принятых сообществом, с использованием формального описания, которое является машиночитаемым, доступным для совместного использования и содержит гибкость для обоснования этих знаний, чтобы вывести дополнительную информацию. Онтологии представляют значительный интерес для мультиагентных систем для организации взаимодействия между агентами и с другими системами в гетерогенных средах, возможности повторного использования и поддержки разработки новых РТК. Описывается предлагаемое автором построение онтологии в такой прикладной области как информационное обеспечение целенаправленных перемещений автономных наземных средств на основе систем технического зрения. Всё рассмотрение ведётся в конфигурационном пространстве информационно-управляющих систем РТК с ПСА. Это пространство позволяет агрегировать большое количество разнообразных технологий, используемых при построении РТК. Воплощению конкретной системы соответствует «точка сборки». Согласование форм представления знаний в ИИУС обеспечивается последовательным рассмотрением плоскостей в этом пространстве. В качестве связующего звена – средства для автоматизированного перевода описаний дескриптивных онтологий в описания функциональных, машиночитаемых онтологий предлагается использование языка информационно-двигательных действий и команд интерпретирующей навигации. В заключении рассматриваются ближайшие перспективы развития описанного подхода, высказываются пожелания/предложения к отечественному сообществу робототехников.

*Подвижные робототехнические комплексы; информационно-управляющие системы; повышенная степень автономности; представление знаний; онтологии; интерпретирующая навигация; информационно-двигательные действия.*

**S.M. Sokolov**

#### **AN ONTOLOGICAL APPROACH TO THE CREATION OF ROBOTIC COMPLEXES WITH AN INCREASED DEGREE OF AUTONOMY**

*The aspects necessary for the implementation of robotic complexes with an increased degree of autonomy (RC with IDA) in practical work are considered. The distinctive features of such complexes, the needs of the corresponding intelligent information control systems (IICS) are indicated. The requirement of situational awareness is highlighted and, as a consequence, the need for a diverse system of knowledge representation, means of perception of the external environment and comparison of operational information with models and a priori information about this environment. In addition, it is pointed out the need to automate the processes of creating RC with IDA, accessibility, and simplification of their use. In order to answer these questions, the paper proposes to use the concept and mechanisms of ontologies in relation to autonomous robotics. Examples of existing solutions in this area are given. In robotics, ontologies are used to define and conceptualize knowledge accepted by the community, using a formal description that is machine-readable, shared, and contains the flexibility to justify this knowledge in order to derive additional information. Ontologies are of considerable interest for multi-agent systems for organizing interaction between agents and with other systems in heterogeneous environments, the possibility of reuse and support for the development of new RCs. The author describes the construction of an ontology proposed by the author in such an applied field as information support for targeted movements of autonomous ground vehicles based on technical vision systems. All consideration is conducted in the configuration space of the information and control systems of the RC with IDA. This space allows you to aggregate a large number of different technologies used in the construction of RC. The embodiment of a particular system in this space corresponds to the "assembly point". The coordination of the forms of knowledge representation in the IICS is ensured by the consistent consideration of planes in this space. As a connecting link – a means for automated translation of descriptions of descriptive ontologies into descriptions of functional, machine-readable ontologies, the use of the language of information-motor actions and interpretive navigation commands is proposed. In conclusion, the short-term prospects for the development of the described approach are considered, and wishes are expressed to the domestic community of roboticists.*

*Mobile robotic complexes; information and control systems; increased degree of autonomy; knowledge representation; ontologies; interpretive navigation; information and motor actions.*

**Введение.** Одной из тенденций в развитии современной подвижной робототехники является переход от телеуправления к автономным беспилотным средствам. Эта тенденция в перспективе должна привести к созданию технических систем, которые могут воспринимать, понимать и взаимодействовать с окружающей средой, а также развиваться для достижения результатов, подобных человеческим, в деятельности, требующей знаний, специфичных для контекста (ситуации и задачи). Признано, что достижение таких возможностей выходит за рамки современного уровня техники и будет оставаться таковым в течение многих лет. Исходя из этого видения, европейским научным сообществом было определено несколько промежуточных целей [1]. Достижение этих целей может послужить отправной точкой для дальнейшей работы над долгосрочным видением. В частности, одной из целей названо продвижение науки о когнитивных системах посредством междисциплинарного исследования требований, вариантов определения и компромиссов для автономных, роботизированных систем, включая требования к архитектуре, формам представления, механизмам восприятия, обучению, планированию, рассуждениям, мотивации, действиям и коммуникации. На этом пути обеспечение супервизорного режима управления целенаправленными перемещениями с минимальным участием человека является текущей задачей. Эту задачу призваны решать подвижные робототехнические комплексы (РТК) с повышенной степенью автономности (ПСА). За человеком остаётся целеполагание – указание конечной цели перемещений, помощь бортовой системе управления в сложных ситуациях и общий контроль за выполнением миссии подвижного средства. Уже есть примеры такого режима работы в специальных средах (движение самосвалов в карьерах, поездов в тоннелях и т.п.) [2–6]. Ещё одной тенденцией подвижной робототехники является всё более активное выдвигание на основную роль среди средств информационного обеспечения систем технического зрения (СТЗ). Видеокамеры различных диапазонов, радиолокационные системы в совокупности с высокопроизводительными вычислителями создают благоприятную основу для создания бортовых систем технического зрения. СТЗ представляют наиболее полную и достоверную информацию для идентификации и определения относительного расположения объектов окружающего пространства и подвижного средства. Широким фронтом ведутся работы по разработке эффективного алгоритмического обеспечения СТЗ и его реализации на бортовых программно-аппаратных платформах [7–10].

Чем большую степень автономности в различных условиях функционирования мы хотим передать РТК, тем более разнообразные знания и способы их обработки должны быть представлены и реализованы в бортовой информационно-управляющей системе. Несмотря на впечатляющий прогресс во многих конкретных подтемах в области искусственного интеллекта и когнитивных наук, область в целом, движется медленно. Большинство известных систем, способных выполнять сложные задачи, которые легко могут выполнять люди и другие животные, требуют тщательной индивидуальной разработки. Какой бы интеллект у них ни был, его можно было бы описать как "насекомоподобный", поскольку у них есть способности, которые они не понимают, они не знают, почему они поступают так, а не иначе, они не могут объяснить, что они делают, они не могут улучшить свою производительность, прислушиваясь к советам человека, и они не могут давать советы или помогать кому-то другому, выполняющему аналогичные задачи. Одной из причин этого является то, что за последние несколько десятилетий исследования были фрагментированными: многие отдельные лица и исследовательские группы сосредоточили свои усилия на узко определенных проблемах в области зрения, или обучения, или понимания языка, или решения проблем, или мобильной робототехники.

Известен подход к организации и структуризации знаний основанный на использовании онтологий. Онтологический подход не обеспечивает прорывное решение какой-то отдельной задачи, но его использование позволяет объединять знания различных областей, представленных в различных форматах. Онтологии предоставляют механизмы для анализа информации. Это включает в себя способность выводить информацию, которая может быть не представлена явно, а также способность задавать вопросы базе знаний и получать ответы. Один из способов обеспечения этой функциональности заключается в представлении символической информации в модели мира в логическом, интерпретируемом компьютером формате, например, в представлении Knowledge Inter face Format (KIF) [11].

Подходы и методы лингвистики полезны для общения между человеком и машиной, а также для обмена информацией между роботами. Многие результаты таких формальных методологий могут быть полезны для приложений управления. Поведение более высокого уровня и ситуации окружающей среды легче и эффективнее выражаются с помощью лингвистических представлений. Например, на более высоких уровнях управления описание окружающей среды вблизи автономного транспортного средства с помощью только именованых объектов является более компактным, чем перечисление ряда поверхностей и их математических описаний. Подобное описание положено в основу интерпретирующей навигации [12]. Геометрические описания необходимы для того, чтобы избежать столкновений, но данные такого формата должны обрабатываться более низким уровнем управления.

Существует ряд методологий и инструментов для анализа и моделирования знаний на символическом уровне. CommonKADS [13] является одним из таких инструментов, который поддерживает разработку структурированных знаний. В отечественном сообществе робототехников, к сожалению, нет такого разнообразия объединяющих проектов исследований и программного инструментария. В данной статье описывается имеющийся мировой опыт в использовании онтологического подхода и представляются результаты первых шагов автора в разработке онтологии систем информационного обеспечения целенаправленных перемещений автономных наземных средств на основе систем технического зрения. В заключении рассматриваются ближайшие перспективы развития описанного подхода, высказываются пожелания/предложения к отечественному сообществу робототехников.

**Различные подходы к использованию знаний для управления.** Большая часть ранних работ с роботами выполнялась в контексте исследований искусственного интеллекта с использованием только высокоуровневых символических знаний и представлений [14–16]. Это привело к печальному результату – отделению робототехники от геометрии и динамики реального мира и сосредоточению внимания на чисто символических подходах к восприятию, планированию и рассуждениям [17]. Мало что из этих ранних работ когда-либо находило практическое применение, хотя относительно недавние работы, связывающие планировщиков или агентов более высокого уровня с реальными системами, нашли новых сторонников, особенно в области космических приложений [18, 19].

Другое, направление в использование знаний для управления – бихевиоралистская школа робототехники, начатая Родни Бруксом из Массачусетского технологического института. Здесь отвергалась идея чисто символического контроля как стерильная и не относящаяся к роботам, которые могли бы эффективно взаимодействовать с реальным миром. Брукс предложил использовать насекомых в качестве модели, определив управление как серию реактивных поведений, которые напрямую связывают входные данные датчиков с поведением с помощью конечных автоматов. Более сложное поведение было способно подавлять или подчинять более простое поведение более низкого уровня, поэтому это было названо архи-

тектурой подчинения [20]. Были достигнуты некоторые значительные достижения, в том числе эксперимент по обучению, который Брукс провел, чтобы продемонстрировать, что гексапод с сетью контроллеров может научиться ходить с соответствующей походкой *tri pod* [21]. Однако Брукс и другие явно отвергли концепцию модели мира, утверждая, что мир был его собственной моделью, и в результате поведенческие или реактивные системы не были применены ни к каким проблемам большой сложности. Гибридные системы, такие как совещательно-реактивные системы, предложенные J. Albus [22], R. Arkin [23] или C. Thorpe [24], атаквали более сложные проблемы. Интеллектуальные системы с несколькими уровнями и типами представлений находятся в меньшинстве. В. Kuipers и другие разработали семантическую пространственную иерархию *Semantic Spatial Hierarchy (SSH)*, которая вдохновлена человеческим когнитивным моделированием. SSH [25] содержит как качественные, так и количественные представления в иерархии.

Концепция интеллекта в управлении применима к множеству подходов к расширению классической теории управления, которые включают обучение, нелинейное управление, управление на основе моделей и, в целом, управление сложными системами, которые будут “поступать правильно” при столкновении с неожиданными или незапланированными ситуациями [22]. Можно сказать, что все “интеллектуальные” системы обладают некоторыми знаниями о системе, подлежащей управлению, или что они используют некоторую модель системы при расчете выходных данных управления. Фактически, словарь американского наследия определяет интеллект как “способность приобретать и применять знания”. Создание, сбор и использование знаний – то есть модели – системы, подлежащей управлению, является одной из ветвей того, что известно, как разработка знаний. Аспекты управления в реальном времени делают эту проблемную область отличной от других задач разработки знаний, таких как крупномасштабные онтологии. Например, существует необходимость в разработке несимволических аспектов знаний системы, таких как модели мира на основе карт. Интеллектуальное управление требует нескольких различных классов знаний и представлений.

Общая структура системы управления, основанной на модели, схематично показана на рис. 1.

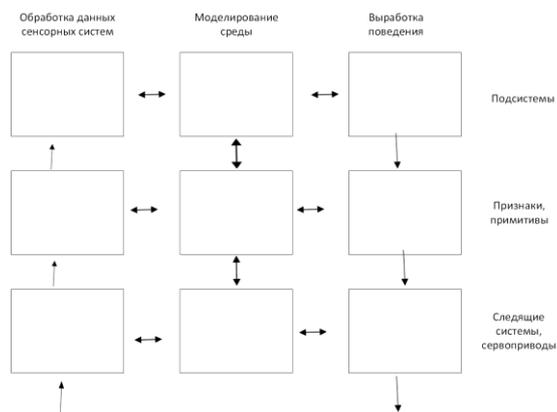


Рис. 1. Схема интеллектуальной иерархической информационно-управляющей системы

Существуют три разных класса знаний в иерархии управления: сенсорные сигналы, переменные состояния и системные параметры **на нижних уровнях**; пространственные модели (карты, изображения и объекты), которые представляют

геометрические и динамические знания **на средних уровнях**; и символичные данные, которые представляют математические, логические, лингвистические и процедурные знания **на высших уровнях**.

Отношения между этими тремя типами представлений могут быть выражены **в виде указателей** (посредников). Каждый уровень может содержать некоторые или все классы знаний, но в целом символические знания на самом низком (базовом) уровне использоваться не будут, а на самых высоких уровнях в основном будут использоваться символические знания. До последнего времени наука о разработке знаний не занимается иконической, параметрической и числовой информацией. Мы считаем, что необходимо учитывать эти типы представлений также при разработке моделей знаний для интеллектуальных систем. Мы можем далее отличать знания, которые изучаются или приобретаются, которые мы будем называть знаниями на месте, от знания, которые предварительно запрограммированы или на которые ссылаются из внешней базы данных, которые мы будем называть априорными знаниями. Это обеспечивает основу для рассмотрения вопросов обучения и адаптивного управления.

Существует еще третье средство дифференциации типов знаний, которое заключается в различении знания о вещах (существительные) и знания о действиях, задачах или поведении (глаголы). Модификаторы включают атрибуты вещей (прилагательные) и атрибуты задач (наречия). Это становится очень полезным на более высоких уровнях при рассмотрении взаимодействия автономных машин со сложными средами, где уместно анализировать характер объектов, встречающихся в окружающей среде. Различие между моделями объектов (вещей) и моделями поведения (действий) также помогает разработчику системы в согласовании спецификаций обработки датчиков и моделирования мира со спецификациями задач управления. Эти свойства знаний полезны не только для систем управления, а и для информационных систем на основе сбора и обработки зрительных данных.

Информация об уровне датчиков и управления основана на различных типах законов управления, приводящих к локально различным состояниям. Локальные геометрические карты с их индивидуальными системами отсчета строятся на уровне управления. Выше этого находится причинно-следственный уровень, который выводит дискретные модели действий из уровня управления. Топологический уровень содержит онтологию мест, путей и регионов, которая соединяет различные локальные метрические карты в лоскутное одеяло, которое может быть объединено в единую глобальную систему отсчета.

Наиболее значительными и сложными автономными мобильными роботами, созданным на сегодняшний день, является американский армейский экспериментальный беспилотный аппарат (XUV), разрабатываемый для разведывательных миссий (миссий разведки, наблюдения и обнаружения целей (RSTA)). И американский марсоход [26, 27].

Архитектура для XUV называется 4D/RCS, объединяя работу E.D. Dickmanns в Германии по отслеживанию дорог [28] и работу J. Albus в NIST [22]. Оба используют данные от нескольких датчиков для построения модели мира, а затем используют эту модель для планирования того, что должно делать транспортное средство. Армейский XUV успешно преодолел многие километры бездорожья, включая поля, леса, ручьи и холмистую местность, учитывая редкие путевые точки на карте с низким разрешением, составленной армейским разведчиком. XUV использовал свои бортовые датчики для создания карт окружающей среды высокой четкости с несколькими разрешениями, а затем успешно перемещался по очень сложной местности. По сути, это демонстрация использования карт с несколькими разрешениями в качестве средства представления знаний для объединения датчиков и планирования траекторий в автономных мобильных роботах. В течение следующих нескольких лет символические знания могут быть добавлены для обеспечения тактического поведения и взаимодействия человека и машины.

По тем же принципам иерархической системы построена система управления марсоходом и дроном в составе этой миссии. Здесь степень автономии снижена тем обстоятельством, что в целях обеспечения безопасности в процесс управления, для перепроверки принимаемых решений, в работу системы вмешиваются операторы с Земли [26].

Внедрение иконических данных, интегрированных с символьными данными и параметрическими данными в иерархическую модель мира с несколькими разрешениями, позволяет в режиме реального времени управлять сложными системами, взаимодействующими с реальным миром, включая способность иметь дело с динамическими взаимосвязями объектов в пространстве и времени. Это обеспечивает возможность для движущегося транспортного средства распознавать и правильно реагировать на неожиданные препятствия и события, что является сутью интеллектуального управления системами мобильности.

**Соображения по интеграции различных типов знаний.** Представление нескольких классов знаний в рамках интеллектуальной системы управления создает проблему интеграции принципиально различных представлений в единую унифицированную базу знаний. Это база знаний должна вести себя как единое целое и, как таковая, должна обеспечивать беспрепятственный обмен информацией и взаимодействие между всеми источниками знаний.

В автономной мобильности, параметрические знания могут быть сохранены как количественные наборы в компьютерную программу, представляющую ценные переменные состояния. Знаковые знания могут быть представлены в виде цифровых карт местности как двумерных массивы, а символическое знание может быть представлено множеством токенов с соответствующими атрибутами, хранящимися в базе данных.

Существуют проблемы интеграции знаний как внутри одного представительства, так и между разрозненными представительствами. Основываясь на приведенном выше примере автономной мобильности, исключительно на символическом уровне необходимо интегрировать априорную информацию о типах объектов, которые ожидается увидеть в окружающей среде, с позициями объектов, которые идентифицируются бортовыми датчиками по мере их обнаружения. Когда обе эти части информации представлены в базе данных, ассоциации ключей базы данных часто бывает достаточно для обеспечения необходимой интеграции.

В рамках исключительно знакового уровня необходимо интегрировать обработанные данные об окружающей среде с априорными картами местности. Это сложная задача из-за шума, связанного с полученными данными, а также из-за разного уровня разрешения между априорными картами и полученными данными. Кроме того, необходимо интегрировать два или более полученных изображения, которые могут быть получены двумя разными датчиками или одним и тем же датчиком в разное время. В области регистрации данных, исследователи активно решают эту проблему [29, 30].

Аналогичные проблемы возникают при интеграции знаний, полученных в различных представлениях. Хотя представления различаются, несомненно, будут существовать прямые корреляции между данными в каждом представлении. В случае распознавания объектов [31] информация, которая может быть выведена путем анализа данных, хранящихся в структуре иконической сетки, должна сравниваться с атрибутами класса, хранящимися в базе символьных знаний, чтобы определить, есть ли соответствие. Например, если группа занятых ячеек в пространственном представлении может быть сгруппированные в один объект, можно создать фрейм объекта и связать все пиксели в пространственном представлении с фреймом объекта. Этот фрейм объекта содержит список атрибутов объекта, которые являются измеряемыми свойствами кластера пикселей в пространственном

представлении. В зависимости от информации, хранящейся в пространственном представлении, можно определить диаметр объекта. на основе этой информации можно сравнить атрибуты наблюдаемого объекта с атрибутами прототипа класса объектов, которые, как ожидается, будут видны в среде.

Если соответствие найдено (в пределах желаемого порогового значения), устанавливаются связи между фреймом объекта и прототипом класса в базе данных. Это и есть процесс классификации. Ссылки, установленные в процессе классификации, являются двунаправленными указателями. Таким образом, имена классов и атрибуты классов могут быть привязаны обратно к объектному фрейму, а оттуда обратно к пикселям в пространственном представлении.

Архитектура 4D/RCS представляет собой иерархическую структуру управления, состоящую из узлов RCS, с различным диапазоном и разрешением во времени и пространстве на каждом уровне. Функциональность каждого уровня в иерархии 4D/RCS определяется функциональностью, характеристикой времени, пропускной способностью и алгоритмами, выбранными процессами генерации поведения для декомпозиции задач и целей на каждый уровень. Иерархическое наложение обеспечивает оптимальное использование памяти и вычислительных ресурсов при представлении времени и пространства. На каждом уровне параметры состояния, изображения и карты поддерживаются с разрешением в пространстве и времени, соответствующим этому уровню. На каждом последовательно более низком уровне иерархии, по мере геометрического увеличения детализации, диапазон вычислений геометрически уменьшается. Кроме того, по мере увеличения временного разрешения область интереса уменьшается. Это приводит к соотношению, которое остается относительно постоянным по всей иерархии.

Каждый узел RCS содержит одни и те же функциональные элементы, но адаптирован для данного уровня иерархии и конкретных обязанностей узла. RCS Узел содержит процессы, которые выполняют Сенсорную обработку (SP), Генерацию поведения (BG), Моделирование мира (WM) и оценочное суждение (VJ). На каждом уровне иерархии управления существуют процессы совещательного планирования, которые получают цели и приоритеты от вышестоящих и разбивают их на подцели для подчиненных на нижестоящих уровнях. На каждом уровне реактивные циклы реагируют на обратную связь, чтобы изменить запланированные действия таким образом, чтобы цели были выполнены, несмотря на неожиданные события.

На стороне сенсорной обработки иерархии информация, полученная из наблюдений на нижестоящих уровнях, фильтруется и обрабатывается вверх до более абстрактных уровней, используя априорные знания об объектах и ситуациях для интерпретации поступающих данных при обнаружении событий, распознавании объектов и развитии осведомленности о ситуации. Результаты сенсорной обработки используются для обновления модели мира на каждом уровне; таким образом, планирование осуществляется с учетом наилучшего возможного представления внешнего мира. На каждом уровне процессы сенсорной обработки и формирования поведения имеют доступ к модели мира, которая хранится в базе данных знаний. Эта модель мира позволяет интеллектуальной системе анализировать прошлое, планировать будущее и воспринимать сенсорную информацию в контексте ожиданий. Функции затрат обеспечивают ценность суждения и определение приоритетов, которые поддерживают разумное принятие решений, планирование и анализ ситуации. Функции затрат могут быть динамическими и определяются текущими командами, приоритетами, предпочтениями пользователей, прошлым опытом и другими источниками. Следовательно, разработка требований к знаниям на каждом уровне определяется обязанностями этого уровня: какие команды сможет выполнять узел RCS? Каково требуемое время отклика контура управления? Какой пространственный охват ему необходимо понять? С какими типами сущностей ему приходится иметь дело?

**Онтологии в робототехнике.** Семантические технологии (ST) – это термин, используемый для обозначения семейства методов и инструментов, разработанных для обеспечения понимания огромного объема информации, которая уже доступна в цифровом формате. Эти инструменты моделируют знания и связывают воедино несколько разнородных ресурсов таким образом, чтобы информация, предоставляемая этими ресурсами, могла автоматически обрабатываться агентами. Распространенными приложениями являются создание баз знаний и экспертных систем [32, 33].

Обзор литературы показывает целый ряд исследований в области робототехники, в которых ST нашли применение. Примерами этого являются работы Челлы и др. [34] где онтология использовалась для описания среды, в которой перемещается мобильный робот.

Используя эту информацию, робот в принципе мог бы принимать решения о правильном способе навигации в пространстве. Мендоса и др. [35] использовали ST для представления и управления взаимосвязями между объектами, которые были распознаны программным обеспечением *robotic vision*. Янко и Друри [36] создали таксономию для взаимодействия человека и робота (HRI), позволяющего сравнивать различные системы HRI. Обновленная таксономия, представленная в [37], включала высокоуровневые концепции, такие как роли взаимодействия и морфологии роботов, в качестве категорий, используемых для классификации роботов.

Онтологии один из семантических методов. Как уже было сказано во введении, онтологии предоставляют механизмы для анализа информации. Это включает в себя способность выводить информацию, которая может быть не представлена явно, а также способность задавать вопросы базе знаний и получать ответы. Уже более 10 лет этот подход развивается западными коллегами применительно к робототехнике. Сначала это были общие вопросы, построение онтологий верхнего уровня [38], а последние годы активно ведутся работы по формированию онтологий конкретных прикладных областей, таких как воздушные, наземные, групповые РТК [39]. Это объемная работа и исследователями признается необходимость объединения усилий многих коллективов для её реализации [1].

В робототехнике онтологии используются для определения и концептуализации знаний, принятых сообществом, с использованием формального описания, которое является машиночитаемым, доступным для совместного использования [40] и содержит гибкость для обоснования этих знаний, чтобы вывести дополнительную информацию [41]. Онтологии представляют значительный интерес для мультиагентных систем для организации взаимодействия между агентами и с другими системами в гетерогенных средах, возможность повторного использования и поддержка разработки [42]. Создатели контента для робототехники могут создавать сценарии для действий роботов, которые могут выполняться в нескольких роботах с одинаковым (или похожим) описанием воплощения.

В данной работе, опираясь на пятидесятилетний опыт разработки и исследований информационно-управляющих систем РТК с элементами искусственного интеллекта, накопленный в Ордена Ленина ИПМ им. М.В. Келдыша РАН мы предлагаем ряд решений по формированию онтологий такой востребованной области робототехники, как информационное обеспечение целенаправленных перемещений наземных РТК на основе сбора и обработки зрительных данных. Сначала опишем общие подходы к построению онтологий автономных роботов, затем укажем место наших исследований в этой большой работе, приведем примеры и приемы применения онтологического подхода к указанной предметной области, наметим цели на ближайшую перспективу и выскажем ряд пожеланий к сообществу отечественных робототехников.

Два типа онтологий и их объединение в проекции на РТК с ПСА. Все онтологии по степени формальности представления знаний можно представить в виде спектра онтологий (рис. 2).



Рис. 2. Спектр онтологий по степени формальности представления. Косая черта разделяет системы, предоставляющие "человеко-понятные" (выше черты) и "машино-понятные" (ниже черты) описания

Каждая точка соответствует наличию некоторых ключевых структур в онтологии, отличающих ее от других точек на спектре. Косая черта условно отделяет онтологии от других ресурсов, имеющих онтологический характер. Первой точке на спектре соответствует *контролируемый словарь*, т.е. конечный список терминов (простейшим примером является каталог на основе идентификаторов). Каталоги представляют точную (не многозначную) интерпретацию терминов. Другой спецификацией онтологии может быть *гlossарий*, представляющий собой список терминов с их значениями. Значения описываются в виде комментариев на естественном языке. Это дает больше информации, поскольку люди могут прочесть такой комментарий и понять смысл термина. Интерпретации терминов могут быть многозначными. Глоссарии непригодны для автоматической обработки программными агентами, но можно, как и ранее, присвоить терминам ID.

Два класса онтологий. Обобщенная структура автономного наземного транспортного средства (UGV) представлена на рис. 3. Каждый элемент автономной системы транспортного средства, показанный на рис. 3 должен быть представлен в онтологии. В кроме того, связь между автономными агентами должна быть четко определена для содействия сотрудничеству, координации и связи нескольких беспилотных летательных аппаратов, например таких как UGV и AUV (БЛА).



Рис. 3. Структура автономной системы транспортного средства

Онтологии должны охватывать и использовать концепции для поддержки описания и процесса проектирования автономных систем. Нам нужно описать различные сущности, участвующие в работе системы.

Для системной онтологии необходимо разработать следующие пакеты, описанные в различных разделах этой статьи:

- ◆ Устройство: для описания различных устройств, таких как датчики и исполнительные механизмы.
- ◆ Стратегия управления: для управления автономными системами навигации.
- ◆ Восприятие: использовать сенсорную информацию для оценки состояния и представления мира.
- ◆ Планирование движения: планировать движения в воспринимаемом мире.
- ◆ Представление знаний: представление знаний о проблемах и решениях для принятия решений.

Эта предлагаемая онтология (системная) необходима для стандартизации этой развивающейся области. Такая онтология будет способствовать быстрому развитию и содействию сотрудничеству между агентами робототехники. На рис. 4 схематично представлено.

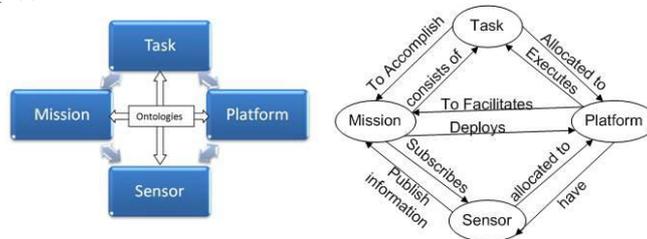


Рис. 4. Вездесущие проникновение/использование онтологии (слева) и отношения сущностей (справа) объясняющие концепцию построения онтологии в робототехнике

Для эффективного выполнения задач беспилотные наземные транспортные средства должны обрабатывать не только низкоуровневые данные датчиков и двигателей, но и семантическую информацию высокого уровня. Данные и информация связаны двунаправленно, при этом данные низкого уровня передаются вверх, а информация высокого уровня возвращается вниз с использованием семантической информации. Знания должны быть представлены и определены для того, чтобы их можно было интегрировать. Пример представления знаний о подсистемах беспилотного наземного средства приведен в табл. 1 [43].

Таблица 1

**Представление знаний для UGVs**

Sub-system	Descriptions
Locomotion	Legged mobile robot, wheeled mobile robot, differential steering, Ackerman steering, castor wheel, Swedish wheel, ball or spherical wheel
Power Plant	Batteries, power supplies
Kinematics	Models and constraints, position, orientation, forward kinematics, wheel kinematics constraints, robot kinematics constraints, maneuverability
Dynamics	Euler-Lagrange equation, Newton's laws of motion
Actuators	DC motors, servo motors, stepper motors, brushless motors
Sensors	Odometer, gyroscope, magnetometer, accelerometer, beacons, range sensors, infrared, laser, sonar, Doppler, vision, GPS
Control and stability	Open loop control, close loop control, path following, path tracking, PID control, linear quadratic optimal control, robust control, dynamic programming, linear quadratic regulator, backstepping, feedback linearization, sliding mode control, intelligent control, adaptive control, model predictive control, $H_{\infty}$ control, gain scheduling, input output feedback, forward speed control
Localization and mapping	Noise, aliasing, single hypothesis belief, multiple hypothesis belief, map representation, localization, probabilistic map-based localization, simultaneous localization and mapping
Planning	Discrete planning, geometric representations and transformations, configuration space, sampling-based motion planning, combinatorial motion planning, extension of basic motion planning, feedback motion planning, decision theory, sequential decision theory, sensor and information space, planning under sensing uncertainty, planning under differential constraint, sampling-based planning under differential constraints
Communications	Communication media, radio communication, communication data rate and bandwidth usage, antenna

**Наш подход в создании онтологии прикладной области информационного обеспечения целенаправленных перемещений на основе использования зрительных данных.** Всё рассмотрение ведём в конфигурационном пространстве, позволяющем свести всё множество технологий, используемых при создании РТК к обозримой и чётко управляемой структуре [44] (рис. 5).

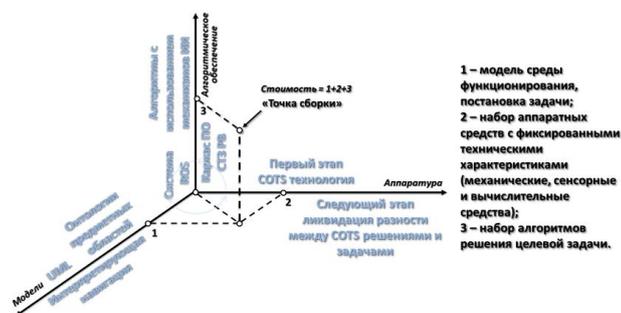


Рис. 5. Пространство конфигураций/архитектур систем информационного обеспечения мобильных роботов с повышенной степенью автономности

Создание, воплощение конкретного РТК с ПСА – это достижение точки сборки в конфигурационном пространстве. Согласование форм представления знаний в ИИУС обеспечивается последовательным рассмотрением плоскостей в этом пространстве. В качестве связующего звена – средства для автоматизированного перевода описаний дескриптивных онтологий в описания функциональных, машиночитаемых онтологий предлагается использование языка информационно-двигательных действий и команд интерпретирующей навигации. Приведём последовательность действий при формировании интересующей нас онтологии. Следует указать, что процесс определения точки сборки, воплощения РТК с ПСА итерационный и, следуя правилам динамического программирования, на каждом, уровне рассмотрения уточняет, детализирует описание используемых сущностей и реализуемых действий (пока не будет достигнут уровень конечного/доступного исполнителя).

Первый шаг – выбор координат создаваемого комплекса по оси моделей. На естественном языке формулируется цель создания – РТК, производится формирование тезауруса – толкового словаря предметной области с проверкой на однозначность формулировок (совместно экспертами разработчика и конечного пользователя). Этот шаг в дальнейшем, когда будет обобщен опыт имеющихся разработок, может быть опущен и использован уже имеющийся словарь. По нашему опыту, в составе словаря указанной области должны присутствовать, в частности, такие словарные статьи, как ориентир, долговременный ориентир, текущий ориентир, условия функционирования, условия достижения целевой точки и ряд других. Далее, в терминах сформированного/выбранного тезауруса, формулируется постановка задачи целенаправленного перемещения. Здесь также возможно использование уже имеющихся формулировок в виде прецедентов решения задач, сценариев реализации и, при необходимости, их дополнение/редакция.

Следующим шагом рассматривается ось алгоритмического обеспечения в разрезе сечения конфигурационного пространства плоскостью «модель-алгоритмическое обеспечение». По оси алгоритмического обеспечения выбираются алгоритмы, решающие поставленную задачу или отмечается их отсутствие.

На очередном шаге рассматривается ось аппаратуры в разрезе сечения плоскостью «алгоритмическое обеспечение – аппаратура». В рамках нашей прикладной области, по оси аппаратуры рассматриваются такие составляющие, как вычис-

лительные и сенсорные средства. Результатом этого рассмотрения является определение связей алгоритм – предоставление исходных данных, исполнитель. Как и на предыдущем шаге определяется наличие или отсутствие таких связей. Опять-таки, при развитии предлагаемого онтологического подхода, перечень таких связей уже может быть и будет использован. Далее, при условии заполнения всех пересечений/связок, формируется оценка времени исполнения всей задачи и стоимости полученного решения. Полученные количественные данные соотносятся с поставленной задачей и доступными ресурсами

В случае отсутствия решения во всех пересечениях/связках или не удовлетворительных оценок времени исполнения и стоимости, решается вопрос о целесообразности корректировки постановки задачи (изменения координат по оси моделей), разработки/доработки алгоритмического обеспечения и дополнения/разработки состава аппаратуры.

Говоря о создании РТК с ПСА необходимо указать на ключевую роль во всех рассмотренных составляющих программного обеспечения. Без программного инструментария все составляющие и действия с ними остаются разрозненным набором неких объектов и слов о них. Именно на эту составляющую сделаем акцент в описании нашего опыта. В ряде шагов вышеописанной схемы мы подобрали уже имеющийся программный инструментарий, в ряде предложили, разработали свой. Имеются и достаточно большие участки ручной работы на данном этапе исследования. Кратко опишем используемые программные и «ручные» решения.

При рассмотрении по оси моделей, в качестве исходного словаря берём существующие онтологии верхнего уровня робототехники и автономных роботов (к сожалению, здесь англоязычная среда, требующая уточнения и однозначного перевода). Взаимосвязь сущностей в описании задачи отображаем диаграммами UML. Проверку на неоднозначность реализуем «в ручную» с привлечением экспертов конечного пользователя. По оси алгоритмов алгоритмическое обеспечение группируем в информационно-двигательные действия (ИДД), которым присваиваются идентификаторы в виде ключевых слов, также включаемых в состав глоссария прикладной области. По оси аппаратуры работу с сенсорной частью – регистрирующими блоками СТЗ описываем на языке команд интерпретирующей навигации [45], значительная часть которых имеет автоматизированный перевод в программы-исполнители, которые, в свою очередь имеют онтологическое описание в рамках каркаса программного обеспечения СТЗ реального времени [46] и исполнены в стандарте системы ROS [47]. Систему указателей/посредников от формулировки задачи – последовательности алгоритмов на языке ИДД к командам интерпретирующей навигации в настоящий момент формируем в ручную.

Онтологический подход к созданию информационного обеспечения подвижных РТК с ПСА на основе сбора и обработки зрительных данных опробовался при разработке наземных РТК для ряда приложений, включая задачи двойного назначения. В качестве исходных баз данных и знаний использовались материалы собственных разработок и доступные сведения в открытых публикациях. Основная, ожидаемая эффективность описанного подхода может и должна проявиться при более широкой экспериментальной базе и привлечении результатов различных коллективов разработчиков. Оформление решений в одной парадигме, как уже отмечалось, позволит сравнивать различные решения в области РТК с ПСА, повысить эффективность процесса создания и самих РТК за счёт использования уже имеющихся решений.

**Заключение.** Резюмируя изложенное, можно сделать следующие выводы. Имеющийся мировой опыт показывает перспективность онтологического подхода в создании интеллектуальных роботов и автономных мобильных средств, в част-

ности. Описанные в работе результаты являются первыми шагами на пути систематизации представлений о наборе решений, необходимых для эффективного воплощения повышенной степени автономности не в одиночном РТК, а в их экономически эффективном широком внедрении. В текущем состоянии связи между декларативными и функциональными онтологиями реализуются в автоматизированном режиме с участием человека, в ближайшей перспективе путь от постановки задачи целенаправленного перемещения до компоновки программно-аппаратного комплекса системы информационного обеспечения РТК, решающей эту задачу, будет полностью автоматизирован. В целом, использование онтологического подхода при создании РТК с ПСА требует объединения усилий всего сообщества отечественных робототехников и формирования общенациональных проектов/программ унификации программного обеспечения РТК с ПСА.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Christensen H.I., Sloman A., Kruijff G-J. & J. Wyatt (Eds.) Cognitive Systems. Reports on the European Union project on Cognitive Systems.* – URL: <https://cordis.europa.eu/project/>.
2. RSS новости. Новости искусственного интеллекта. – URL: [https://ai-news.ru/2021/01/bespilotnye\\_karernye\\_samosvaly.html](https://ai-news.ru/2021/01/bespilotnye_karernye_samosvaly.html).
3. ООО «МосТрансАренда». – URL: <https://mtarenda.ru/articles/trend-na-bespilotnye-samosvaly-nabiraet-оборотy/#>.
4. КОМЕК МАШИНЕРИ. Дойдут ли беспилотные самосвалы Komatsu до России? Исчезнет ли профессия водителя? – URL: <https://www.komek.ru/staty/doydut-li-bespilotnye-samosvaly-komatsu-do-rossii-ischeznet-li-professiya-voditelya/>.
5. *Tadviser.* Продукт:БелАЗ-7513R\_(беспилотный\_самосвал). – URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/Продукт:БелАЗ-7513R\\_\(беспилотный\\_самосвал\)](https://www.tadviser.ru/index.php/Продукт:БелАЗ-7513R_(беспилотный_самосвал)).
6. *Андрей Кожемякин.* Самосвал на миллион. – URL: <https://dev.by/news/samosval-na-million>.
7. *Петричкович Я., Солохина Т., и др.* RoboDeus – 50-ядерная гетерогенная СнК для встраиваемых систем и робототехники // *Электроника.* – 2020. – № 7 (00198). – С. 52-63.
8. NVidia Jetson AGX Xavier. – URL: <https://www.nvidia.com/ru-ru/autonomous-machines/embedded-systems/jetson-agx-xavier/>.
9. Accelerate Automotive with Intel. – URL: <https://intel.ru/content/www/ru/ru/automotive/products/programmable/overview.html>.
10. *Stephen Shankland.* Tesla self-driving car computer. – URL: <https://www.cnet.com/news/meet-tesla-self-driving-car-computer-and-its-two-ai-brains>.
11. *Genesereth M. and Fikes R.* Knowledge Interchange Format, Stanford Logic Report Logic-92-1. – Stanford University, 1992.
12. CommonKADS General Information. – <http://www.commonkads.uva.nl/frameset-commonkads.html>, 2003.
13. *Кирильченко А.А., Платонов А.К., Соколов С.М.* Теоретические аспекты организации интерпретирующей навигации мобильного робота. Препринт ИПМ № 19. – М., 2008.
14. *Laird J.E., Newell A. and Rosenbloom P.S.* Soar: An Architecture for General Intelligence // *Artificial Intelligence.* – 1987. – Vol. 33. – P. 1-64.
15. *Newell A. and Simon H.* GPS; A Program that Simulates Human Thought, McGraw-Hill, 1963.
16. *Pearson J.D., Huffman S.B., Willis M.B., Laird J.E. and Jones R.M.* A Symbolic Solution to Intelligent Real-Time Control // *Robotics and Autonomous Systems.* – 1993. – No. 11. – P. 279-291.
17. *Etherington D.* What Does Knowledge Representation Have to Say to Artificial Intelligence? Proceedings at the AAAI, 1997.
18. *Siegrwart R., Nourbakhsh I.* Introduction to Autonomous Mobile Robots. – MIT Press 1997.
19. *Volpe R., Estlin T., Laubach S., Olson C. and Balaram J.* Enhanced Mars Rover Navigation Techniques // *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Francisco, CA, 2000.*
20. *Wasson G., Kortenkamp D. and Huber E.* Integrating Active Perception with an Autonomous Robot Architecture // *Robotics and Automation Journal.* – 1999. – Vol. 29. – P. 175-186.
21. *Brooks R.A.* A Robust Layered Control System for a Mobile Robot, MIT AI Lab, A.I. Memo 864, Sept. 1985.

22. *Maes P. and Brooks R.* Learning to Coordinate Behaviors // Proceedings AAAI. – 1990. – P. 796-802
23. *Albus J., Lumia R., Fiala J. and Wavering A.* NASREM: The NASA/NBS Standard Reference Model for Telerobot Control System Architecture // Proceedings of the 20th International Symposium on Industrial Robots, Tokyo, Japan, 1989.
24. *Arkin R.* Navigational Path Planning for a Vision-Based Mobile Robot // *Robotica*. – 2003. – No. 7. – P. 49-63.
25. *Thorpe C.* Vision and Navigation for the Carnegie Mellow NavLab // *IEEE PAMI*. – 1988. – No. 10 (3).
26. *Kuipers B.* The Spatial Semantic Hierarchy // *Artificial Intelligence*. – 2000. – Vol. 119 (1–2). – P. 191-233.
27. *Maimone M.* A Martian Vision. JPL, 2016.
28. *Delaune J.* Vision-Based Navigation for Mars Helicopters. – JPL, 2021.
29. *Dickmanns E.D.* A General Dynamic Vision Architecture for UGV and UAV // *Journal of Applied Intelligence*. – 1992. – No. 2. – P. 251.
30. *Lauria S., Kyriacou T., Bugmann G., Bos J., Klein E.* Converting natural language route instructions into robot executable procedures // *Proc. IEEE Int. Workshop Roman, Berlin, Germany, 2002*. – P. 223-228.
31. *Parker L.E.* ALLIANCE: An architecture for fault tolerant multirobot cooperation, *Robotics and Automation // IEEE Transactions on*. – 1998. – Vol. 14, No. 2. – P. 220-240.
32. *Sellami Z., Camps V., Aussenac-Gilles N., and Rougemaille S.* Ontology Co-construction with an Adaptive Multi-Agent System: Principles and Case-Study, *Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management*. – 2011. – P. 237-248-
33. *Schlenoff C. and Messina E.* A robot ontology for urban search and rescue // in *Proceedings of the 2005 ACM workshop on Research in knowledge representation for autonomous systems*. – 2005. – P. 273-4.
34. *Tran Q. and Low G.* MOBMAS: A methodology for ontology based multi-agent systems development // *Information and Software Technology*. – Jun. 2008. – Vol. 50, No. 7-8. – P. 697-722.
35. *Gennari J.H., Musen M.A., Ferguson R.W., Grosso W.E., Crubezy M., Eriksson H., Noy N.F., and Tu S.W.* The evolution of protégé: an environment for knowledge-based systems development // *International Journal of Human-Computer Studies*. – 2003. – Vol. 58 (1). – P. 89-123,
36. *Matthews B.* Semantic web technologies // *E-learning*. – 2005. – No. 6(6):8.
37. *Pearson J.D., Huffman S.B., Willis M.B., Laird J.E. and Jones R.M.* A Symbolic Solution to Intelligent Real-Time Control // *Robotics and Autonomous Systems*. – 1993. – No. 11. – P. 279-291.
38. *Schlenoff C.* Linking Sensed Images to an Ontology of Obstacles to Aid in Autonomous Driving // *Proceedings of the 18th National Conference on Artificial Intelligence: Workshop on Ontologies for the Semantic Web, 2002*.
39. *Wasson G., Kortenkamp D. and Huber E.* Integrating Active Perception with an Autonomous Robot Architecture // *Robotics and Automation Journal*. – 1999. – Vol. 29. – P. 175-186.
40. *Chella A., Cossentino M., Pirrone R., and Ruisi A.* Modeling ontologies for robotic environments // In *proceedings of the 14th international conference on Software engineering and knowledge engineering*. – ACM, 2002. – P. 80.
41. *Mendoza R., Johnston B., Yang F., Huang Z., Chen X., and Williams M.* OBOC: Ontology Based Object Categorisation for Robots // In *Proceedings of the 4th International Conference on Computational Intelligence, Robotics and Automation (CIRAS 2007)*, Palmerston North, New Zealand. Citeseer, 2007.
42. *Molich R. and Nielsen J.* Improving a human-computer dialogue // *Communications of the ACM*. – 1990. – Vol. 33 (3). – P. 348.
43. *Yanco H. and Drury J.* Classifying human-robot interaction: an updated taxonomy // In *Systems, Man and Cybernetics, 2004 IEEE International Conference on*. – 2004. – Vol. 3. – P. 2841-2846.
44. *Juarez A., Bartneck C., & Feijs L.* Using Semantic Web Technologies to Describe Robotic Embodiments // *Proceedings of the 6th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction, Lausanne*. – 2011. – P. 425-432.
45. *Богуславский А.А. и др.* Модели и алгоритмы для интеллектуальных систем управления. – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2019. – 232 с.

46. *Ахтеров А.В.* Некоторые аспекты интерпретирующей навигации мобильного робота. Препринт ИПМ № 97. – М.: 2005. – 16 с.
47. *Boguslavsky A.A., Sokolov S.M.* Component Approach to the Applied Visual System Software Development // 7th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics (SCI 2003), July 27-30, Orlando, Florida, USA, 2003.
48. *Newman W.* A Systematic Approach to Learning Robot Programming with ROS. – CRC Press, 2018.

#### REFERENCES

1. *Christensen H.I., Sloman A., Kruijff G-J. & J. Wyatt (Eds.)* Cognitive Systems. Reports on the European Union project on Cognitive Systems. Available at: <https://cordis.europa.eu/project/>.
2. RSS novosti. Novosti iskusstvennogo intellekta [RSS news. Artificial Intelligence News]. Available at: [https://ai-news.ru/2021/01/bespilotnye\\_karernye\\_samosvaly.html](https://ai-news.ru/2021/01/bespilotnye_karernye_samosvaly.html).
3. ООО «MosTransArenda» [MosTransArenda LLC]. Available at: <https://mtarenda.ru/articles/trend-na-bespilotnye-samosvaly-nabiraet-ovoroty/#>.
4. КОМЕК MASHINERI. Doydut li bespilotnye samosvaly Komatsu do Rossii? Ischeznet li professiya voditelya? [КОМЕК MACHINERY. Will Komatsu unmanned dump trucks reach Russia? Will the driver's profession disappear?]. Available at: <https://www.komek.ru/staty/doydut-li-bespilotnye-samosvaly-komatsu-do-rossii-ischeznet-li-professiya-voditelya/>.
5. Tadviser. Produkt:BelAZ-7513R\_(bespilotnyy\_samosval) [Advisor. Product: BelAZ-7513 R\_(unmanned dump truck). Available at: [https://www.tadviser.ru/index.php/Produkt:BelAZ-7513R\\_\(bespilotnyy\\_samosval\)](https://www.tadviser.ru/index.php/Produkt:BelAZ-7513R_(bespilotnyy_samosval)).
6. *Andrey Kozhemyakin.* Samosval na million [Dump truck for a million]. Available at: <https://dev.by/news/samosval-na-million>.
7. *Petrichkovich Ya., Solokhina T., i dr.* RoboDeus – 50-yadernaya geterogennaya SnK dlya vstraivaemykh sistem i robototekhniki [RoboDeus - 50-nuclear heterogeneous SnC for embedded systems and robotics], *Elektronika* [Electronics], 2020, No. 7 (00198), pp. 52-63.
8. NVidia Jetson AGX Xavier. Available at: <https://www.nvidia.com/ru-ru/autonomous-machines/embedded-systems/jetson-agx-xavier/>.
9. Accelerate Automotive with Intel. Available at: <https://intel.ru/content/www/ru/ru/automotive/products/programmable/overview.html>.
10. *Stephen Shankland.* Tesla self-driving car computer. Available at: <https://www.cnet.com/news/meet-tesla-self-driving-car-computer-and-its-two-ai-brains>.
11. *Genesereth M. and Fikes R.* Knowledge Interchange Format, Stanford Logic Report Logic-92-1. Stanford University, 1992.
12. CommonKADS General Information. Available at: <http://www.commonkads.uva.nl/frameset-commonkads.html>, 2003.
13. *Kiril'chenko A.A., Platonov A.K., Sokolov S.M.* Teoreticheskie aspekty organizatsii interpretiruyushchey navigatsii mobil'nogo robota. Preprint IPM № 19 [Theoretical aspects of the organization of interpretive navigation of a mobile robot. IPM Preprint No. 19]. Moscow, 2008.
14. *Laird J.E., Newell A. and Rosenbloom P.S.* Soar: An Architectue for General Intelligence, *Artificial Intelligence*, 1987, Vol. 33, pp. 1-64.
15. *Newell A. and Simon H.* GPS; A Program that Simulates Human Thought, McGraw-Hill, 1963.
16. *Pearson J.D., Huffman S.B., Willis M.B., Laird J.E. and Jones R.M.* A Symbolic Solution to Intelligent Real-Time Control, *Robotics and Autonomous Systems*, 1993, No. 11, pp. 279-291.
17. *Etherington D.* What Does Knowledge Representation Have to Say to Artificial Intelligence? Proceesings ate the AAAI, 1997.
18. *Sieghart R., Nourbakhsh I.* Introduction to Autonomous Mobile Robots. MIT Press 1997.
19. *Volpe R., Estlin T., Laubach S., Olson C. and Balaram J.* Enhanced Mars Rover Navigation Techniques, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Francisco, CA, 2000*.
20. *Wasson G., Kortenkamp D. and Huber E.* Integrating Active Perception with an Autonomous Robot Architecture, *Robotics and Automation Journal*, 1999, Vol. 29, pp. 175-186.
21. *Brooks R.A.* A Robust Layered Control System for a Mobile Robot, MIT AI Lab, A.I. Memo 864, Sept. 1985.
22. *Maes P. and Brooks R.* Learning to Coordinate Behaviors, *Proceedings AAAI*, 1990, pp. 796-802

23. Albus J., Lumia R., Fiala J. and Wavering A. NASREM: The NASA/NBS Standard Reference Model for Telerobot Control System Architecture, *Proceedings of the 20th International Symposium on Industrial Robots, Tokyo, Japan, 1989*.
24. Arkin R. Navigational Path Planning for a Vision-Based Mobile Robot, *Robotica*, 2003, No. 7, pp. 49-63.
25. Thorpe C. Vision and Navigation for the Carnegie Mellow NavLab, *IEEE PAMI*, 1988, No. 10 (3).
26. Kuipers B. The Spatial Semantic Hierarchy, *Artificial Intelligence*, 2000, Vol. 119 (1-2), pp. 191-233.
27. Maimone M. A Martian Vision. JPL, 2016.
28. Delaune J. Vision-Based Navigation for Mars Helicopters. JPL, 2021.
29. Dickmanns E.D. A General Dynamic Vision Architecture for UGV and UAV, *Journal of Applied Intelligence*, 1992, No. 2, pp. 251.
30. Lauria S., Kyriacou T., Bugmann G., Bos J., Klein E. Converting natural language route instructions into robot executable procedures, *Proc. IEEE Int. Workshop Roman, Berlin, Germany, 2002*, pp. 223-228.
31. Parker L.E. ALLIANCE: An architecture for fault tolerant multirobot cooperation, *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 1998, Vol. 14, No. 2, pp. 2202-40.
32. Sellami Z., Camps V., Aussenac-Gilles N., and Rougemaille S. Ontology Co-construction with an Adaptive Multi-Agent System: Principles and Case-Study, *Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management*, 2011, pp. 237-248.
33. Schlenoff C. and Messina E. A robot ontology for urban search and rescue, in *Proceedings of the 2005 ACM workshop on Research in knowledge representation for autonomous systems*, 2005, pp. 273-4.
34. Tran Q. and Low G. MOBMAS: A methodology for ontology based multi-agent systems development, *Information and Software Technology*, Jun. 2008, Vol. 50, No. 7-8, pp. 697-722.
35. Gennari J.H., Musen M.A., Ferguson R.W., Grosso W.E., Crubezy M., Eriksson H., Noy N.F., and Tu S.W. The evolution of protégé: an environment for knowledge-based systems development, *International Journal of Human-Computer Studies*, 2003, Vol. 58 (1), pp. 89-123.
36. Matthews B. Semantic web technologies, *E-learning*, 2005, No. 6(6):8.
37. Pearson J.D., Huffman S.B., Willis M.B., Laird J.E. and Jones R.M. A Symbolic Solution to Intelligent Real-Time Control, *Robotics and Autonomous Systems*, 1993, No. 11, pp. 279-291.
38. Schlenoff C. Linking Sensed Images to an Ontology of Obstacles to Aid in Autonomous Driving, *Proceedings of the 18th National Conference on Artificial Intelligence: Workshop on Ontologies for the Semantic Web*, 2002.
39. Wasson G., Kortenkamp D. and Huber E. Integrating Active Perception with an Autonomous Robot Architecture, *Robotics and Automation Journal*, 1999, Vol. 29, pp. 175-186.
40. Chella A., Cossentino M., Pirrone R., and Ruisi A. Modeling ontologies for robotic environments, In *pro ceedings of the 14th international conference on Software engineering and knowledge engineering*. ACM, 2002, P. 80.
41. Mendoza R., Johnston B., Yang F., Huang Z., Chen X., and Williams M. OBOC: Ontology Based Object Categorisation for Robots, In *Proceedings of the 4th International Conference on Computational Intelligence, Robotics and Automation (CIRAS 2007)*, Palmerston North, New Zealand. Citeseer, 2007.
42. Molich R. and Nielsen J. Improving a human-computer dialogue, *Communications of the ACM*, 1990, Vol. 33 (3), pp. 348.
43. Yanco H. and Drury J. Classifying human-robot interaction: an updated taxonomy, In *Systems, Man and Cybernetics, 2004 IEEE International Conference on*, 2004, Vol. 3, pp. 2841-2846.
44. Juarez A., Bartneck C., & Feijs L. Using Semantic Web Technologies to Describe Robotic Embodiments, *Proceedings of the 6th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction, Lausanne*, 2011, pp. 425-432.
45. Boguslavskiy A.A. *i dr. Modeli i algoritmy dlya intellektual'nykh sistem upravleniya* [Models and algorithms for intelligent control systems]. Moscow: IPM im. M.V. Keldysha RAN, 2019, 232 p.
46. Akhterov A.V. Nekotorye aspekty interpretiruyushchey navigatsii mobil'nogo robota. Preprint IPM № 97 [Some aspects of the mobile robot's interpretive navigation. IPM preprint No. 97]. Moscow: 2005, 16 p.

47. Boguslavsky A.A., Sokolov S.M. Component Approach to the Applied Visual System Software Development, 7th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics (SCI 2003), July 27-30, Orlando, Florida, USA, 2003.
48. Newman W. A Systematic Approach to Learning Robot Programming with ROS. CRC Press, 2018.

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

**Соколов Сергей Михайлович** – KIAM; e-mail: sokolsm@list.ru; г. Москва, Россия; тел.: 84992501314.

**Sokolov Sergey Mikhailovich** – KIAM; e-mail: sokolsm@list.ru; Moscow, Russia; phone: +74992501314.

УДК 007:621.865.8

DOI 10.18522/2311-3103-2022-1-59-70

**А.И. Наговицин, Б.Б. Молоткова, Д.У. Азимов**

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ЗА НАЗНАЧЕНИЕМ РАДИОЧАСТОТ НА ОСНОВЕ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ РАДИОСВЯЗИ В ПОДРАЗДЕЛЕНИЯХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

*Применение в Вооруженных Силах Российской Федерации широкой номенклатуры радиостанций различных поколений привело к невозможности полного учета всех их особенностей при планировании радиосвязи. К примеру, учесть весь перечень самопораженных частот излучениями собственных гетеродинов различных радиостанций, а также запрещенных для установления и ведения радиосвязи частот становится крайне сложной задачей. В связи с этимкратно возросли риски отсутствия радиосвязи или нарушения правил использования радиочастотного диапазона в том числе и в подразделениях робототехнических комплексов военного назначения (РТК ВН). В статье отмечено, что одной из самых больших проблем при создании единой цифровой системы управления боем, технической основой которой будет являться беспроводная сеть связи - сеть радиосвязи, работающая в различных частотных диапазонах, сегодня является выполнение требований электромагнитной совместимости (ЭМС) и в частности выполнение требований по корректному использованию радиочастотного спектра. Для оптимизации процесса планирования радиосвязи в формированиях РТК ВН, повышения его оперативности и эффективности в статье предложено создать и применить автоматизированную систему контроля за назначением радиочастот на основе риск-ориентированного подхода. Показано, что риск-ориентированный подход при планировании радиосвязи в подразделениях РТК ВН предполагает проведение сравнительной оценки номинала назначенной рабочей частоты со списком самопораженных частот каждой из применяемых радиостанций, а также со списком запрещенных частот для установления радиосвязи (частоты для передачи сигналов бедствия и др.). Аргументировано отмечено, что такой подход позволит снизить риски отсутствия радиосвязи или нарушения правил использования радиочастотного диапазона. Позволит оптимизировать процессы автоматизированного планирования радиосвязи в формированиях РТК ВН и повысить оперативность и эффективность автоматизированного планирования и управления радиосвязью в ходе боевых действий. В статье описан алгоритм работы автоматизированной системы контроля за назначением радиочастот. Программная реализация данного алгоритма предполагает создание и хранение в соответствующей области памяти библиотек (баз данных) основных запрещенных частот определенных законодательством РФ. Кроме того, в данных библиотеках (базах данных) хранятся списки самопораженных частот излучениями собственных гетеродинов всех типов применяемых радиостанций, приведенных в техническом описании каждой из применяемых радиостанций.*

*Планирование радиосвязи; частотный план; самопораженная и запрещенная частота; автоматизированный контроль за назначением радиочастот.*

A.I. Nagovitsyn, B.B. Molotkova, D.U. Azimov

**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**

*The use of a wide range of radio stations of various generations in the Armed Forces of the Russian Federation has led to the impossibility of fully taking into account all their features when planning radio communications. For example, it becomes an extremely difficult task to take into account the entire list of self-detected frequencies by the emissions of their own heterodynes of various radio stations, as well as frequencies prohibited for establishing and conducting radio communications. In this regard, the risks of lack of radio communication or violation of the rules for the use of the radio frequency range have increased many times, including in the units of military robotic complexes (RTK VN). The article notes that one of the biggest problems in creating a unified digital combat control system, the technical basis of which will be a wireless communication network - a radio communication network operating in various frequency ranges, today is meeting the requirements of electromagnetic compatibility (EMC) and, in particular, meeting the requirements for the correct use of the radio frequency spectrum. To optimize the process of radio communication planning in the formations of the RTK VN, to increase its efficiency and effectiveness, the article proposes to create and apply an automated system for monitoring the assignment of radio frequencies based on a risk-based approach. It is shown that the risk-oriented approach when planning radio communications in the divisions of the RTK VN involves a comparative assessment of the nominal value of the assigned operating frequency with a list of self-detected frequencies of each of the radio stations used, as well as with a list of prohibited frequencies for establishing radio communications (frequencies for transmitting distress signals, etc.). It is reasoned that this approach will reduce the risks of lack of radio communication or violation of the rules for using the radio frequency range. It will optimize the processes of automated planning of radio communications in the formations of the RTK VN and increase the efficiency and effectiveness of automated planning and management of radio communications during combat operations. The article describes the algorithm of the automated control system for the assignment of radio frequencies. The software implementation of this algorithm involves the creation and storage in the appropriate memory area of libraries (databases) of the main prohibited frequencies defined by the legislation of the Russian Federation. In addition, these libraries (databases) store lists of self-reflected frequencies by the emissions of their own heterodynes of all types of radio stations used, given in the technical description of each of the radio stations used.*

*Radio communication planning; frequency plan; self-detected and forbidden frequency; automated control over the assignment of radio frequencies.*

**Введение.** В настоящее время и, вероятно, в будущем требования на использование радиочастотного спектра будут определяться двумя взаимосвязанными факторами. Первый из них связан с новой телекоммуникационной средой, характеризующейся большей свободой правил, обменом информацией в глобальных масштабах, появлением новых служб и усиливающейся конкуренцией поставщиков услуг по связи. Второй фактор вызван быстрым развитием новых технологий, особенно в области связи, глобальной навигации, военной техники, систем точного наведения оружия.

Управление использованием радиочастотного спектра устанавливает правила и принципы, гарантирующие, что спектр радиочастот, являющийся дефицитным ресурсом, правильно разделяется между пользователями, в максимальной степени удовлетворяющими определенным требованиям.

Однако, вследствие определенных изменений в использовании связи, сделавших ее более доступной практически для всех структур привело, в частности, к утрате монополии государства в этой области и доступ даже вооруженных сил к радиочастотному спектру стал определяться теми же правилами, что и для других групп пользователей. Все это привело к резкому усложнению планирования ра-

диосвязи в формированиях вооруженных сил и, в частности, в частях и подразделениях применяющих робототехнические комплексы военного назначения (РТК ВН), особенно при управления радиосвязью в ходе боевых действий.

Применение в Вооруженных Силах Российской Федерации широкой номенклатуры радиостанций различных поколений привело к невозможности полного учета всех их особенностей при планировании радиосвязи. К примеру, учесть весь перечень самопораженных частот излучениями собственных гетеродинов различных радиостанций, а также запрещенных для установления и ведения радиосвязи частот становится крайне сложной задачей. В связи с этимкратно возросли риски отсутствия радиосвязи или нарушения правил использования радиочастотного диапазона.

Для оптимизации процесса планирования радиосвязи в формированиях РТК ВН, повышения его оперативности и эффективности предлагается использовать программу реализующую автоматизированную систему контроля за назначением радиочастот на основе риск-ориентированного подхода при планировании радиосвязи в подразделениях РТК ВН.

Риск-ориентированный подход при планировании радиосвязи в подразделениях РТК ВН предполагает проведение сравнительной оценки номинала назначенной рабочей частоты со списком самопораженных частот каждой из применяемых радиостанций, а также со списком запрещенных частот для установления радиосвязи (частоты для передачи сигналов бедствия и др.). Такой подход позволяет снизить риски отсутствия радиосвязи или нарушения правил использования радиочастотного диапазона. Позволяет оптимизировать процессы автоматизированного планирования радиосвязи в формированиях РТК ВН. Повышает оперативность и эффективность автоматизированного планирования и управления радиосвязью в ходе боевых действий.

1. Факторы, влияющие на использование радиочастотного спектра при организации радиосвязи в подразделениях робототехнических комплексов военного назначения. Как показывает анализ динамики развития роботизированных боевых систем [1–3 ] в настоящее время мы находимся на втором его этапе – этапе создания дистанционно управляемых комплексов (рис. 1–3).

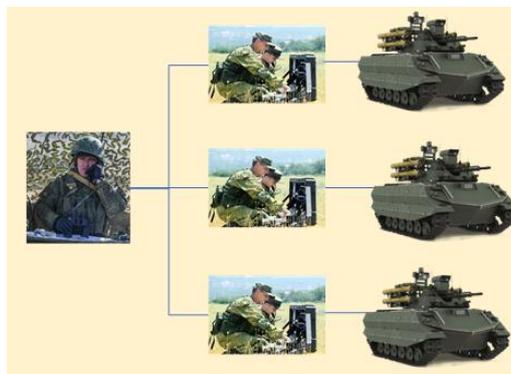


Рис. 1. Командир управляет удаленными экипажами вне зоны поражения

Третий этап развития предполагает уже супервизорное цифровое управление боем (рис. 4).

Второй, и тем более, третий этап создания роботизированных систем для формирования локального навигационного поля, цифрового картографирования и самоорганизующейся системы связи предполагает создание единой цифровой системы управления боем, технической основой которой будет являться беспроводная сеть связи – сеть радиосвязи, работающая в различных частотных диапазонах.



Рис. 2. Дистанционное полуавтономное наведение на цель



Рис. 3. Применение боеприпасов удаленным экипажем



Рис. 4. Супервизорное цифровое управление боем (третий этап развития РТК ВН)

Одной из самых больших проблем при ее создании сегодня является выполнение требований ЭМС и в частности выполнение требований по корректному использованию радиочастотного спектра.

Управление использованием радиочастотного спектра устанавливает правила и принципы, гарантирующие, что спектр радиочастот, являющийся дефицитным ресурсом, правильно разделяется между пользователями, в максимальной степени удовлетворяющими определенным требованиям.

Аппаратура беспроводных каналов связи РТК ВН должна нормально функционировать и не создавать помех в условиях совместной работы с аппаратурой систем, объектов, для которых она предназначена, а также с аппаратурой другого назначения, которая может быть использована совместно с данной аппаратурой [4, 5]. Анализ применения существующих и вновь разрабатываемых радиостанций показал, что снизить или убрать вовсе, к примеру, уровень излучения гетеродинов собственных приемных устройств пока не представляется возможным. Поэтому при планировании радиосвязи, распределении и назначении рабочих частот для организации радиосвязи, необходимо учитывать тот факт, что практически у всех радиостанций есть огромный перечень самопораженных частот, настройка на которые, приводит к невозможности установления радиосвязи даже на минимальные расстояния.

Применение в Вооруженных Силах Российской Федерации широкой номенклатуры радиостанций различных поколений привело к невозможности полного учета всех их особенностей при планировании радиосвязи. К примеру, учесть весь перечень самопораженных частот излучениями собственных гетеродинов различных

радиостанций, а также запрещенных для установления и ведения радиосвязи частот, становится крайне сложной задачей. В связи с этим кратно возросли риски отсутствия радиосвязи или нарушения правил использования радиочастотного диапазона.

Все это привело к резкому усложнению планирования радиосвязи в формированиях вооруженных сил и, в частности, в подразделениях применяющих РТК ВН, особенно при управления радиосвязью в ходе боевых действий.

Как показывает опыт боевых действий [6] на начальном этапе боевых действий специалисты применяли отработанные в мирное время методы управления частотным спектром. Они базировались на концепции централизованного управления: каждая частота назначалась и учитывалась радиочастотной службой штаба соответствующего звена управления. В связи с этим создавались постоянные базы данных, которые тщательно обновлялись и учитывались по мере распределения частот.

Концепция централизованного управления предполагает, что для каждого радиосредства известны технические характеристики и географические координаты и что оно практически стационарно или перемещается незначительно. Исходя из этого, производится расчет дальности приема и направления распространения радиосигнала. Затем статические характеристики сводятся в общий частотный план, целью которого является разделение радиостанций в пространстве и по частотам, чтобы избежать взаимных помех. Все это как правило осуществляется с использованием высокопроизводительных средств вычислительной техники.

Однако с высокой динамикой боевых действий, поддержание базы данных оказалось трудно выполнимой задачей вследствие постоянного изменения организационно-штатной структуры вновь прибывающих войск и их перемещений.

С началом перемещения войск в ходе боевых действий на значительные удаления начиналось изменение их организационной структуры. Тщательно разработанный частотный план для мест постоянной дислокации, уже не позволял избежать взаимных помех поскольку в динамике не обеспечивается разделение в пространстве и по частотам.

Централизованный принцип распределения частотного спектра не всегда успевал за динамикой изменения боевой обстановки, и постоянной реконфигурацией систем управления. Поэтому подразделения, особенно тактического звена управления, вынуждены были оперативно восстанавливать радиосети и радионаправления выбирая (назначая) частоты самостоятельно. По словам одного из операторов, жизнь заставляла использовать неразрешенные частоты. "Командование не волнуется тот факт, на каких частотах вы работаете, – говорит он. – Главное – выполнение боевой задачи. Поэтому у меня было два списка частот – разрешенных для использования вышестоящим штабом и выбранных нами" [6]. В таких условиях, самостоятельно выбирая радиочастоту для работы, оператор зачастую не имел возможности сравнить выбранную частоту со списком запрещенных или самопораженных частот. А это неизбежно приводило к различным нарушениям радиодисциплины и правил ЭМС.

**2. Контроль за назначением радиочастот на основе риск-ориентированного подхода.** Для оптимизации процесса планирования радиосвязи в подразделениях робототехнических комплексов военного назначения, повышения его оперативности и эффективности должна применяться программа, реализующая автоматизированную систему контроля за назначением радиочастот. Такая программа уже разработана в Михайловской военной артиллерийской академии, получено свидетельство о ее государственной регистрации [7]. Эта программа интегрирована на автоматизированное рабочее место связиста в одной из КШМ и в настоящее время проходит апробацию.

В основу программы контроля за назначением радиочастот положен принцип риск-ориентированного подхода (рис. 5).



Рис. 5. Основное окно автоматизированной системы контроля радиочастоты

Риск-ориентированный подход при планировании радиосвязи в соединениях, частях и подразделениях ТК ВН предполагает решение, по крайней мере, двух задач. Во-первых, проведение сравнительной оценки номинала назначенной рабочей частоты со списком запрещенных частот для установления радиосвязи (частоты для передачи сигналов бедствия, и др.), во-вторых, сравнение со списком самопораженных частот каждой из применяемых радиостанций. Такой подход позволяет снизить риски отсутствия радиосвязи или нарушения правил использования радиочастотного диапазона. Позволяет оптимизировать процессы автоматизированного планирования радиосвязи в формированиях РТК ВН. Повышает оперативность и эффективность автоматизированного планирования и управления радиосвязью особенно в ходе боевых действий.

Автоматизированная система контроля радиочастот (АСК РЧ) представляет собой программу (программный продукт), которая может быть интегрирована на АРМ должностных лиц каждой КШМ формирований РТК ВН в виде расчетной задачи.

Данная АСК РЧ учитывает преэмптентность (совместимость) поколений радиостанций военного назначения.

На рис. 6 показана логическая схема алгоритма процесса автоматизированного контроля за назначением радиочастот.

Программная реализация алгоритма осуществляет сравнительную оценку номинала назначенной рабочей частоты со списком самопораженных частот каждой из применяемых радиостанций, а также со списком запрещенных частот (частоты для передачи сигналов бедствия, и др.) и по результатам контроля делается обоснованный вывод о пригодности (непригодности) данной частоты для установления радиосвязи.

Оператор 2. осуществляет ввод исходной информации: выбор типа радиостанций, работающих в данной радиосети (радионаправлении)

Оператор 3. осуществляет ввод рабочей частоты данной радиосети (радионаправления).

Оператор 4. Осуществляет сравнение выбранной частоты с перечнем запрещенных частот.

**b2** – база данных запрещённых частот, если выполняется условие **b2=true** (выбранная частота совпадает с одной из частот базы данных запрещённых частот), то на экран выводится сообщение «ЗАПРЕЩЕНА», если нет, то осуществляется переход к оператору 5.

Оператор 5. Осуществляет проверку выполнения условия **b&&!b1** – условие при котором выбранная частота совпадает с базой данных самопораженных частот первой радиостанции и не совпадает с базой данных самопораженных частот для второй радиостанции, в этом случае то на экран выводится сообщение «ЧАСТОТА

**ЯВЛЯЕТСЯ САМОПОРАЖЕННОЙ ДЛЯ РС:** "название первой радиостанции"». **b** – база данных самопораженных частот для первой выбранной радиостанции. **b1** – база данных самопораженных частот для второй выбранной радиостанции. Если условие не выполняется осуществляется переход к оператору 6.

Оператор 6. Осуществляет проверку выполнения условия **!b && b1** – условие при котором выбранная частота не совпадает с базой данных самопораженных частот первой радиостанции, но совпадает с базой данных

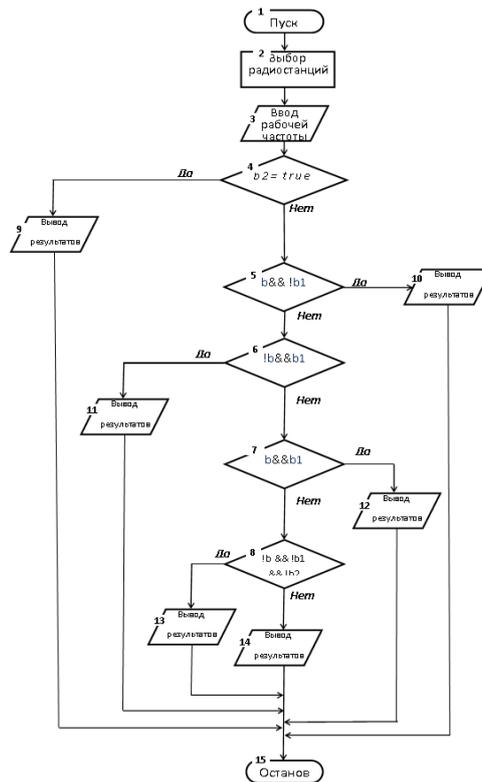


Рис. 6. Логическая схема алгоритма процесса автоматизированного контроля за назначением радиочастот.

самопораженных частот для второй радиостанции, в этом случае на экран выводится сообщение «**ЧАСТОТА ЯВЛЯЕТСЯ САМОПОРАЖЕННОЙ ДЛЯ РС:** "название второй радиостанции"». Если условие не выполняется осуществляется переход к оператору 7.

Оператор 7. Осуществляет проверку выполнения условия **b && b1** – условие при котором выбранная частота совпадает с базой данных самопораженных частот первой радиостанции и совпадает с базой данных самопораженных частот для второй радиостанции, в этом случае на экран выводится сообщение «**ЧАСТОТА ЯВЛЯЕТСЯ САМОПОРАЖЕННОЙ ДЛЯ ОБЕИХ РС**». Если условие не выполняется осуществляется переход к оператору 8.

Оператор 8. Осуществляет проверку выполнения условия **b && !b1 && !b2** – условие при котором выбранная частота не совпадает с базой данных самопораженных частот первой радиостанции и не совпадает с базой данных самопораженных частот для второй радиостанции, в этом случае на экран выводится сообщение надпись «**РАЗРЕШЕНА К ПРИМЕНЕНИЮ**».

Создание библиотек (баз данных) предполагает ввод в соответствующую область памяти основных запрещенных и самопораженных частот излучениями собственных гетеродинов всех типов применяемых радиостанций.

Существуют запрещенные радиочастоты определенные законодательством РФ, об этом говорит Федеральный закон "О связи" от 07.07.2003 №126-ФЗ (последняя редакция) и 08.12.2011 №424-ФЗ определяют порядок пользования радиочастотами [8].

495-505 кГц (шаг 10) – радиочастота 500 кГц является международной частотой бедствия и вызова для радиотелеграфии Морзе. Запрещаются любые излучения, которые могут создавать вредные помехи связям в случае бедствия, аварии, срочности или для обеспечения безопасности на частотах 500 кГц, 2174.5 кГц, 2182 кГц, 2187.5 кГц, 4125 кГц, 4177.5 кГц, 4207.5 кГц, 6215 кГц, 6268 кГц, 6312 кГц, 8291 кГц, 8376.5 кГц, 8414.5 кГц, 12290 кГц, 12520 кГц, 12577 кГц, 16420 кГц, 16695 кГц, 16804.5 кГц, 121.5 МГц, 156.525 МГц, 156.8 МГц и в полосах частот 406–406.1 МГц, 1544-1545 МГц и 1645.5–1646.5 МГц.

Запрещаются также любые излучения на любой другой дискретной частоте, причиняющие вредные помехи связям в случае бедствия и для обеспечения безопасности.

2173.5-2190.5 (шаг 17) – радиочастота 2182 кГц (несущая) является международной частотой бедствия и вызова для радиотелефонии. Эта радиочастота может использоваться для целей поиска и спасания пилотируемых космических кораблей.

Радиочастоты 2174.5 кГц, 4177.5 кГц, 6268 кГц, 8376.5 кГц, 12520 кГц и 16695 кГц являются международными частотами, предназначенными исключительно для обмена информацией в случае бедствия и для обеспечения безопасности на море с использованием аппаратуры узкополосной телеграфии (буквопечатание).

Радиочастоты 2187.5 кГц, 4207.5 кГц, 6312 кГц, 8114.5 кГц, 12577 кГц и 16804.5 кГц являются международными частотами, предназначенными исключительно для вызова при бедствии и в целях безопасности плавания с использованием аппаратуры цифрового избирательного вызова. Другие передачи в указанной полосе частот запрещаются.

117.975-137 (шаг 19.025) - полоса радиочастот предназначена для преимущественного использования воздушной подвижной службой. Отдельные участки в этой полосе радиочастот могут использоваться воздушной подвижной спутниковой (Р) службой. Воздушная аварийная радиочастота 121.5 МГц используется станциями воздушной подвижной службы, работающими в полосе частот 117.975–137 МГц, для радиотелефонной связи в случае бедствия и для обеспечения безопасности.

Частота 121.5 МГц может также использоваться для этих целей станциями спасательных средств и аварийными радиомаяками-указателями места бедствия, для целей поиска и спасания пилотируемых космических кораблей. Полоса 121.45–121.55 МГц может использоваться подвижной спутниковой службой для приема на борту спутника сигналов от аварийных радиомаяков, передающих сигналы на радиочастоте 121.5 МГц.

123.1 МГц является вспомогательной частотой для воздушной аварийной частоты 121.5 МГц и предназначена для использования станциями воздушной подвижной службы, а также другими подвижными и сухопутными станциями, участвующими в совместных поисковых и спасательных операциях. Подвижные станции морской подвижной службы могут поддерживать связь на этих частотах со станциями воздушной подвижной службы в случае бедствия и для обеспечения безопасности.

136-137 МГц может использоваться службой космической эксплуатации (Космос-Земля), службой космических исследований (Космос-Земля) и метеорологической спутниковой (Космос-Земля) службой на вторичной основе.

**Раздел I. Перспективы применения робототехнических комплексов**

156.8 МГц является международной частотой бедствия, безопасности и вызова в морской подвижной службе для радиотелефонии. Эта радиочастота может использоваться для поиска и спасания пилотируемых космических кораблей.

406-406.1 (шаг 0.1) – полоса радиочастот предназначается исключительно для спутниковых аварийных радиомаяков – указателей места бедствия (Земля-Космос).

Кроме запрещенных, у каждой радиостанции имеется список самопораженных частот, и их перечень перечислен в техническом описании конкретной радиостанции [9–21].

Так, например, в табл. 1 приведен перечень самопораженных частот излучениями собственного гетеродина радиостанции Р-187-П1, которые в настоящее время поступают на вооружение, в том числе, и в подразделения РТК ВН.

Анализ табл. 1 показал, что количество самопораженных частот излучениями собственного гетеродина столь велико, что без программно-аппаратных средств контроля назначаемых (выбираемых для работы) частот осуществить корректный и своевременный контроль не представляется возможным.

Таблица 1

**Перечень самопораженных частот излучениями собственного гетеродина радиостанции Р-187-П1**

27450-27475	116775-116800	160350-160375	211900-211950	226525	238950
30700	117425-117450	161025-161050	212950-212375	226950	239375
32700-32725	118100-118125	162350	212775-212800	227375	239800
35975	118800	162925-162950	213200-213225	227800	240250
37750-37825	124550-124575	16300-163650	213625-213650	228225	240675
40150-40200	132200-132225	164250-164300	214050-214075	228650	241100
42175-42200	132525-132875	164725-164750	214475-214525	229075	241525
47700-47750	133575	164900-164975	214925-216650	229525	241950
48275-48300	134200-134250	165525-165575	217050-217500	229950	242375
52875-52900	137275-137300	166175-166925	217500-217525	230375	242825
54000	138700-138900	167400-169750	217925-217950	230400	243250
54900-54925	139550	170175-170275	218350-218375	230800	243675
68750-68775	148500	170850-170920	218775-218800	231225	244100
70800	149825-150025	171550-171575	219200-219650	231650	244525
71500	150475	172200	220075	232100	244950
75000-75025	121125-151150	172850-172875	220500	232525	245375
76600-76625	151800-151825	173500-173550	220925	232950	245400
77875	152450-152475	174175-174200	221375	233375	245825
79800-79825	153100-153125	174850	221800	233800	246250
80225	153775-153800	175425-175450	222225	234225	246675
82350-96025	154400-154450	180000	222650	234650	247100
97100-97125	155075-155100	190150-190200	223075	234675	247525
101400-101450	155750-155775	192175-198300	223500	235100	247950
101475-102575	156000	202875-202900	223925	235525	247975
107800-107825	156400-156425	208050-208075	223950	235950	248400
109800-109850	156950	208400-208425	224375	236375	248825

112800	157050-157100	208475-209800	224800	236800	249250
113475	157725-127750	210100-210125	225000	237225	249675
114125-114150	158300-158325	210200-210225	225225	237250	250100
114800-114825	158400-158425	210625-210650	225650	237675	250525
115450-115475	159025-159075	211050-211075	226075	238100	253975
116125-116150	159700-159725	211475-211500	226500	238525	254400

На рис. 7, 8 и 9 представлены результаты контроля выбранных частот.



Рис. 7. Результат контроля: Выбранная частота совпадает с одной из частот базы данных запрещённых частот



Рис. 8. Результат контроля: Выбранная частота совпадает с одной из частот базы данных самопораженных частот

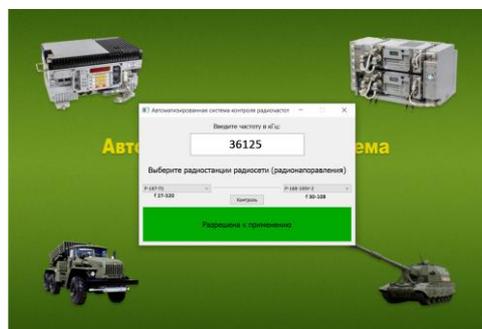


Рис. 9. Результат контроля: Выбранная частота разрешена к применению

**Заключение.** Таким образом, при применении частей и подразделений РТК ВН использование разработанной программы контроля за назначением радиочастот на основе риск-ориентированного подхода позволит снизить риски отсутствия радиосвязи или нарушения правил использования радиочастотного диапазона.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Пшихонов В.Х. [и др.]*. Концепция формирования оперативной группы РТК // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 1 (211). – С. 6-16.
2. *Наговицин А.И., Молоткова Б.Б.* Робототехнические комплексы военного назначения, перспективы их применения в РВ и А ВС РФ // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 1 (186). – С. 6-19.
3. *Наговицин А.И., Молоткова Б.Б.* Оперативно-тактические требования к системе противодействия наземных РТК ВН средствам радиоэлектронного поражения (подавления) противника // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 1 (218). – С. 30-47.
4. *Антохин Е.А., Панасенко Н.Н., Чернова А.Д.* Основные требования к беспроводным каналам связи наземных робототехнических комплексов военного назначения // Робототехника и техническая кибернетика. научно-технический журнал. – 2017. – № 4 (17).
5. ГОСТ В 25232-82 Совместимость радиоэлектронных средств электромагнитная. Порядок обеспечения электромагнитной совместимости.
6. *Черкасов В.* Радиочастотная служба в современной войне. Из опыта войны в Персидском заливе 1991 г // Зарубежное военное обозрение. – 1993. – № 11.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022611754 от 25.02 2022 г.
8. Постановление Правительства РФ от 18 сентября 2019 г. N 1203-47"Об утверждении Таблицы распределения полос радиочастот между радиослужбами Российской Федерации и признании утратившими силу некоторых постановлений Правительства Российской Федерации" с изменениями и дополнениями от 4 мая 2021 г.
9. Техническое описание радиостанции Р-159М.
10. Техническое описание радиостанции Р-123М.
11. Техническое описание радиостанции Р-130М.
12. Техническое описание радиостанции Р-111М.
13. Техническое описание радиостанции Р-173М.
14. Техническое описание радиостанции Р-171М.
15. Техническое описание радиостанции Р-134.
16. Техническое описание радиостанции Р-163-50У.
17. Техническое описание радиостанции Р-163-10В.
18. Техническое описание радиостанции Р-168-5УН.
19. Техническое описание радиостанции Р-168-100У2.
20. Техническое описание радиостанции Р-168-100КА.
21. Техническое описание радиостанции Р-187-П1.

#### REFERENCES

1. *Pshikhopov V.Kh. [i dr.]*. Kontseptsiya formirovaniya operativnoy gruppy RTK [The concept of the formation of the RTK operational group], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 1 (211), pp. 6-16.
2. *Nagovitsin A.I., Molotkova B.B.* Robototekhnicheskie komplekсы voennogo naznacheniya, perspektivy ikh primeneniya v RV i A VS RF [Robotic complexes for military purposes, prospects for their application in the RV and A of the Armed Forces of the Russian Federation], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 1 (186), pp. 6-19.
3. *Nagovitsin A.I., Molotkova B.B.* Operativno-takticheskie trebovaniya k sisteme protivodeystviya nazemnykh RTK VN sredstvam radioelektronного porazheniya (podavleniya) protivnika [Operational and tactical requirements for the system of countering ground-based RTK VN means of electronic destruction (suppression) of the enemy], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. 1 (218), pp. 30-47.

4. *Antokhin E.A., Panasenko N.N., Chernova A.D.* Osnovnye trebovaniya k besprovodnym kanalam svyazi nazemnykh robototekhnicheskikh kompleksov voennogo naznacheniya [Basic requirements for wireless communication channels of ground-based robotic complexes for military purposes], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika. nauchno-tekhnicheskii zhurnal* [Robotics and technical cybernetics. scientific and technical journal], 2017, No. 4 (17).
5. GOST V 25232-82 Sovmestimost' radioelektronnykh sredstv elektromagnitnaya. Poryadok obespecheniya elektromagnitnoy sovmestimosti [GOST B 25232-82 Electromagnetic compatibility of radio-electronic means. The procedure for ensuring electromagnetic compatibility].
6. *Cherkasov V.* Radiochastotnaya sluzhba v sovremennoy voyne. Iz opyta voyny v Persidskom zalive 1991 g [Radio frequency service in modern warfare. From the experience of the Persian Gulf War in 1991], *Zarubezhnoe voennoe obozrenie* [Foreign Military Review], 1993, No. 11.
7. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2022611754 ot 25.02 2022 g. [Certificate of state registration of the computer program No. 2022611754 dated 25.02 2022].
8. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 18 sentyabrya 2019 g. N 1203-47"Ob utverzhdenii Tablitsy raspredeleniya polos radiochastot mezhdru radiosluzhbbami Rossiyskoy Federatsii i priznanii utrativshimi silu nekotorykh postanovleniy Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii" s izmeneniyami i dopolneniyami ot 4 maya 2021 g. [Decree of the Government of the Russian Federation of September 18, 2019 N 1203-47"On the approval of the Table of distribution of Radio Frequency Bands between the radio services of the Russian Federation and the invalidation of Certain resolutions of the Government of the Russian Federation" with amendments and additions dated May 4, 2021].
9. Technical description of the radio station P-159M.
10. Technical description of the radio station P-123M.
11. Technical description of the radio station P-130M.
12. Technical description of the radio station P-111M.
13. Technical description of the radio station P-173M.
14. Technical description of the radio station P-171M.
15. Technical description of the radio station P-134.
16. Technical description of the radio station P-163-50У.
17. Technical description of the radio station P-163-10В.
18. Technical description of the radio station P-168-5УН.
19. Technical description of the radio station P-168-100У2.
20. Technical description of the radio station P-168-100КА.
21. Technical description of the radio station P-187-П1.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.А. Кежаев.

**Наговицин Александр Иванович** – Михайловская военная артиллерийская академия; e-mail: alexander@nagovitsin.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 88125421433 (сл.), 89112160000 (моб.); кафедра автоматизированного управления; к.в.н.; доцент.

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

**Азимов Дониёр Уткиржонович** – e-mail: alexander@nagovitsin.ru; тел.: 89516797171; курсант факультета автоматизированных систем управления.

**Nagovitsin Aleksandr Ivanovich** – Mihajlovskaya voennaya artillerijskaya akademiya; e-mail: alexander@nagovitsin.ru; Saint Petersburg, Russia; phone: +78125421433 (sl.), 89112160000 (mob.); the department of automated control; cand. of milit. sc.; associate professor.

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

**Azimov Doniyor Utkirzhonovich** – e-mail: alexander@nagovitsin.ru; phone: +79516797171; Cadet of the Faculty of Automated Control Systems.

**П.А. Гессен, А.И. Лизин, В.А. Павлова, В.А. Тупиков**

**МОДУЛЬ КОРРЕКТИРОВКИ ПАРАМЕТРОВ АЛГОРИТМОВ  
АВТОМАТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ И СОПРОВОЖДЕНИЯ  
ОБЪЕКТОВ ДЛЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ**

*В целях создания инновационного модуля автоматической корректировки алгоритмов автоматического обнаружения и сопровождения объектов с обучением в реальном времени произведено исследование мирового опыта в области автоматического сопровождения общего назначения с возможностью распознавания объекта сопровождения для применения во встраиваемых вычислительных устройствах оптико-электронных систем перспективных робототехнических комплексов. На основе проведенных исследований отобраны и протестированы методы и подходы, которые позволяют с наибольшей точностью, при сохранении высокой вычислительной эффективности, обеспечивать обучение классификаторов на лету (online learning) без априорного знания о типе объекта слежения и обеспечивать последующую корректировку во время слежения и обнаружение исходного объекта в случае его кратковременной потери. В число таких способов входит гистограмма направленных градиентов – дескриптор ключевых признаков, основывающийся на анализе распределения градиентов яркости изображения объекта. Его использование позволяет сократить количество используемой информации без потери ключевых данных об объекте и увеличить скорость обработки изображений. В статье обоснован выбор одного из алгоритмов классификации в режиме реального времени, позволяющего решить задачу бинарной классификации – метода опорных векторов. В виду высокой скорости обработки данных и необходимости небольшого количества исходных обучающих данных для построения разделяющей гиперплоскости, на основе которой и происходит классификация объектов, данный метод выбран как наиболее подходящий для решения поставленной задачи. Для осуществления online-обучения была выбрана модификация метода опорных векторов, реализующая стохастический градиентный спуск на каждом шаге работы алгоритма – Regasos. Еще одним вспомогательным способом является метод кластеризации ключевых точек – таким образом обеспечивается ускоренный выбор объектов для обучения и классификации. Авторами исследования проведена разработка и полунатурное моделирование предлагаемого модуля, проведена оценка эффективности его работы в задачах корректировки и обнаружения объекта интереса в режиме реального времени с предварительным online-обучением в процессе слежения за объектом. Разработанный алгоритм показал высокую эффективность при решении поставленной задачи. В заключении предложены дальнейшему повышению точности и вероятности обнаружения объекта интереса разработанным алгоритмом, а также по повышению производительности путем оптимизации вычислений.*

*Автоматическое обнаружение; обучение на лету; метод опорных векторов; гистограмма направленных градиентов; кластеризация; автоматическое сопровождение.*

**P.A. Gessen, A.I. Lizin, V.A. Pavlova, V.A. Tupikov**

**MODULE FOR ADJUSTING PARAMETERS OF ALGORITHMS  
FOR AUTOMATIC DETECTION AND TRACKING OF OBJECTS  
FOR OPTOELECTRONIC SYSTEMS**

*In order to create an innovative module for automatic correction of algorithms for automatic detection and tracking of objects with real-time training, a study of world experience in the field of general-purpose automatic tracking with the ability to recognize the tracking object for use in embedded computing devices of optoelectronic systems of promising robotic complexes was carried out. Based on the conducted research, methods and approaches have been selected and tested that allow with the greatest accuracy, while maintaining high computational efficiency, to provide on-the-fly training of classifiers (online learning) without a priori knowledge of the type of track-*

*ing object and to ensure subsequent correction during tracking and detection of the original object in case of its short-term loss. Such methods include a histogram of directional gradients – a descriptor of key features based on the analysis of the distribution of brightness gradients of an object image. Its use allows you to reduce the amount of information used without losing key data about the object and increase the speed of image processing. The article substantiates the choice of one of the classification algorithms in real time, which allows solving the problem of binary classification - the method of support vectors. Due to the high speed of data processing and the need for a small amount of initial training data to build a separating hyperplane, on the basis of which the classification of objects takes place, this method is chosen as the most suitable for solving the task. To implement online training, a modification of the support vector machine was chosen, implementing stochastic gradient descent at each step of the algorithm – Pegasos. Another auxiliary method is the clustering method of key points – this ensures an accelerated selection of objects for classification and training. The authors of the study carried out the development and semi-natural modeling of the proposed module, evaluated the effectiveness of its work in the tasks of correcting and detecting the object of interest in real time with preliminary online training in the process of tracking the object. The developed algorithm has shown high efficiency in solving the problem. In conclusion, proposals are presented to further improve the accuracy and probability of detecting an object of interest by the developed algorithm, as well as to improve its performance by optimizing calculations.*

*Automatic detection; on-the-fly training; support vector machine; histogram of directional gradients; clustering; automatic tracking.*

**Введение.** В современных робототехнических системах на данный момент остро стоит вопрос обнаружения и сопровождения недетерминированных объектов. В данной области уже существует большое количество готовых решений, начиная простой корреляцией, заканчивая последними разработками в области нейронных сетей, и с течением времени предлагаются более совершенные и точные методы. Однако, разработка новых алгоритмов идет в сторону повышения точности путем увеличения затрачиваемых ресурсов [1–3], что подразумевает под собой увеличение вычислительных мощностей для поддержания режима работы реального времени, что может быть несовместимо с множеством встраиваемых оптоэлектронных систем в виду ограничений, которые те имеют. При этом существует множество алгоритмов, уже работающих в таких системах. Такие алгоритмы проигрывают новым в точности, однако многократно опережают в плане скорости, при этом они могут не иметь возможности обнаружения цели после ее потери или же вообще понимания о потере цели слежения [4, 5]. Таким образом, разработка отдельного модуля, который бы обеспечивал улучшение точности сопровождения цели и обеспечивал повторное обнаружение цели является приоритетной задачей. В таком случае появится возможность адаптировать уже созданные алгоритмы под современные стандарты сопровождения и обнаружения, не теряя в скорости работы, что является актуальным направлением развития в данной области.

В данной статье предлагается новый модуль по улучшению существующих алгоритмов на основе машинного обучения и кластеризации, который предоставляет следующий функционал: улучшение точности сопровождения путем корректировки положения описывающего прямоугольника, добавление масштабной и поворотной инвариантности, добавление повторного определения положения цели после ее кратковременной потери. Статья состоит из следующих разделов: предварительный разбор используемых внутри модуля методов, описание алгоритма работы, результаты работы.

**Гистограмма направленных градиентов (HOG).** Перед тем, как приступить к исполнению любой задачи, которая связана с обработкой изображений, часто важно предварительно провести обработку изображения, чтобы сделать его более подходящим для использования в качестве входных данных в других алгоритмах. Использование значений яркостей хоть и применяется, однако зачастую крайне неэффективно и

затратно, поэтому большая часть алгоритмов обработки изображений, как правило, извлекают из поступающих на вход данных самую значимую для дальнейшего использования информацию – некоторые ключевые признаки изображения или его дескриптор. Они позволяют описать объект интереса наименьшим количеством данных, сохраняя всю важную информацию, при этом сокращая размерность входных данных и, тем самым, упрощая их последующую обработку.

В дескрипторе ключевых признаков HOG [6] такими признаками являются распределения (гистограммы) направлений и магнитуд градиентов (ориентированные градиенты). Градиенты изображения полезны, так как их значение велико на краях и углах какой-либо фигуры (областях резкого изменения интенсивности), а именно эти области несут в себе ключевую информацию о форме объекта, в отличие от плоских (монотонных) областей.

Опишем алгоритм преобразования изображения в HOG-дескриптор:

1. Масштабирование выбранной части кадра к единому, заранее определенному размеру.
2. Вычисление градиента изображения по осям x и y (рис. 1).
3. Составление гистограммы градиентов в ячейках 8x8 (рис. 1).
4. Нормализация гистограмм в блоках по 4 гистограммы (ячейки).
5. Финальное вычисление вектора ключевых признаков.

Таким образом на выходе, после преобразования из исходных значений яркости получается вектор численных значений, описывающий изображение.

HOG-дескриптор является хорошим методом описания изображения ввиду своей высокой дискриминативности, скорости работы, малого количества хранимой информации, нашедшим признание среди исследователей в различных областях применения [7–9], а также имеет широкие возможности для оптимизации и ускорения своей работы за счет применения векторных команд [10] и других методов [11]. К недостаткам данного метода можно отнести отсутствие инвариантности к повороту в финальном виде (на стадии составления гистограмм возможен ограниченный поворот на фиксированный угол) и необходимость этапа предварительной обработки изображения, который оказывает сильное влияние на качество работы алгоритма, если исходные изображения имеют сильные различия в масштабе. В нашей реализации этап предварительной обработки сводится к масштабированию изображения к фиксированной величине, определяемой в зависимости от исходного размера выделенной части изображения, и происходит вычислительно быстро.

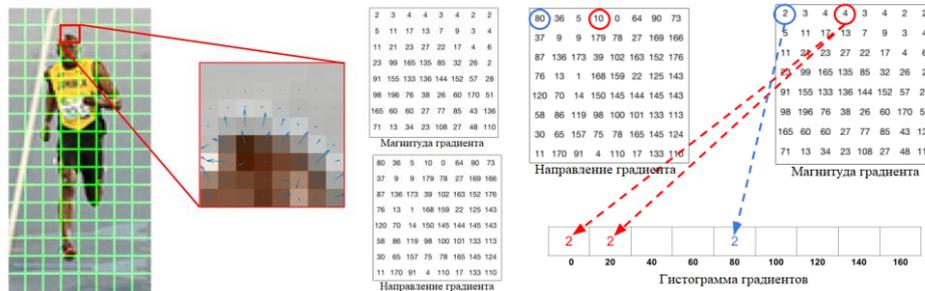


Рис. 1. Формирование гистограммы ориентированных градиентов

**Классификаторы режима реального времени.** Режим реального времени означает такой режим обработки данных, при котором скорость взаимодействия системы со внешними процессами соизмерима со скоростью протекания этих про-

цессов. Для решения задачи классификации (построение алгоритма способного по известным соотношениям объект – его принадлежность распределить ранее неизвестные объекты по известным группам принадлежностей) в таких условиях, используют алгоритмы машинного обучения, подразделом которых являются и нейронные сети. Применение искусственных нейронных сетей является более точным и прогрессивным подходом, однако он страдает от двух главных недостатков: необходимость обработки заранее предоставленных (априорных) данных и достаточно низкая скорость работы ввиду высокой вычислительной сложности обучения. И если первый недостаток еще можно обойти, то второй на данный момент не позволяет использовать нейронные сети для обучения и обнаружения в реальном времени во встраиваемых системах. Поэтому для поставленной задачи выбран подход машинного обучения без использования нейронных сетей.

Для решения задачи бинарной классификации (распределения объектов на два множества: объект – не объект) [12] был выбран один из наиболее успешных классических методов машинного обучения – метод опорных векторов (англ. SVM – Support Vector Machine) [13–15].

**SVM.** Основная идея метода состоит в разделении векторов признаков обучающей выборки некоторой гиперплоскостью оптимальным образом. Мерой оптимальности в данном случае выступает расстояние между разделяющей гиперплоскостью и объектами разделяемых классов: чем оно больше, тем меньше будет средняя ошибка классификатора.

Главным достоинством такого метода, по сравнению с другими известными решениями, является необходимость достаточно малого объема исходных данных для получения высокой точности предсказания результата, а также высокая скорость работы – это один из быстрых методов нахождения решающей функции, что имеет ключевое значение для задач обработки в режиме реального времени. Еще одним достоинством является возможность регулировки параметра, позволяющего избежать переобучения – ситуации, при которой классификатор чересчур точно определяет модель объекта и становится восприимчивым даже к самым небольшим ее изменениям. К недостаткам данного метода можно отнести чувствительность к выбросам в исходных данных (шумам) и необходимости стандартизации входных данных. Решение первого недостатка возлагается на алгоритм слежения за объектом. Проблема стандартизации решается при помощи применения HOG-дескриптора, описанного выше.

Методы машинного обучения, в которых данные поступают последовательно и используются для улучшения предсказываемого результата на каждом шаге, называются online-методами обучения (online learning) [16]. Основным их отличием от обычных является возможность обработки исходных данных (обучения), поступающих последовательно и поэтапно, то есть без необходимости наличия базы исходных данных об объекте обучения. Один из таких методов, реализующий метод опорных векторов в режиме online – Pegasos (Primal Estimated sub-Gradient Solver for SVM) [17]. Основная идея метода заключается в выполнении стохастического градиентного спуска на каждом шаге. Выбор именно этого метода обусловлен скоростью работы и достаточно ограниченным количеством тренировочных примеров, необходимых для обучения классификатора.

**Кластеризация.** Это задача разбиения множества объектов на группы, называемые кластерами. Внутри каждой группы должны оказаться «схожие/близкие» объекты. Главное отличие кластеризации от классификации состоит в том, что перечень групп четко не задан и определяется в процессе работы алгоритма.

Применение кластерного анализа в общем виде сводится к следующим этапам:

1. Отбор выборки объектов для кластеризации;

2. Определение множества переменных, по которым будут оцениваться объекты в выборке;
3. Вычисление значений меры сходства между объектами;
4. Применение метода кластерного анализа для создания групп схожих объектов (кластеров);
5. Представление результатов анализа.

В нашем случае объектами кластеризации являются части изображения; переменные, которые принимают участие в составлении кластеров – ключевые точки изображения, а одним из самых важных вопросов является следующий: как определить критерий, по которому можно считать, что ключевые точки схожи и являются частью одного и того же кластера? В литературе используются такие меры как евклидово расстояние, квадрат евклидова расстояния, расстояние городских кварталов (манхэттенское расстояние), расстояние Чебышева, степенное расстояние и другие. Однако не все они в должной мере подходят для решения нашей задачи ввиду неподходящего критерия или вычислительной сложности. Таким образом было принято решение в качестве критерия использовать расстояние от точек до границ уже существующих кластеров.

**Применяемый подход.** Реализация разработанного алгоритма используется в совокупности с каким-либо алгоритмом слежения за объектом. В данной статье для примера будет рассматриваться частный случай: многоагентный алгоритм автоматического обнаружения и сопровождения недетерминированных объектов [18].

**Обучение.** На вход модуля подаются видеопоток и описывающий прямоугольник, который определяет первоначальное положение объекта слежения. На стадии предварительной обработки, опираясь на соотношение сторон первоначальной рамки, выбирается фиксированный размер картинка, к которому будут приводиться изображения объекта даже при изменении их масштаба (фиксация размерности входных данных для классификатора). После на данном этапе происходит определение параметров кластеризации: детектором ключевых точек собираются все точки с кадра, а после разбиваются на кластера с использованием различных параметров. На первом шаге существует один кластер из одной ключевой точки. Далее последовательно перебираются точки изображения и либо расширяют границы уже существующего кластера, либо создают новый, если нет подходящего. Таким образом получают описывающие рамки вокруг выделяющихся объектов на изображении. В зависимости от параметров соотношения точек к кластерам можно получить различные выборки объектов – от крупных до очень малых. В итоге получаем одно разбиение изображения на кластеры, при этом рамки могут пересекаться, что обеспечивает большую вариативность. В итоге эталонными параметрами принимаются те, описывающий прямоугольник кластера которых имеет наибольшую площадь пересечения с истинным объектом. В дальнейшем, на каждом кадре видеопотока, изображение объекта, ограниченное прямоугольником, масштабируется к размеру, определенному на стадии инициализации, после чего для участка изображения с отслеживаемым объектом и небольшой сдвинутой области такого же размера вокруг него вычисляются дескрипторы HOG. Непосредственно перед вычислением дескриптора изображение поворачивается вдоль направления линии градиентов. Таким образом обеспечивается поворотная инвариантность. За точность предоставляемых входных данных на первых этапах обучения отвечает алгоритм сопровождения. Таким образом формируется эталонное описание объекта интереса в виде набора HOG-дескрипторов. Одновременно с этим происходит кластеризация ключевых точек с вычисленными ранее параметрами. Происходит отсев слишком неправдоподобных кластеров (а точнее, изображений внутри описывающего прямоугольника, построенного вокруг кластера), а

затем полученные результаты проверяются при помощи SVM. Поскольку в процессе слежения мы знаем, где находится истинный объект, мы можем классифицировать отклики текущего этапа обучения SVM. Таким образом формируется выборка ложноположительных откликов, определяемых откликом классификатора и площадью пересечения с настоящей целью. Выбранные окна “не-объекта” подвергаются предварительной фильтрации при помощи нормализованной кросс-корреляции (Normalized Cross Correlation) с истинным изображением – если разница меньше определенного порога (изображения не похожи), то они подаются для обучения методу опорных векторов с меткой “не-объект”. Таким образом обеспечивается ускоренная сходимость классификатора и его сбалансированность на различных данных. После определенного количества кадров, когда данный метод сбора негативной выборки становится малоэффективным в виду обученности классификатора, начинает работать другой метод - выбираются и подготавливаются несколько произвольных окон на изображении, которые будут использоваться в качестве примеров “не-объекта” для обучения классификатора, с ними происходят все те же операции, что и с аналогичными изображениями, полученными кластеризацией, и они подаются для обучения классификатору. Данная предварительная отбраковка негативных примеров по результатам анализа позволяет повысить скорость сходимости обучения классификатора и, в дальнейшем, повысить стабильность его предсказаний. В соответствии с полученными данными происходит корректировка гиперплоскости. После описанных выше действий происходит переход к следующему кадру видеопотока, и вся процедура повторяется вновь.

**Корректировка.** Уточнение положения объекта в кадре происходит на основе последовательности откликов обученного классификатора. На протяжении всего времени слежения предлагаемый модуль осуществляет проверку корректности и точности описания истинного положения объекта в кадре. Для этого используются обученный классификатор и метод кластеризации ключевых точек. На каждом кадре после кластеризации находится такая описывающая рамка, которая лучшим образом описывает объект (исходя из положения рамки алгоритма слежения и текущих параметров кластеризации). После этого проводится проверка параметра пересечения рамки слежения и вышеописанного прямоугольника, а результат сохраняется. Если на протяжении нескольких последовательных кадров данный показатель ухудшается, то за рамку сопровождения принимается отклик описывающего прямоугольника кластеризации. При отсутствии рамки положительного отклика от алгоритма кластеризации и классификатора в предполагаемом месте истинного положения объекта на протяжении некоторого времени происходит пересчет параметров кластеризации, описанный в начале предыдущего подраздела, до тех пор, пока не будет найдена новая комбинация параметров. Данный подход обеспечивает масштабную инвариантность. Недостатком такого метода является его неспособность совершать корректировку на первых кадрах слежения, пока классификатор недостаточно обучен.

**Обнаружение.** На данный момент самым точным способом локализации объекта является метод скользящего окна, в котором применяется вычисление откликов обученного классификатора для большого количества накладываемых на изображение окон. Однако насколько этот способ точен, настолько он вычислительно неэффективен, что недопустимо для поставленной задачи. Поэтому предлагается новое решение на основе кластеризации и классификатора. Обнаружение объекта после потери во многом схоже с методом корректировки, описанным выше: на каждом кадре собирается множество точек и разбивается на кластеры в соответствии с параметрами, которые были на момент потери объекта. Изображения внутри описывающих рамок полученных кластеров в виде HOG-дескрипторов передаются для проверки классификатору. Данная последовательность действий по-

вторяется на нескольких соседних кадрах, после чего принимается решение о наличии объекта на основе множественных положительных откликов от SVM в одной области. При отсутствии положительных откликов на протяжении нескольких кадров или же положительных откликов, которые не воспроизводятся в схожих местах последовательно, происходит пересчет параметров кластеризации, и вышеописанные действия повторяются для новых значений.

**Результаты.** Тестирование выполнялось при помощи полунатурного моделирования с использованием программного комплекса автоматизации тестирования алгоритмов обнаружения и сопровождения, разработанного АО «НПП «АМЭ» [19], и реальных видеозаписей, полученных в различных условиях наблюдения. Для тестирования были размечены видеопоследовательности, содержащие объекты интереса типа «Кунг», «Здание», «Мост» и др. размером от ~64x64 до ~256x256 пикселей.

Для наиболее полной оценки точности предлагаемого модуля, использовалась метрика IoU (Intersection over Union) [20]. Данная метрика подразумевает оценку отношения площадей пересечения описывающих прямоугольников к площади их объединения. Один из прямоугольников ( $S_1$ ), определяющий истинное положение объекта в кадре, задается оператором при тестировании, второй ( $S_2$ ) является результатом работы того или иного алгоритма сопровождения:

$$IoU = \frac{S_1 \cap S_2}{S_1 \cup S_2} \in [0; 1].$$

Чем ближе получаемое значение IoU к единице, тем более точное предсказание истинного положения объекта и его размеров даёт оцениваемый алгоритм. Также оценивается среднее расстояние от центра истинного прямоугольника до центра предсказанного прямоугольника (чем меньше, тем лучше)

Тестирование проводилось по следующей методике:

1. На интересующей видеозаписи в определенный момент выполнялся захват объекта на сопровождение.
2. На протяжении 100–200 кадров выполнялось обучение SVM классификатора предложенного модуля.
3. После прохождения порога обучения начиналась корректировка слежения.
4. Имитировался срыв сопровождения посредством перехода на другой кадр видеопоследовательности.
5. Зоны предполагаемого местонахождения объекта подвергались обработке по методике, описанной выше. Таким образом, выполнялось подтверждение наличия объекта.
6. Результирующие средние значения  $IoU_{track}$  для алгоритма сопровождения (без уточнения положения) и для алгоритма обнаружения  $IoU_{svm}$  со всей последовательности видео записывались в таблицу.
7. Результирующие средние значения расстояния центров так же заносились в таблицу.

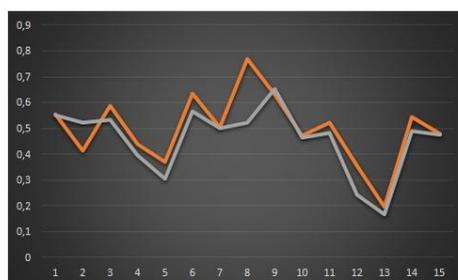


Рис. 2. Графики области пересечения  $IoU_{track}$  (серый) и  $IoU_{svm}$  (оранжевый)

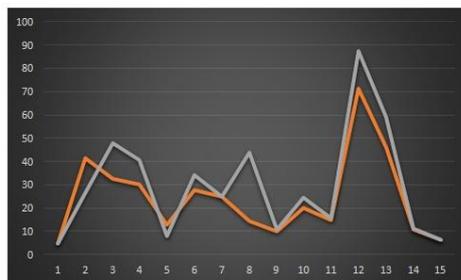


Рис. 3. Графики разницы расстояний центров обычных (серый) и с предложенным модулем (оранжевый)

Результаты систематизации экспериментов, проведенных по данной методике, представлены на рис. 2 и 3. Среднее значение  $IoU_{\text{track}}$  (то есть без использования предложенного модуля) по результатам 15 экспериментов составило  $IoU_{\text{track}} = 0.458$ , тогда как среднее значение  $IoU_{\text{svm}}$  с применением предложенного модуля  $IoU_{\text{svm}} = 0.497$ , что даёт прирост  $\Delta IoU = +0.039$ . Данное значение  $\Delta IoU$  является средним по всем типам объектов интереса, при этом для малоразмерных целей оно меньше, а для крупноразмерных объектов значение  $\Delta IoU$  значительно больше. Разница между центрами описывающих прямоугольников составляет 29.8 для оригинального алгоритма и 24.6 для улучшенного, что даёт нам среднее улучшение в 5.2 условных единицы. Данные приросты точности охвата цели являются весьма существенным с учётом проведённого объема тестирования и могут служить объективным доказательством эффективности предложенного подхода.

**Заключение.** По результатам полунатурного моделирования с использованием программного комплекса автоматизации тестирования алгоритмов обнаружения и сопровождения использование предложенного алгоритма дало прирост точности охвата цели во время сопровождения  $\Delta IoU = +0.039$  и приближение центра охвата к истинному на 5.2 условных единицы, что может служить объективным доказательством эффективности предложенного подхода.

Таким образом, резюмируя результаты проведенных исследований можно сделать вывод, что разработанный модуль позволяет осуществлять корректировку положения объекта во время сопровождения и подтверждение наличия объекта в заданной области, а также уточнять его координаты с точностью, достаточной для обоснованного использования во встраиваемых вычислительных системах перспективных робототехнических комплексов.

На дальнейших этапах развития планируется также при обучении классификатора использовать дополнительно дескрипторы текстуры, например, локальные бинарные паттерны (local binary patterns, LBP) [21, 22], что должно положительно сказаться на точности классификации [23]. Также перспективным является вынесение работы модуля в отдельные потоки для большей вычислительной эффективности.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bertinetto L., Valmadre J., Henriques J.F., Vedaldi A., Torr P.H.S. Fully-Convolutional Siamese Networks for Object Tracking / In: Hua G., Jégou H. (eds) // Computer Vision – ECCV 2016 Workshops: Lecture Notes in Computer Science. – Springer, Cham, 2016. – Vol. 9914.
2. Zhang Y., Wang L., Qi J., Wang D., Feng M., Lu H. Structured Siamese Network for Real-Time Visual Tracking / In: Ferrari V., Hebert M., Sminchisescu C., Weiss Y. (eds) // Computer Vision – ECCV 2018: Lecture Notes in Computer Science. – Springer, Cham, 2018. – Vol. 11213.

3. *Li D., Yu Y. & Chen X.* Object tracking framework with Siamese network and re-detection mechanism // *J Wireless Com Network.* – 2019. – 261.
4. *Kalal Z., Mikolajczyk K., Matas J.* Tracking-Learning-Detection // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.* – 2012. – Vol. 34, No. 7. – P. 1409-1422.
5. *Bertinetto L., Valmadre J., Golodetz S., Miksik O. and Torr P.H.S.* Staple: Complementary Learners for Real-Time Tracking // 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2016. – P. 1401-1409. – DOI: 10.1109/CVPR.2016.156.
6. *Dalal N., Triggs B.* Histograms of oriented gradients for human detection // 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05), San Diego, CA, USA, 2005. – Vol. 1. – P. 886-893. – DOI: 10.1109/CVPR.2005.177.
7. *Rybicki P.E., Huber D., Morris D.D., Hoffman R.* Visual classification of coarse vehicle orientation using Histogram of Oriented Gradients features // 2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, La Jolla, CA, USA, 2010. – P. 921-928. – DOI: 10.1109/IVS.2010.5547996.
8. *Dollár P., Appel R., Belongie S. and Perona P.* Fast Feature Pyramids for Object Detection // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.* – Aug. 2014. – Vol. 36, No. 8. – P. 1532-1545.
9. *Самсонов Н.А., Гнеушев А.Н.* Дескриптор в аккумуляторном пространстве Хафа градиентного поля изображения для детектирования пешеходов // *Машинное обучение и анализ данных.* – 2017. – № 3, Т. 3. – С. 203-215. – eISSN: 2223-3792.
10. *Misra I., Shrivastava A., Hebert M.* HOG and Spatial Convolution on SIMD Architecture // Technical report. Robotics Institute, Carnegie Mellon University, 2013.
11. *Huang C., Huang J.* A Fast HOG Descriptor Using Lookup Table and Integral Image // *ArXiv, abs/1703.06256*, 2017.
12. *Roshan K., Saurabh S.* Machine Learning: A Review on Binary Classification // *International Journal of Computer Applications.* – 2017.
13. *Cortes C., Vapnik V.* Support Vector Networks // *Mach. Learn.* – 1995. – Vol. 20. – P. 273-297
14. *Burges J.C.* A tutorial on support vector machines for pattern recognition // *Data Min. Knowl. Disc.* – 1998. – P. 121-167.
15. *Cristianini N., Shawe-Taylor J.* An Introduction to Support Vector Machines and other kernel-based learning methods. – Cambridge University Press, Cambridge, 2000.
16. *Zhou X., Zhang X., Wang B.* Online Support Vector Machine: A Survey / In: Kim J., Geem Z. (eds) // *Harmony Search Algorithm. Advances in Intelligent Systems and Computing.* – Vol. 382. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2016.
17. *Shalev-Shwartz S., Singer Y., Srebro N. et al.* Pegasos: primal estimated sub-gradient solver for SVM // *Math. Program.* – 2020. – Vol. 127. – P. 3-30.
18. *Бондаренко В.А., Ельцова Д.К., Лизин А.И., Павлова В.А., Созинова М.В., Тутиков В.А.* Многоагентный алгоритм автоматического обнаружения и сопровождения недетерминированных объектов // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2020. – № 1 (211). – С. 218-232.
19. *Бондаренко В.А., Гагарина А.Ю., Павлова В.А., Тутиков В.А.* Программный комплекс автоматизации тестирования алгоритмов обнаружения и сопровождения объектов на видеопоследовательностях // *Перспективные системы и задачи управления: Матер. XVI Всероссийской научно-практической конференции и XII молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах».* – Таганрог: ИП Марук М.Р., 2021. – 355 с.
20. *Rezatofighi H., Tsoi N., Gwak J., Sadeghian A., Reid I. Savarese S.* Generalized Intersection Over Union: A Metric and a Loss for Bounding Box Regression // 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Long Beach, CA, USA, 2019. – P. 658-666.
21. *Heikkilä M., Pietikäinen M.* A texture-based method for modeling the background and detecting moving objects // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.* – 2006. – Vol. 28 (4). – P. 657-662.
22. *Kertész C.* Texture-Based Foreground Detection, *International Journal of Signal Processing // Image Processing and Pattern Recognition (IJSIP).* – 2011. – Vol. 4, No. 4.
23. *Khalifa T. Şengül G.* The Integrated Usage of LBP and HOG Transformations and Machine Learning Algorithms for Age Range Prediction from Facial Images // *Tehnicky Vjesnik.* – Vol. 25. – P. 1356-1362. – 10.17559/TV-20170308030459, 2018.

## REFERENCES

1. Bertinetto L., Valmadre J., Henriques J.F., Vedaldi A., Torr P.H.S. Fully-Convolutional Siamese Networks for Object Tracking, In: Hua G., Jégou H. (eds), *Computer Vision – ECCV 2016 Workshops: Lecture Notes in Computer Science*. Springer, Cham, 2016, Vol. 9914.
2. Zhang Y., Wang L., Qi J., Wang D., Feng M., Lu H. Structured Siamese Network for Real-Time Visual Tracking, In: Ferrari V., Hebert M., Sminchisescu C., Weiss Y. (eds), *Computer Vision – ECCV 2018: Lecture Notes in Computer Science*. Springer, Cham, 2018, Vol. 11213.
3. Li D., Yu Y. & Chen X. Object tracking framework with Siamese network and re-detection mechanism, *J Wireless Com Network*, 2019, 261.
4. Kalal Z., Mikolajczyk K., Matas J. Tracking-Learning-Detection, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, Vol. 34, No. 7, pp. 1409-1422.
5. Bertinetto L., Valmadre J., Golodetz S., Miksik O. and Torr P.H.S. Staple: Complementary Learners for Real-Time Tracking, *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016, P. 1401-1409. DOI: 10.1109/CVPR.2016.156.
6. Dalal N., Triggs B. Histograms of oriented gradients for human detection, *2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05), San Diego, CA, USA, 2005*, Vol. 1, pp. 886-893. DOI: 10.1109/CVPR.2005.177.
7. Rybski P.E., Huber D., Morris D.D., Hoffman R. Visual classification of coarse vehicle orientation using Histogram of Oriented Gradients features, *2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, La Jolla, CA, USA, 2010*, pp. 921-928. DOI: 10.1109/IVS.2010.5547996.
8. Dollár P., Appel R., Belongie S. and Perona P. Fast Feature Pyramids for Object Detection, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Aug. 2014, Vol. 36, No. 8, pp. 1532-1545.
9. Samsonov N.A., Gneushev A.N. Deskriptor v akkumulyatornom prostranstve Hafa gradientnogo polya izobrazheniya dlya detektirovaniya peshekhodov [Descriptor in the accumulator space of the Hough gradient field of the image for detecting pedestrians], *Mashinnoe obucheniye i analiz dannykh* [Machine learning and data analysis], 2017, No. 3, Vol. 3, pp. 203-215. eISSN: 2223-3792.
10. Misra I., Shrivastava A., Hebert M. HOG and Spatial Convolution on SIMD Architecture, *Technical report*. Robotics Institute, Carnegie Mellon University, 2013.
11. Huang C., Huang J. A Fast HOG Descriptor Using Lookup Table and Integral Image, *ArXiv, abs/1703.06256*, 2017.
12. Roshan K., Saurabh S. Machine Learning: A Review on Binary Classification, *International Journal of Computer Applications*, 2017.
13. Cortes C., Vapnik V. Support Vector Networks, *Mach. Learn.*, 1995, Vol. 20, pp. 273-297
14. Burges J.C. A tutorial on support vector machines for pattern recognition, *Data Min. Knowl. Disc.*, 1998, pp. 121-167.
15. Cristianini N., Shawe-Taylor J. An Introduction to Support Vector Machines and other kernel-based learning methods. Cambridge University Press, Cambridge, 2000.
16. Zhou X., Zhang X., Wang B. Online Support Vector Machine: A Survey, In: Kim J., Geem Z. (eds), *Harmony Search Algorithm. Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol. 382. Springer, Berlin, Heidelberg, 2016.
17. Shalev-Shwartz S., Singer Y., Srebro N. et al. Pegasos: primal estimated sub-gradient solver for SVM, *Math. Program.*, 2020, Vol. 127, pp. 3-30.
18. Bondarenko V.A., El'cova D.K., Lizin A.I., Pavlova V.A., Sozinova M.V., Tupikov V.A. Mnogoagentnyy algoritm avtomaticheskogo obnaruzheniya i soprovozhdeniya nedeterminirovannykh ob"ektov [Multi-agent algorithm for automatic detection and tracking of nondeterministic objects], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 1 (211), pp. 218-232.
19. Bondarenko V.A., Gagarina A.Yu., Pavlova V.A., Tupikov V.A. Programmnyy kompleks avtomatizatsii testirovaniya algoritmov obnaruzheniya i soprovozhdeniya ob"ektov na videoposledovatel'nostyakh [Software package for testing automation of algorithms for detecting and tracking objects on video sequences], *Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya: Mater. XVI Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii i XII molodezhnoy shkoly-seminara «Upravlenie i obrabotka informatsii v tekhnicheskikh sistemakh»* [Promising management systems and tasks: Materials of the XVI All-Russian Scientific and Practical Conference and the XII Youth School-seminar "Information Management and processing in technical systems"]. Taganrog: IP Maruk M.R., 2021, 355 p.

20. Rezatofighi H., Tsoi N., Gwak J., Sadeghian A., Reid I., Savarese S. Generalized Intersection Over Union: A Metric and a Loss for Bounding Box Regression, *2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Long Beach, CA, USA, 2019*, pp. 658-666.
21. Heikkilä M., Pietikäinen M. A texture-based method for modeling the background and detecting moving objects, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2006, Vol. 28 (4), pp. 657-662.
22. Kertész C. Texture-Based Foreground Detection, *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition (IJSIP)*, 2011, Vol. 4, No. 4.
23. Khalifa T. Şengül G. The Integrated Usage of LBP and HOG Transformations and Machine Learning Algorithms for Age Range Prediction from Facial Images, *Tehnicki Vjesnik*, Vol. 25, pp. 1356-1362. 10.17559/TV-20170308030459, 2018.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. С.Н. Крюков.

**Тупиков Владимир Алексеевич** – АО «Научно-производственное предприятие «Авиационная и морская электроника»; e-mail: tupikov@nppame.ru, г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 88123274667; д.т.н.; профессор; зам. ген. директора; директор научно-производственного комплекса робототехнических систем специального назначения (НПК РТС СН).

**Павлова Валерия Анатольевна** – e-mail: pavlova@nppame.ru; к.т.н.; зам. директора НПК РТС СН по НИОКР.

**Лизин Алексей Игоревич** – e-mail: lizin\_a@nppame.ru; начальник центра средств интеллектуальной обработки изображений (ЦСИОИ) НПК РТС СН.

**Гессен Павел Алексеевич** – e-mail: pasha.gessen@outlook.com; старший научный сотрудник центра средств интеллектуальной обработки изображений.

**Tupikov Vladimir Alekseevich** – SPE "Research and Production Enterprise "Air and Marine Electronics"; e-mail: tupikov@nppame.ru; Saint Petersburg, Russia; phone: +78123274667; dr. of eng. sc.; professor; Deputy Director General, Director of Research and production complex of special purpose robotic systems.

**Pavlova Valeria Anatolyevna** – e-mail: pavlova@nppame.ru; cand. of eng. sc.; Deputy Director of research at Research and production complex of special purpose robotic systems.

**Lizin Aleksey Igorevich** – e-mail: lizin\_a@nppame.ru; Chief of intellectual image processing center (IIPC) RPCSPRS.

**Gessen Pavel Alekseevich** – e-mail: pasha.gessen@outlook.com; senior researcher at Department of Advanced Image Processing Techniques.

УДК 004.89; 004.77; 681.58; 631.158

DOI 10.18522/2311-3103-2022-1-81-91

**З.В. Нагоев, В.М. Шуганов, А.У. Заммоев, К.Ч. Бжихатлов, З.З. Иванов**

### **РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ «УМНОЕ ПОЛЕ»\***

*Производство сельскохозяйственной продукции в настоящее время тесно связано с применением цифровых технологий, элементов точного земледелия, автоматизацией и роботизацией сельского хозяйства, так как они дают возможность осуществлять постоянный мониторинг, своевременно реагировать на производственные риски, повысить эффективность производства и использования ресурсов. Особое внимание уделяется необхо-*

---

\* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-010-00269 «Механизм управления развитием горных регионов на основе новой архитектуры локальных социально-экономических систем».

димости комплексного использования цифровых технологий и искусственного интеллекта для создания интеллектуальных интегрированных систем (ИИС) сельскохозяйственного производства. Как показывают исследования, активнее всего IT-технологии применяются в полевом земледелии при выращивании зерновых культур. Основной культурой при производстве селекционного, семеноводческого и товарного зерна в Кабардино-Балкарской Республике является кукуруза, поэтому предполагается, что ИИС «Умное поле» должна быть разработана первоначально именно для этой культуры, а затем с некоторыми доработками использована и для производства любой растениеводческой продукции – других видов зерна, овощей, фруктов, винограда и бахчевых. Она позволяет снизить на некоторых этапах производства продукции участие человека, путем автоматизации процесса и его контроля посредством различных «умных» устройств. Работа ИИС «Умное поле» основана на использовании множества сенсоров, в том числе устанавливаемых на мобильной технике (наземные и воздушные пилотируемые и беспилотные транспортные средства, космические спутники) и переносных портативных устройствах для получения оперативных данных о состоянии полей и посевах, что позволяет: – анализировать готовность сельскохозяйственных угодий к посевным работам, отслеживать ход вегетации растений с целью эффективного и оперативного планирования агротехнических мероприятий (химическая защита от вредителей и болезней, подкормка, орошение и т.д.); – прогнозировать показатели эффективности производства (общий валовой сбор, урожайность с га), а также своевременно выявлять производственные риски (появление вредителей, болезней растений, засоленности почв и т.д.); – принимать эффективные решения по управлению использованием ресурсов сельскохозяйственных предприятий. С применением «умных» устройств стало возможным внедрение т.н. «точного земледелия» для управления продуктивностью посевов с учётом изменений в среде обитания растений. В конечном итоге, это дает возможность решить две главные задачи сельхозпроизводителей – повышение урожайности и сокращение издержек. Авторами разработана концепция ИИС «Умного поля» для производства зерна кукурузы при использовании перспективных робототехнических систем и комплексов. Представлена архитектура ИИС «Умного поля» для производства семенной и товарной кукурузы, которую можно с незначительными доработками адаптировать и для производства другой растениеводческой продукции.

Сельскохозяйственное производство; цифровизация аграрного производства; точное земледелие; роботизация; автоматизация аграрного производства; интеллектуальная интегрированная система.

**Z.V. Nagoev, V.M. Shuganov, A.U. Zammoev, K.Ch. Bzhikhatlov, Z.Z. Ivanov**

#### **DEVELOPMENT OF INTELLIGENT INTEGRATED SYSTEM FOR "SMART" AGRICULTURAL PRODUCTION**

*The production of agricultural goods is currently associated with the use of digital technologies, elements of precision farming, automation and robotization of agriculture. These technologies make it possible to carry out continuous monitoring, carry out timely processing, improve the efficiency of production and use of resources. The need for the integrated use of digital technologies and artificial intelligence and the creation of intelligent integrated systems for agricultural production is noted. Studies show that IT-technologies are actively used in field farming when growing grain crops. The main crop in the production of breeding, seed and commercial grain in the Kabardino-Balkarian Republic is corn, so it is assumed that the intelligent system of the "smart field" should be developed initially for this particular crop, and then, with some modifications, used for the production of any crop products – other types of grain, vegetables, fruits, grapes and gourds. It allows you to reduce human participation at some stages of production by automating the process and controlling it through various "smart" devices. The operation of the "smart field" system is based on the use of a variety of sensors, including those installed on mobile equipment (ground and air manned and unmanned vehicles, space satellites) and portable portable devices to obtain operational data on the state of fields and crops. This allows: – analyze the readiness of agricultural land for sowing, monitor the progress of plant vegetation in order to effectively and efficiently plan agrotechnical measures (chemical protection against pests and diseases, fertilizing, irrigation, etc.); – predict production efficiency indicators (total gross harvest, yield per hec-*

*tare), as well as timely identify production risks (appearance of pests, plant diseases, soil salinity, etc.) – make effective decisions on managing the use of resources of agricultural enterprises. With the use of "smart" devices, it became possible to introduce the so-called. "precision farming" to manage crop productivity, taking into account changes in the plant habitat. Ultimately, this makes it possible to solve two main tasks of agricultural producers - increasing yields and reducing costs. The authors have developed the concept of an intelligent integrated system "Smart Field" for the production of corn grain using advanced robotic systems and complexes. The architecture of the "Smart Field" system for the production of seed and commercial corn is presented, which can be adapted with minor modifications for the production of other crop products.*

*Agricultural production; digital agricultural production; precision farming; robotization; automation of agricultural production; intelligent integrated system.*

**Введение.** Мировое сельскохозяйственное производство в 20 веке работало по классическим принципам – минимизация себестоимости продукции и повышение производительности на единицу затраченных ресурсов, которые достигались использованием для данного времени все более производительных и экономичных сельхозмашин, продуктивных сортов и гибридов растений, эффективных удобрений и средств защиты растений, оптимальных агротехнологических приемов. В 21 веке эти инструменты по-прежнему актуальны, но их потенциал практически исчерпан по многим видам агропроизводства. Также, во всем мире, наблюдается отток трудовых ресурсов из сельского хозяйства, особенно из трудоемких отраслей (овощеводство, производство ягод и фруктов). Например, в Кабардино-Балкарской Республике производство овощей открытого грунта за последние 10 лет сократилось в два раза, из-за нехватки рабочих рук во время уборки урожая и не желания людей заниматься тяжелым неквалифицированным трудом в полевых условиях. В результате усугубления вышеперечисленных проблем, технология аграрного производства изменяется в двух направлениях:

1) селекция сортов и гибридов культур с высокой урожайностью и одновременным созреванием зерен, плодов, ягод, овощей (для обеспечения механизированной уборки) [1, 2];

2) развитие технологического процесса и основных фондов агропроизводства в рамках концепции «умного и безлюдного производства» [3–7].

Умное поле – это интеллектуальная интегрированная система управления продуктивностью сельскохозяйственных угодий, основанная на использовании комплекса спутниковых и компьютерных технологий, автоматизированных сельскохозяйственных машин и роботов. Используемые в земледелии участки имеют неоднородности по рельефу, плодородию, влажности, содержанию гумуса и доступных питательных веществ, толщине и структуре плодородного слоя, степени эрозии и т.д. Для оценки и выравнивания неоднородностей параметров полей используют инновационные технологии, такие как системы глобального позиционирования, датчики, аэрофотосъемки и снимки со спутников, а также управленческие программы для агробизнеса [8, 9].

Вместо того, чтобы в процессе агропроизводства использовать ресурсы «на глаз», как это делалось до сегодняшнего времени, сельхозтоваропроизводители получают возможность точно рассчитать количество семян, удобрений и других ресурсов для каждого микроучастка поля с точностью до метра. Таким образом, удастся избежать перерасхода ресурсов там, где они прежде использовались в избытке, и повысить урожайность тех участков поля, где ранее недополучали продукцию.

Население планеты постоянно растет. Если в 2008 г. оно составляло 6,5 млрд чел., в 2011 – 7 млрд, то, согласно прогнозу, к 2050 г. оно достигнет 9 млрд, к 2100 г. – 10 млрд чел. На основании прогнозов сельскохозяйственное производство к 2050 г. должно увеличиться на 60–70 %. Следовательно, без инновационного развития технологии выращивания сельскохозяйственных культур невозможно обеспечить растущее население планеты продуктами питания.

**Теоретическая значимость исследования** состоит в разработке концепции и алгоритма интеллектуальной среды для «умного сельскохозяйственного производства», которая, позволит комплексно применять различные цифровые технологии, автоматизацию и роботизацию отрасли.

**Практическая значимость исследования** состоит в возможности перехода к «малолюдным и безлюдным технологиям сельскохозяйственного производства» на основе создания интеллектуальной интегрированной системы производства и потребления продуктов питания.

**Цель и задачи исследования** – разработка системы управления продуктивностью посевов, основанная на создании интеллектуальной среды и использовании комплекса инновационных технологий, в т.ч. искусственного интеллекта. Для достижения указанной цели поставлены следующие задачи:

1. Обновление технологического процесса для интенсификации земледелия.
2. Создание инновационной технологической базы (инфраструктурная сеть) – множество отдельных элементов технологий, необходимость внедрения которых определяется на усмотрение фермера. То есть можно использовать как все элементы технологии сразу, так и лишь некоторые, эффект от которых будет наиболее значительным для данного предприятия.
3. Разработать концепцию интеллектуальной интегрированной системы (ИИС) «Умного поля» при использовании перспективных робототехнических систем и комплексов для производства семенной и товарной кукурузы;
4. Осуществлять запись, анализ и хранение данных, полученных в результате мониторинга посевов в безопасных условиях, исключающих их потерю.

**Объект исследования** – растениеводство.

**Предмет исследований** – производство семенной и товарной кукурузы.

**Концепция интеллектуальной интегрированной системы «Умного поля» КБНЦ РАН.** Учитывая проблемы в сельском хозяйстве России по показателям производительности труда и объемам производства с единицы площади или на 1 голову, для сокращения отставания от стран с традиционно развитым сельским хозяйством необходимо переходить от использования традиционных или отдельных цифровых технологий к разработке и внедрению отечественных интегрированных интеллектуальных систем – «умное поле», «умная ферма», «умный пруд» и других «умных аграрных производств» [10].

Недостаток информации для принятия оперативных решений приводит к тому, что в процессе посадки, выращивания, ухода за культурами теряется до 40 % урожая [11–13]. Во время сбора урожая, хранения и транспортировки теряется еще 40 %. При этом, кроме погоды, 2/3 факторов приводящих к потере урожая сегодня можно контролировать с помощью автоматизированных систем управления [14, 15].

В настоящее время возможность широкого применения в сельском хозяйстве современных цифровых технологий, способствует повышению привлекательности отрасли для инвестиций и осуществления дальнейших разработок в области интеллектуального сельского хозяйства с целью полной автоматизации и роботизации отрасли. Кабардино-Балкарский научный центр РАН имеет многолетний задел в данном направлении: разработка агромультибота, подвесной транспортной платформы мостового земледелия, робота по сбору овощей, робота – почвоотборника, робота по удалению метелок кукурузы при получении гибридных семян, использование агродрона для химической защиты растений.

Создание ИИС «Умного поля» осуществляется для автоматизации сельскохозяйственного производства путем взаимодействия и обмена информацией между различными устройствами, машинами и системами. Она позволяет на некоторых этапах производства продукции снизить участие человека, путем непрерывного мониторинга посевов и автоматизации технологических процессов.

Работа ИИС «Умное поле» основана на использовании множества сенсоров, в том числе устанавливаемых на мобильной технике (наземные и воздушные пилотируемые и беспилотные транспортные средства, космические спутники) и переносных портативных устройствах для получения оперативных данных о состоянии полей и посевов, что позволяет:

- ◆ анализировать готовность сельскохозяйственных угодий к посевным работам, отслеживать ход вегетации растений с целью эффективного и оперативного планирования агротехнических мероприятий (химическая защита от вредителей, сорняков и болезней, подкормка, орошение и т.д.);
- ◆ прогнозировать показатели эффективности производства (общий валовой сбор, урожайность с га), а также своевременно выявлять производственные риски (появление вредителей, болезней растений, засоленности почв и т.д.);
- ◆ принимать эффективные решения по управлению использованием ресурсов сельскохозяйственных предприятий [8].

**Интеллектуальная интегрированная система производства растениеводческой продукции «Умное поле» КБНЦ РАН.** На примере возделывания кукурузы на зерно и семена ведется практическая реализация элементов интеллектуальной интегрированной системы «Умное поле» (ИИС «Умное поле») для производства растениеводческой продукции. В частности, выполнена разработка проекта **экспериментального аппаратно-программного комплекса (ЭАПК)**, предназначенного для обеспечения функционирования сети датчиков и исполнительных устройств в полевых условиях, интегрированных посредством коммуникационных устройств и сетей с интеллектуальной информационно-управляющей системой (ИИУС).

С целью обеспечения масштабируемости ИИС «Умное поле» в проекте принято, что поток данных о состоянии посевов может быть получен стационарными и мобильными цифровыми датчиками, базирующимся на различных носителях (станции наблюдения, носимые устройства, мобильная сельскохозяйственная техника и летательные аппараты), а потоки видеоинформации могут быть, кроме того, получены из различных систем, в т.ч. спутниковой и аэросъемки. Для построения экспериментальной распределенной гетерогенной сети датчиков и исполнительных устройств использованы известные принципы «интернета вещей» [16] и доступные для практического применения технические решения и серийно выпускаемые изделия [17, 18]. Общая архитектура сети датчиков приведена на рис. 1.

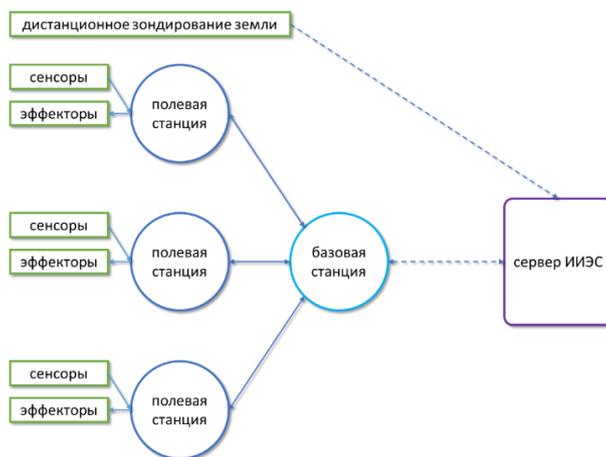


Рис. 1. Архитектура распределенной гетерогенной сети автоматизации контроля и управления производственными процессами для ИИС «Умное поле»

В качестве базового узла сети ЭАПК используется **полевая станция** – микроэлектронное устройство как абонент цифровой, главным образом беспроводной, коммуникационной сети (рис. 2). В состав полевой станции в зависимости от решаемой ею прикладной задачи включается необходимый набор датчиков, преобразователей сигналов и электроэнергии, узлы связи и источники электропитания, позволяющие работать как от бортовой электросети носителя, так и автономно. Полевая станция позволяет не только осуществлять задачи мониторинга, но и выполнять дистанционное и автономное программное управление производственными процессами, реализуя различные схемы автоматизации сельскохозяйственного производства.

В качестве базового вычислителя полевой станции используется серийно выпускаемая модульная плата на базе микросхемы системы на кристалле ESP-WROOM-32 [17], а в качестве узла связи используются совместимые с UART-интерфейсом серийно выпускаемые модульные платы различных типов: GPRS/LTE, LoRaWAN, RS-485.

В качестве источника питания могут выступать как автономные источники на основе химических аккумуляторов и солнечных батарей, так и источники постоянного тока используемых носителей полевой станции (например, 12В бортового питания трактора или USB мобильного устройства).



Рис. 2. Функционально-структурная схема полевой станции

Модельный ряд плат сопряжения питания устройств и расширения интерфейсов разрабатывается с учетом специфики конкретных прикладных задач. Для обеспечения автоматического конфигурирования вычислительного устройства на плате сопряжения размещена микросхема памяти EEPROM Dallas, в которой разработчиком сохраняется достаточная для этого информация.

Важным элементом ЭАПК, осуществляющего функции сбора, обработки, хранения и обмена данными с удаленным сервером ИИУС, а также локальной координации и управления режимами работы распределенных в поле полевых станций выступает **базовая станция** (рис. 3), представляющая собой локальный центр обработки данных с узлами связи: LoRaWAN [18] – для коммуникации с полевыми станциями, и LTE-радиомодемом – для коммуникаций через интернет с удаленным сервером ИИУС, доступ к которому предоставляется операторами мобильной связи.

В радиусе действия сети LoRaWAN (порядка 5–8 км) возможно координирование работы множества полевых станций, осуществление сбора данных мониторинга состояния посевов и управление различными устройствами автоматики. Особенностью базовой станции является возможность бесперебойного энергообеспечения функционирования ЭВМ локального сервера и узлов связи с использованием солнечных батарей и аккумуляторов.

В качестве абонента базовой станции также могут выступать оснащенные модулями связи WiFi или LoRaWAN и соответствующим программным обеспечением различные мобильные устройства пользователей и сервисного персонала, а также мобильные технические средства: сельскохозяйственные машины, оснащенные модулями сбора данных, наземные мобильные роботы и беспилотные летательные аппараты.

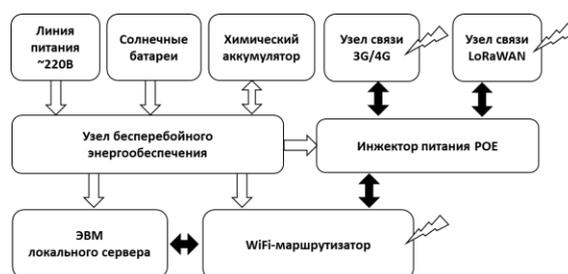


Рис. 3. Функционально-структурная схема базовой станции.

Опытные образцы полевой и базовой станций ЭАПК ИИС "Умное поле" подготовлены к тестовой эксплуатации в полевых условиях.

Собранные сенсорной системой «Умного поля» данные отправляются для дальнейшей обработки в интеллектуальную интегрированную экспертную систему, архитектура которой показана на рис. 4. Для этого данные агрегируются на «полевых станциях» и передаются на сервер за счет наиболее подходящих каналов связи. В основе разрабатываемой системы принятия решений лежит интеллектуальная экспертная система, построенная на базе мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры [19–21]. Для этого система собирает данные с сенсоров и на их основе создает модель текущего состояния посевов («цифровой двойник» поля). Затем, модуль моделирования на основе текущего положения дел и заранее сформированной базы знаний создает прогнозы развития текущей ситуации. После анализа прогнозов и выбора наиболее приемлемого развития текущего состояния (с учетом не только итоговой урожайности, но и минимизации расходов и негативных воздействий на посевы) формируются рекомендации по необходимым агротехническим мероприятиям.

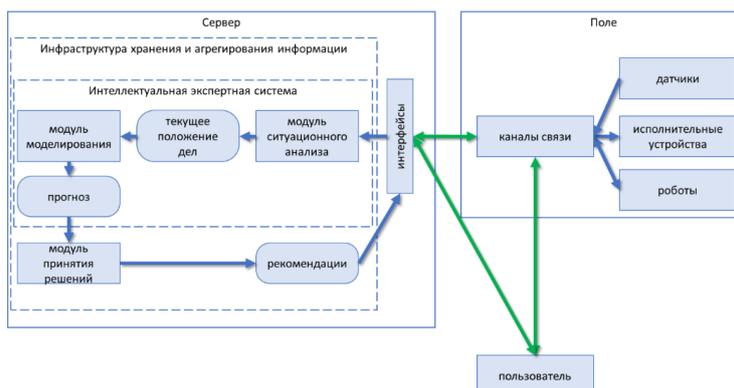


Рис. 4. Архитектура интеллектуальной интегрированной экспертной системы

Сгенерированные модулем принятия решений рекомендации могут быть переданы пользователю, или переданы исполнительным устройством на поле (автоматизированным сельскохозяйственным машинам и роботам). За обмен информа-

цией между распределенным сервисом и различными внешними устройствами (датчиками, эффекторами, роботами и пользователями) отвечает набор интерфейсов связи. Такой подход позволяет унифицировать подключение аппаратных средств к разрабатываемому сервису, а также упростить его масштабирование. Стоит отметить, что сервер интеллектуальной интегрированной экспертной системы обеспечивает не только прогнозирование состояния посевов, но и хранение собранных данных и взаимодействие с пользователем.

**Выводы.** Интеллектуальная интегрированная система «Умное поле» будет обеспечивать высокую точность параметров постоянного мониторинга посевов, комплексную автоматизацию и роботизацию всех технологических этапов агропроизводства для минимизации потерь, оптимизацию ресурсопользования, рост производительности труда, достижение потенциальной продуктивности сельскохозяйственных культур и экономическую эффективность сельскохозяйственного производства. Интеграция получаемых данных с интеллектуальными системами, производящими их обработку в режиме реального времени, способна осуществлять революционный сдвиг в принятии решений для отрасли, предоставляя результаты анализа множественных факторов и обоснование для последующих действий. На основе анализа данных и моделирования развития условий интеллектуальная интегрированная система способна создавать рекомендации по обработке и уходу за растениями или инструкции для автоматического исполнения роботизированной техникой.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Appaev S., Kagermazov A., Khachidogov A., Bizhoyev M., Khatefov E.* Development of self-pollinated maize lines based on the teosinte collection of the N.I. Vavilov institute of plant industry (VIR) // E3S Web of Conferences. – 2021. – 262. – 01010. – DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126201010>.
2. *Бойко В.Н., Хамефов Э.Б.* Исходный материал для гибридной селекции кукурузы на многопочатковость из коллекции ВИР // Тр. по прикладной ботанике, генетике и селекции. – 2021. – Т. 182 (4). – С. 27-35. – DOI: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2021-4-27-35>.
3. *Dushyant Kumar Singh, Rajeev Sobti.* Long-range real-time monitoring strategy for Precision Irrigation in urban and rural farming in society 5.0 // Computers & Industrial Engineering. – 2022. – Vol. 167. – 107997. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.107997>.
4. *Manshadi A.M., Palka M., Fuchs W., Neubauer T., Eitzinger J., Oberforster M., Soltani A.* Performance of the SSM-iCrop model for predicting growth and nitrogen dynamics in winter wheat // European Journal of Agronomy. – 2022. – Vol. 135. – 126487. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126487>.
5. *Deepika Sarpal, Raka Sinha, Madhavi Jha, Padmini.* TN AgriWealth: IoT based farming system. – 2022. – Vol. 89. – 104447. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2022.104447>.
6. *Федотова Г.В., Горлов И.Ф., Сложенкина М.И., Глуценко А.В.* Тренды научно-технического развития и повышения конкурентоспособности сельского хозяйства России // Вестник Академии знаний. – 2019. – № 3 (32). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/trendy-nauchno-tehnicheskogo-razvitiya-i-povysheniya-konkurentospobnosti-selskogo-hozyaystva-rossii>.
7. *Москалев С.М., Клименок-Кудинова Н.В.* Искусственный интеллект и интернет вещей как инновационные методы совершенствования агропромышленного сектора // Известия СПбГАУ. – 2018. – № 3 (52). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/iskusstvennyy-intellekt-i-internet-veschey-kak-innovatsionnye-metody-sovershenstvovaniya-agropromyshlennogo-sektora>.
8. *Нагоев З.В., Шуганов В.М., Бжыхатлов К.Ч., Заммоев А.У., Иванов З.З.* Перспективы повышения производительности и эффективности сельскохозяйственного производства с применением интеллектуальной интегрированной среды // Известия КБНЦ РАН. – 2021. – № 6.
9. *Ториков В.Е., Погонишев В.А., Погонишева Д.А., Дорных Г.Е.* Состояние цифровой трансформации сельского хозяйства // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2020. – № 9. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sostoyanietsifrovoy-transformatsii-selskogo-hozyaystva>.

10. ИТ в агропромышленном комплексе России. Интернет-ресурс. – URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:ИТ\\_в\\_агропромышленном\\_комплексе\\_России](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:ИТ_в_агропромышленном_комплексе_России).
11. *Zavriev S.K., Ignatov A.N.* Potential threats in agriculture and food security area // *World Economy and International Relations*. – 2020. – Vol. 64 (7). – P. 100-107. – DOI: 10.20542/0131-2227-2020-64-7-100-107.
12. *Rosa A.T., Creech C.F., Elmore, R.W. and others.* Implications of cover crop planting and termination timing on rainfed maize production in semi-arid cropping systems // *Field Crops Research*. – 2021. – 271. – 108251. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108251>.
13. *Carabajal-Capitán S., Kniss A.R., Jabbour R.* Seed Predation of Interseeded Cover Crops and Resulting Impacts on Ground Beetles // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. – 2021. – Vol. 118 (18). – 2017470118. – DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.2017470118>.
14. *Гордеев А.В. и др.* Ведомственный проект «Цифровое сельское хозяйство». – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2019. – 48 с.
15. *Анищенко Алеся Николаевна, Шутьков Анатолий Антонович.* Agriculture 4. 0 как перспективная модель научно-технологического развития аграрного сектора современной России // *Продовольственная политика и безопасность*. – 2019. – № 3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/agriculture-4-0-kak-perspektivnaya-model-nauchno-tehnologicheskogo-razvitiya-agrarnogo-sektora-sovremennoy-rossii>.
16. *Tzounis A. et al.* Internet of Things in agriculture, recent advances and future challenges // *Biosystems engineering*. – 2017. – Vol. 164. – P. 31-48.
17. ESP32-WROOM-32 Datasheet. – URL: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf).
18. LoRaWAN Specification v1.1. 2017. Интернет-ресурс. – URL: [https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/lorawantm\\_specification\\_v1.1.pdf](https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/lorawantm_specification_v1.1.pdf).
19. *Nagoev Z., Pshenokova I., Nagoeva O., Sundukov Z.* Learning algorithm for an intelligent decision making system based on multi-agent neurocognitive architectures // *Cognitive Systems Research*. – Elsevier, 2021. – Vol. 66. – P. 82-88.
20. *Nagoev Z.V., Denisenko V.A., Lyutikova L.A.* System of autonomous robot machine vision for agricultural application in mountain territories based on the multi-agent cognitive architectures // *Sustainable Development of Mountain Territories*. – 2018. – No. 10 (2). – P. 289-297.
21. *Nagoev Z.V.* Multiagent recursive cognitive architecture // *Mechanics of Solids*. – 2014. – Vol. 46 (4). – P. 622-634. – DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-34274-5\\_43](https://doi.org/10.1007/978-3-642-34274-5_43).

#### REFERENCES

1. *Appaev S., Kagermazov A., Khachidogov A., Bizhoyev M., Khatefov E.* Development of self-pollinated maize lines based on the teosinte collection of the N.I. Vavilov institute of plant industry (VIR), *E3S Web of Conferences*, 2021, 262, 01010. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126201010>.
2. *Boyko V.N., Khatefov E.B.* Iskhodnyy material dlya gibridnoy selektsii kukuruzy na mnogopochatkovost' iz kolleksii VIR [Source material from the VIR collection for hybrid breeding of multiple-ear maize], *Tr. po prikladnoy botanike, genetike i selektsii* [Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding], 2021, Vol. 182 (4), pp. 27-35. DOI: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2021-4-27-35>.
3. *Dushyant Kumar Singh, Rajeev Sobti.* Long-range real-time monitoring strategy for Precision Irrigation in urban and rural farming in society 5.0, *Computers & Industrial Engineering*, 2022, Vol. 167, 107997. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.107997>.
4. *Manschadi A.M., Palka M., Fuchs W., Neubauer T., Eitzinger J., Oberforster M., Soltani A.* Performance of the SSM-iCrop model for predicting growth and nitrogen dynamics in winter wheat, *European Journal of Agronomy*, 2022, Vol. 135, 126487. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126487>.
5. *Deepika Sarpal, Raka Sinha, Madhavi Jha, Padmini.* TN AgriWealth: IoT based farming system, 2022, Vol. 89, 104447. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2022.104447>.
6. *Fedotova G.V., Gorlov I.F., Slozhenkina M.I., Glushchenko A.V.* Trendy nauchno-tehnicheskogo razvitiya i povysheniya konkurentospobnosti sel'skogo khozyaystva Rossii [Trends in scientific and technological development and increasing the competitiveness of

- Russian agriculture], *Vestnik Akademii znaniy* [Bulletin of the Academy of Knowledge], 2019, No. 3 (32). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/trendy-nauchno-tehnicheskogo-razvitiya-i-povysheniya-konkurentospobnosti-selskogo-hozyaystva-rossii>.
7. *Moskalev S.M., Klimenok-Kudinova N.V.* Iskusstvennyy intellekt i internet veshchey kak innovatsionnye metody sovershenstvovaniya agropromyshlennogo sektora [Artificial Intelligence and the Internet of Things as Innovative Methods for Improving the Agro-Industrial Sector], *Izvestiya SPbGAU* [Izvestiya SPbGAU], 2018, No. 3 (52). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/iskusstvennyy-intellekt-i-internet-veschey-kak-innovatsionnye-metody-sovershenstvovaniya-agropromyshlennogo-sektora>.
  8. *Nagoev Z.V., Shuganov V.M., Bzhikhatlov K.Ch., Zammoev A.U., Ivanov Z.Z.* Perspektivy povysheniya proizvoditel'nosti i effektivnosti sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva s primeneniem intellektual'noy integrirrovannoy sredy [Prospects for increasing the productivity and efficiency of agricultural production using an intelligent integrated environment], *Izvestiya KBNTS RAN* [Proceedings of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2021, No. 6.
  9. *Torikov V.E., Pogonyshv V.A., Pogonyshva D.A., Dornyykh G.E.* Sostoyanie tsifrovoy transformatsii sel'skogo khozyaystva [State of digital transformation of agriculture], *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* [Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy], 2020, No. 9. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/sostoyanietsifrovoy-transformatsii-selskogo-hozyaystva>.
  10. IT v agropromyshlennom komplekse Rossii. Internet-resurs [IT in the agro-industrial complex of Russia]. Available at: [https://www.tadviser.ru/index.php/Stat'ya:IT\\_v\\_agropromyshlennom\\_komplekse\\_Rossii](https://www.tadviser.ru/index.php/Stat'ya:IT_v_agropromyshlennom_komplekse_Rossii).
  11. *Zavriev S.K., Ignatov A.N.* Potential threats in agriculture and food security area, *World Economy and International Relations*, 2020, Vol. 64 (7), pp. 100-107. DOI: 10.20542/0131-2227-2020-64-7-100-107.
  12. *Rosa A.T., Creech C.F., Elmore, R.W. and others.* Implications of cover crop planting and termination timing on rainfed maize production in semi-arid cropping systems, *Field Crops Research*, 2021, 271, 108251. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108251>.
  13. *Carabajal-Capitán S., Kniss A.R., Jabbour R.* Seed Predation of Interseeded Cover Crops and Resulting Impacts on Ground Beetles, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, Vol. 118 (18), 2017470118. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.2017470118>.
  14. *Gordeev A.V. i dr.* Vedomstvennyy proekt «Tsifrovoye sel'skoye khozyaystvo» [Departmental project "Digital Agriculture"]. Moscow: FGBNU «Rosinformagrotekh», 2019, 48 p.
  15. *Anishchenko Alesya Nikolaevna, Shut'kov Anatoliy Antonovich.* Agriculture 4. 0 kak perspektivnaya model' nauchno-tehnologicheskogo razvitiya agrarnogo sektora sovremennoy Rossii [Agriculture 4. 0 as a promising model of scientific and technological development of the agricultural sector of modern Russia], *Prodovol'stvennaya politika i bezopasnost'* [Food Policy and Security], 2019, No. 3. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/agriculture-4-0-kak-perspektivnaya-model-nauchno-tehnologicheskogo-razvitiya-agrarnogo-sektora-sovremennoy-rossii>.
  16. *Tzounis A. et al.* Internet of Things in agriculture, recent advances and future challenges, *Biosystems engineering*, 2017, Vol. 164, pp. 31-48.
  17. ESP32-WROOM-32 Datasheet. Available at: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf).
  18. LoRaWAN Specification v1.1. 2017. Интернет-ресурс. Available at: [https://loralliance.org/wp-content/uploads/2020/11/lorawantm\\_specification\\_v1.1.pdf](https://loralliance.org/wp-content/uploads/2020/11/lorawantm_specification_v1.1.pdf).
  19. *Nagoev Z., Pshenokova I., Nagoeva O., Sundukov Z.* Learning algorithm for an intelligent decision making system based on multi-agent neurocognitive architectures, *Cognitive Systems Research*. Elsevier, 2021, Vol. 66, pp. 82-88.
  20. *Nagoev Z.V., Denisenko V.A., Lyutikova L.A.* System of autonomous robot machine vision for agricultural application in mountain territories based on the multi-agent cognitive architectures, *Sustainable Development of Mountain Territories*, 2018, No. 10 (2), pp. 289-297.
  21. *Nagoev Z.V.* Multiagent recursive cognitive architecture, *Mechanics of Solids*, 2014, Vol. 46 (4), pp. 622-634. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-34274-5\\_43](https://doi.org/10.1007/978-3-642-34274-5_43).

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор Х.М. Сенов.

**Нагоев Залимхан Вячеславович** – Кабардино-Балкарский научный центр РАН; e-mail: zaliman@mail.ru; г. Нальчик, Россия; тел.: +79280816026; к.т.н.; генеральный директор.

**Шуганов Владислав Миронович** – e-mail: vmshuganov@mail.ru; тел.: +79633949690; д.с.-х.н.; зав. научно-инновационным центром «Интеллектуальные системы и среды производства и потребления продуктов питания».

**Заммоев Аслан Узейрович** – e-mail: zammoev@mail.ru; тел.: +79054350923; к.т.н.; старший научный сотрудник лаборатории «Нейрокогнитивные автономные интеллектуальные системы».

**Бжихатлов Кантемир Чамалович** – e-mail: haosit13@mail.ru; тел.: +79631663448; к.ф.-м.н.; зав. лабораторией «Нейрокогнитивные автономные интеллектуальные системы».

**Иванов Заур Зуберович** – e-mail: zaurivanov@mail.ru; тел.: 8662475303; к.э.н.; старший научный сотрудник отдела «Экономика инновационного процесса».

**Nagoev Zalimhan Vyacheslavovich** – Kabardin-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences; e-mail: zaliman@mail.ru; Nalchik, Russia; phone: +7928 0816026; cand. of eng. sc.; general manager.

**Shuganov Vladislav Mironovich** – e-mail: vmshuganov@mail.ru; phone: +79633949690; dr. of agr. sc.; head of the research and innovation center «Intellectual systems and environments for the production and consumption of food products».

**Zammoev Aslan Uzeyrovich** – e-mail: zammoev@mail.ru; phone: +79054350923; cand. of eng. sc.; senior researcher of the Laboratory «Neurocognitive Autonomous Intelligent Systems».

**Bzhikhatlov Kantemir Chamalovich** – e-mail: haosit13@mail.ru; phone: +79631663448; cand. of phys. and math. sc.; head of the laboratory «Neurocognitive autonomous intelligent systems».

**Ivanov Zaur Zuberovich** – e-mail: zaurivanov@mail.ru; phone: 8662475303; cand. of econ. sc.; senior researcher of the department of «Economics of the Innovation Process».

УДК 004.81, 004.75

DOI 10.18522/2311-3103-2022-1-91-101

**И.А. Пшенокова, К.Ч. Бжихатлов, А.А. Унагасов, М.А. Абазоков**

## **МУЛЬТИАГЕНТНЫЙ АЛГОРИТМ СБОРА ДАННЫХ С МЕТЕОСТАНЦИИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УРОЖАЙНОСТИ И СОСТОЯНИЯ ПОСЕВОВ**

*Погода оказывает сильное влияние на урожайность и состояние посевов, на требования к количеству и качеству удобрений, а также на профилактические меры по предотвращению заболеваний. Плохие погодные условия могут повлиять на качество продукции во время транспортировки и хранения, а значит и на жизнеспособность семян и посадочного материала. В настоящее время в сельском хозяйстве широко применяются различные системы интеллектуального мониторинга, к которым можно отнести спутниковый мониторинг и метеостанции. При этом основополагающую роль играет выбор метода анализа полученных данных и интеллектуальных систем их обработки для превентивного прогнозирования. Целью исследования является разработка интеллектуальной системы прогнозирования урожайности и состояния посевов на основе данных с метеостанции. В рамках данного исследования разработан мультиагентный алгоритм прогнозирования состояния посевов по данным с метеостанции на основе самоорганизации нейрокогнитивной архитектуры. Приведено описание структурной схемы метеостанции и ее датчиков. Разработан алгоритм программы для сбора и обработки данных с датчиков метеостанции. В результате обработки в интеллектуальную систему принятия решений отправляются данные о температуре воздуха и почвы, влажности воздуха и почвы, скорости и направлении ветра, количестве осадков и о сумме активных температур. Описана система построения причинно-следственных связей, на основе которой строится система прогнози-*

рования, которая позволяет в превентивном порядке делать рекомендации или прогнозы по урожайности и состоянию посевов, а также по вероятности заболеваний и распространения вредителей на контролируемых посевах.

*Интеллектуальный агент; мультиагентный алгоритм; нейрокогнитивная архитектура; метеостанция; интеллектуальная система; умное поле.*

**I.A. Pshenokova, K.Ch. Bzhikhatlov, A.A. Unagasov, M.A. Abazokov**

## **MULTI-AGENT ALGORITHM FOR COLLECTING DATA FROM WEATHER STATION FOR FORECASTING PRODUCTIVITY AND CROPS CONDITION**

*The weather affects the productivity and condition of crops, the requirements for the quantity and quality of fertilizers, as well as preventive measures to prevent diseases. Bad weather can affect the quality of products during transportation and storage, and hence the germination of seeds and planting material. Various intelligent monitoring systems are now widely used in agriculture, which include satellite monitoring and weather stations. In this case, the choice of a method for analyzing the received data and intelligent systems for their processing for predictive forecasting plays a fundamental role. The purpose of this study is to develop an intellectual system for predicting the state of the crop based on data from a weather station. A multi-agent algorithm for predicting the state of crops according to data from a weather station based on the self-organization of neurocognitive architecture was developed in this study. The description of the block diagram of the weather station and its sensors is given. A program algorithm has been developed for collecting and processing data from weather station sensors. As a result of processing, data on air and soil temperature, air and soil humidity, wind speed and direction, precipitation amount and the sum of active temperatures are sent to the intelligent decision-making system. A system for constructing cause-and-effect relationships is described. This system can make recommendations or forecasts on the condition of the crop and on the likelihood of diseases and pests in controlled crops.*

*Intellectual agent; multi-agent algorithm; neurocognitive architecture; weather station; intelligent system; smart farming.*

**Введение.** Погода играет важную роль в сельскохозяйственном производстве. Она оказывает сильное влияние на урожайность и состояние посевов, на требования к количеству и качеству удобрений, а также на профилактические меры по предотвращению заболеваний. Плохие погодные условия могут повлиять на качество продукции во время транспортировки и хранения, а значит и на жизнеспособность семян и посадочного материала. В настоящее время в сельском хозяйстве широко применяются различные системы интеллектуального мониторинга, к которым можно отнести дистанционное зондирование земли и применение автономных метеостанций. При этом основополагающую роль играет выбор метода анализа полученных данных и интеллектуальных систем их обработки для превентивного прогнозирования.

Спутниковый мониторинг по сравнению с метеостанциями имеет большие преимущества по охвату территории и при условии достаточно хорошей калибровки является источником оперативной и достоверной информации. Метеостанции, в свою очередь, позволяют получить качественную и количественную характеристику конкретного поля, позволяя накапливать базу данных для принятия решений при проведении агротехнических мероприятий. Спутниковая съемка широко используется в различных системах прогнозирования урожайности и состояния посевов. В частности, в работе [1] описан подход к прогнозированию урожайности сельскохозяйственных культур с использованием данных дистанционного зондирования Земли. В качестве основного параметра прогностической регрессионной модели использовались значения вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index).

Разработанная в ФГБУ «НИЦ «Планета» технология мониторинга состояния посевов посредством спутниковых наблюдений прогнозирует урожайность на отдельных полях, хозяйствах, административных районах, областях и проводит оценку состояния посевов по трем градациям, принятым в агрометеорологии: хорошее состояние посевов, удовлетворительное и плохое [2]. Технология мониторинга состояния посевов строилась на модификации американской модели биопродуктивности EPIC, разработанной в Техасской сельскохозяйственной научно-исследовательской лаборатории (Temple, TX, Soil and Water Research Laboratory) [3] в программном комплексе SDIM (Sistem of Databases and Imitating Modeling) и создании алгоритма оценки состояния посевов зерновых культур [4].

В работе [5] проводится анализ достоверности глобальных внутрисезонных и предсезонных прогнозов изменчивости урожайности, полученных путем применения статистических моделей к сезонным данным о температуре и осадках. Этот анализ выполняется для пяти отдельных моделей общей циркуляции (general circulation models (GCMs)) и двух наборов данных многомодельного ансамбля (multi-model ensemble (MME)) по усредненным данным и по отдельным областям.

В работе [6] проводится сравнение линейных и нелинейных регрессионных подходов к моделированию урожайности сельскохозяйственных культур с использованием погодных индексов. Используя комбинацию средних и пиковых погодных индексов в качестве входных данных, было доказано, что линейные регрессионные модели хуже прогнозируют урожайность, чем нелинейные модели.

Европейская система мониторинга состояния и продуктивности посевов (проект MARS) [7] осуществляет прогноз урожайности на основе двух разных статистических методов. В основе первого метода лежит классическая регрессионная модель. Второй метод основан на сравнении текущих условий развития посевов с условиями за предшествующие годы, с целью поиска аналогичного сценария.

Все рассмотренные выше модели опираются на уникальный набор входных характеристик, который не всегда является универсальным для различных территорий. Для получения данных, характерных для конкретной территории используются метеостанции. На российском рынке представлено множество моделей метеостанций различных производителей. На сегодняшний день, по данным компании «Агросигнал», метеостанции используют, как минимум, 50% крупных агропредприятий страны [8]. Поэтому весьма актуальной является задача разработки интеллектуальной системы прогнозирования состояния посевов по метеоданным.

*Объектом* исследования является влияние метеоданных на состояние посевов.

*Предметом* исследования является изучение возможности создания интеллектуальной системы прогнозирования состояния посевов по метеоданным на основе мультиагентных нейрокогнитивных архитектур.

*Цель исследования* – разработка интеллектуальной системы прогнозирования состояния посевов на основе данных с метеостанции.

*Задача исследования* – разработать мультиагентный алгоритм прогнозирования состояния посевов по данным с метеостанции на основе нейрокогнитивной архитектуры.

**Сбор данных с метеостанции.** В работе сбор данных осуществлялся с помощью метеостанции «ПогодаВПоле» [9], основными функциями которой являются:

- ◆ сбор данных о погоде на любом расстоянии без выезда в поле (количество выпавших осадков в виде дождя в мм, температура воздуха и температура почвы на глубине);
- ◆ автоматический расчет сумм активных температур 50С, 100С, а также средней, минимальной, максимальной температуры почвы в любой период;
- ◆ хранение истории и предоставление отчетности и графиков за любой промежуток времени.

Автономная метеостанция (рис. 1) состоит из системы энергообеспечения на базе солнечных панелей и Li-ion аккумулятора, системы беспроводной связи (3G) и микроконтроллера, отвечающего за сбор и обработку данных.



Рис. 1. Фотография автономной метеостанции

К микроконтроллеру подключены датчики метеостанции (датчики температуры и влажности воздуха и почвы, система контроля скорости и направления ветра и ряд других). Структурная схема автономной метеостанции представлена на рис. 2.



Рис. 2. Структурная схема автономной метеостанции

В рамках разработки системы «Умное поле» [10] автономная метеостанция установлена в поле, где она круглосуточно собирает погодные данные, которые передает на сервер. Пользователь для получения собранных данных подключается к онлайн-сервису, на котором хранятся метеоданные. Для сбора данных и их последующей обработки была разработана программа автоматического сбора данных [11], внешний вид окна которой показан на рис. 3.

Разработанная программа отвечает за сбор данных и их отправку в интеллектуальную систему принятия решений. Для этого программа подключается к серверу с метеоданными и считывает все новые записи, относящиеся к выбранной метеостанции. Полученный массив данных расшифровывается и отправляется в систему принятия решений в виде json сообщения. Кроме того, вся собранная информация хранится в файлах на локальном хранилище. Алгоритм работы программы для сбора данных с метеостанции представлен на рис. 4.

В результате сбора данных в интеллектуальную систему принятия решений отправляются данные о температуре воздуха и почвы, влажности воздуха и почвы, скорости и направлении ветра, количестве осадков и о сумме активных температур. Такой набор входных параметров позволяет в превентивном порядке делать рекомендации или прогнозы по урожайности и состоянию посевов, а также по вероятности заболеваний и распространения вредителей на контролируемых посевах.

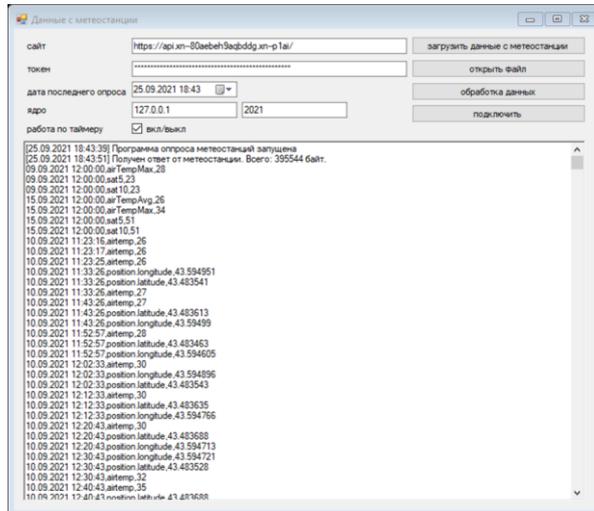


Рис. 3. Внешний вид окна программы сбора данных с метеостанции

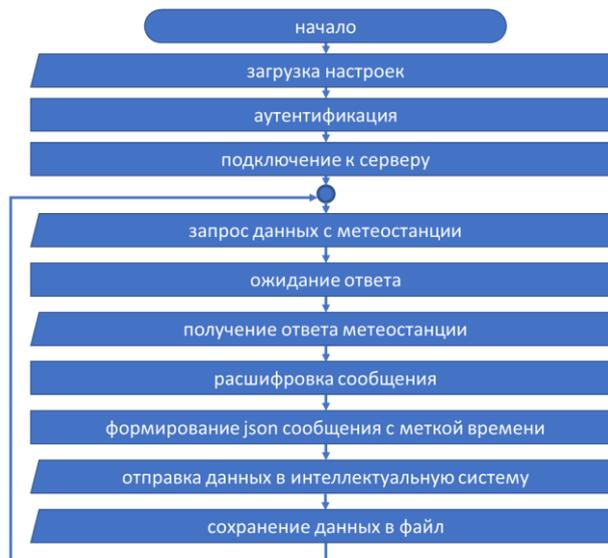


Рис. 4. Алгоритм работы программы для сбора данных с метеостанции

**Мультиагентный алгоритм прогнозирования состояния посевов по данным с метеостанции.** Данные поступают на вход интеллектуальной системы принятия решений и управления на основе мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры, описанной и названной в [12] интеллектуальным агентом (ИА). Такой агент получает информацию через систему многомодальных сенсоров, которая передается в рекурсивную нейрокогнитивную архитектура ИА, состоящую из агентов-нейронов [13], взаимодействующих в рамках единой системы функциональных узлов на основе обмена сообщениями. Каждый агент обладает целевой функцией максимизации энергии. Энергия рассматривается в качестве описательной характеристики – меры активности агента в среде. Агенты-нейроны имеют возможность пополнения своей энергии путем передачи информации в виде сооб-

щений другим агентам. Такое взаимодействие агентов разных типов возможно благодаря выполнению специального алгоритма – мультиагентного контракта [14]. Под валентностью понимается способность агента найти контрагента и заключить с ним контракт в соответствии с заданным типом протокола взаимодействия называется валентность [15].

В результате работы разрабатываемый ИА должен самостоятельно научиться прогнозировать возможную урожайность и вероятности появления вредителей и сорняков по данным с метеостанции. Для этого в ИА реализована система сенсоров, отвечающих за получение входных данных и генерацию набора сигнатур, который передается ИА через агенты-акторы: температура воздуха (airtemp), температура почвы (soiltemp), влажность воздуха (airhum), влажность почвы (soilhum) и скорость ветра (windspeed). Акторы рассылают сигнатуры в качестве сообщения концептуальным агентам-нейронам, отвечающим за выполнение функции концептуализации наблюдаемой среды на основе потоков входных данных. В работах [16, 17] показано, что, благодаря способности агентов-нейронов заключать мультиагентный алгоритм в нейрокогнитивной архитектуре динамически строится интерпретация семантики некоторого объекта или события. Таким образом, при получении данных с метеостанции, акторы отправляют измеренные показания так называемым нейронным фабрикам (нейрофабрикам), предназначенным для создания агентов-нейронов, которые являются обработчиками нового знания [18]. Например, при измерении температуры воздуха, актор airtemp отправляет сообщение на нейрофабрику концептуальных агентов, которая порождает агентов-нейронов «воздух» и «температура», а числовое значение поступает на нейрофабрику числительных, которая создает агента-нейрона с этим значением. Агенты-нейроны «температура» и «воздух» для закрытия своих валентностей отправляют информацию на нейрофабрику агентов-действия, которая порождает агента «измерен» и на нейрофабрику событийных агентов для создания агента-события «температура воздуха измерена». В процессе выполнения такого алгоритма происходит заключение мультиагентных контрактов между всеми участниками. Пример мультиагентного алгоритма получения данных приведен на рис. 5. Стоит отметить, что агент-событие должно заключить контракт не только с агентом-числительным, но и с соответствующими временным и локативным агентами, то есть заполнить валентности «где событие произошло» и «когда событие произошло».

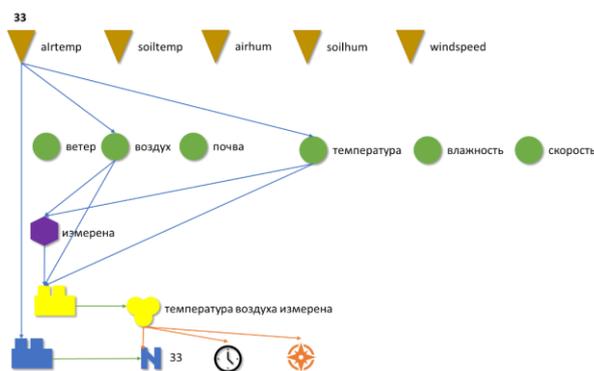


Рис. 5. Мультиагентный алгоритм сбора данных с метеостанции

Кроме метеоданных, ИА может отслеживать и параметры посевов: засеянная культура, удельная урожайность и информация о заболеваниях растений и распространении сорняков и вредителей. Эти данные позволяют ИА строить взаимосвязи

между погодными условиями и возможными угрозами для растений, а в дальнейшем прогнозировать заражения посевов и результирующую урожайность. В качестве основы системы прогнозирования выступает система построения причинно-следственных связей [19, 20]. Любое событие, которое привело к созданию агента-события рассматривается как событие-причина, для которой нужно найти событие-следствие. При этом известно, что событие-причина всегда предшествует событию-следствия. Для того, чтобы агенту-событию найти свои причины и следствие он делает рассылку сообщений вида «Почему? - Поэтому?» и ждет ответа от других агентов-событий. Событие-причина и событие-следствие представлены агентами-нейронами, каждый из которых обладает знаниями, описывающими соответствующую причинно-следственную зависимость. Эти агенты при повторяемости причины и следствия объединяют свои части знаний путем заключения мультиагентного контракта. Подобный подход позволяет ИА строить причинно-следственные связи между событиями. Например, при измерении температуры было сгенерировано событие «температура воздуха измерена» с контрактами к соответствующему числительному, локации и времени (рис. 6). Затем, через некоторое время пользователь регистрирует появление сорняка и отправляет информацию в систему принятия решений, в результате чего создается событие «обнаружен сорняк». Затем, так как события произошли друг за другом (и такая пара событий происходит неоднократно), между этими событиями появляется причинно-следственная связь.

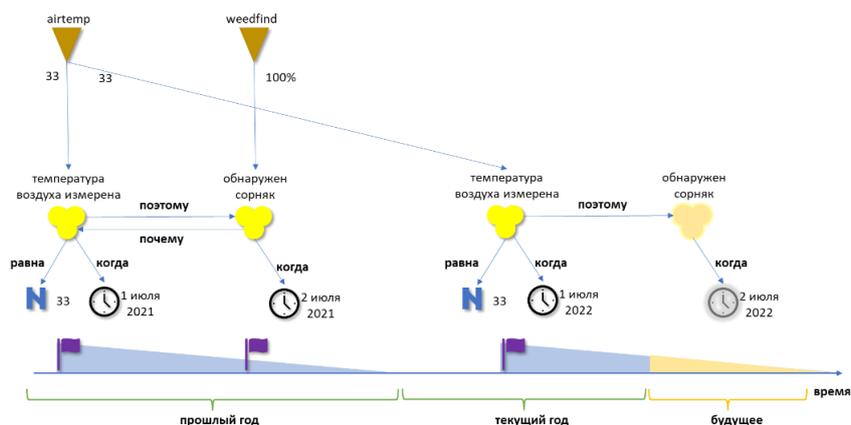


Рис. 6. Процесс создания причинно-следственной связи в мультиагентной архитектуре ИА

Таким образом, ИА ставит в соответствие определенным условиям внешней среды (в примере температура воздуха равна 33 градусам) некоторое событие (обнаружен сорняк). В следующий раз, когда с датчика температуры воздуха придет подобное сообщение, ИА может спрогнозировать появление события «обнаружен сорняк» за событием измерения температуры.

Тестирование мультиагентного алгоритма проводилось в САПР ИА, скриншот редактора которого приведен на рис. 7.

Применение подобной архитектуры позволит не только прогнозировать возникновение опасных условий внешней среды, но и предлагать методы превентивной защиты посевов от возможных угроз.

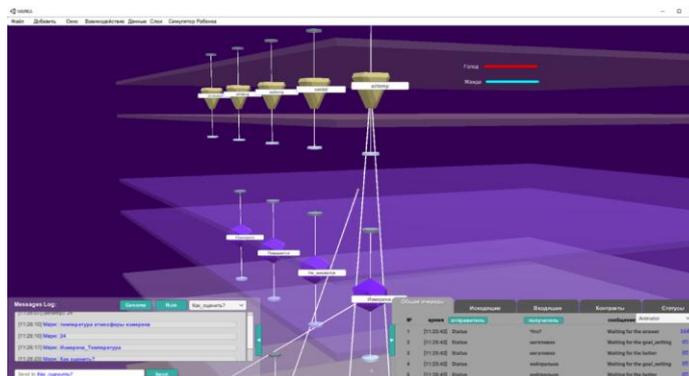


Рис. 7. Скриншот редактора интеллектуального агента в процессе сбора данных с метеостанции

**Выводы.** В рамках данного исследования разработан мультиагентный алгоритм прогнозирования состояния посевов по данным с метеостанции на основе самоорганизации нейрокогнитивной архитектуры. Сбор данных осуществлялся с помощью метеостанции «ПогодаВПоле», основными функциями которой являются сбор данных о погоде на любом расстоянии без выезда в поле, автоматический расчет сумм активных температур, хранение истории и предоставление отчетности и графиков за любой промежуток времени. Приведено описание структурной схемы метеостанции и датчиков. Разработан алгоритм программы для сбора и обработки данных с датчиков метеостанции. В результате обработки в интеллектуальную систему принятия решений отправляются данные о температуре воздуха и почвы, влажности воздуха и почвы, скорости и направлении ветра, количестве осадков и о сумме активных температур. Описана система построения причинно-следственных связей, на основе которой строится система прогнозирования, которая позволяет в превентивном порядке делать рекомендации или прогнозы по урожайности и состоянию посевов, а также по вероятности заболеваний и распространения вредителей на контролируемых посевах.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Степанов А.С. Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур на основе данных дистанционного зондирования Земли (на примере сои) // Вычислительные технологии. – 2019. – Т. 24, № 6. – С. 125-133. – DOI: 10.25743/ICT.2019.24.6.015.
2. Клещенко А. Д., Вирченко О.В., Савицкая О.В. Спутниковый мониторинг состояния и продуктивности посевов зерновых культур // Тр. ВНИИСХМ. – 2013. – Вып. 38. – С. 54-70.
3. Sharpley A.N.; Williams J.R. The Erosion-Productivity Impact Calculator (EPIC). Technical bulletin (United States. Department of Agriculture). – No. 1768. – 235 p.
4. Сладких Л.А., Сапрыкин Е.И., Захватов М.Г., Сахарова Е.Ю. Технология мониторинга состояния посевов по данным дистанционного зондирования Земли на юге Западной Сибири // GEOMATICS. – 2016. – № 2. – С 39-48.
5. Iizumia T., Shinb Y., Kima W., Kimb M., Choib J. Global crop yield forecasting using seasonal climate information from a multi-model ensemble // Climate Services. – 2018. – Vol. 11. – P. 13-23. – <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2018.06.003>.
6. Shashank V., Thomas K., Sangram V., Auroop G., Ganguly R. Data science for weather impacts on crop yield // Frontiers in Sustainable Food Systems. – 2020. – <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00052>.
7. Bulletins and Publications. European Commission Joint Research Center. – Режим доступа: <http://mars.jrc.ec.europa.eu/mars/Bulletins-.Publications>.

8. *Загоровская В.* Сам себе метеоролог. Погода с полей: зачем хозяйства обзаводятся метеостанциями // *Агротехника и технологии.* – 2020. – № 5. – <https://www.agroinvestor.ru/agrotechnika/81/>.
9. Погода в поле. – Режим доступа: <https://погодавполе.рф>.
10. *Нагоев З.В., Шуганов В.М., Бжыхатлов К.Ч., Заммоев А.У., Иванов З.З.* Перспективы повышения производительности и эффективности сельскохозяйственного производства с применением интеллектуальной интегрированной среды // *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН.* – 2021. – № 6 (104). – С. 155-165. – DOI: <https://doi.org/10.35330/1991-6639-2021-6-104-155-165>.
11. *Бжыхатлов К.Ч., Унагасов А.А.* Программа для подключения беспроводных метеостанций к интеллектуальной системе принятия решений / Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2021665983, 06.10.2021.
12. *Нагоев З.В.* Интеллектика, или мышление в живых и искусственных системах. – Нальчик: Изд-во КБНЦ РАН, 2013. – 213 с.
13. *Нагоев З.В., Бжыхатлов К.Ч., Пишенокова И.А., Нагоева О.В., Сундуков З.А., Аталиков Б.А., Чеченова Н.А., Малышев Д.А.* 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. – DOI: <https://doi.org/10.35330/1991-6639-2020-6-98-68-79>.
14. *Nagoev Z.V.* Multiagent recursive cognitive architecture // *Biologically Inspired Cognitive Architectures 2012: Proceedings of the third annual meeting of the BICA Society, in Advances in Intelligent Systems and Computing series.* – Springer, 2012. – P. 247-248.
15. *Nagoev Z., Pshenokova I., Nagoeva O., Sundukov Z.* Learning algorithm for an intelligent decision making system based on multi-agent neurocognitive architectures // *Cognitive Systems Research.* – Elsevier, 2021. – Vol. 66. – P. 82-88.
16. *Nagoev Z., Nagoeva O., Pshenokova I., Bzhikhatlov K., Gurtueva I., Kankulov S.* Multiagent neurocognitive models of the processes of understanding the natural language description of the mission of autonomous robots // *Biologically Inspired Cognitive Architectures 2021: Proceedings of the 12th Annual Meeting of the BICA Society. Studies in Computational Intelligence, volume XVI, 625 Cham, Switzerland: Springer Nature, 2022.* – ISSN: 1860-949X.
17. *Gurtueva I., Nagoeva O. and Pshenokova I.* Speech recognition algorithm for natural language management systems under variety of accents // *E3S Web of Conferences.* – 2020. – Vol. 164, 10015. – DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016410015>.
18. *Пишенокова 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. – DOI: <https://doi.org/10.35330/1991-6639-2020-6-98-80-90>.
19. *Nagoev Z., Pshenokova I., Anchekov M.* Model of the reasoning process in a multiagent cognitive system // *Procedia Computer Science.* – 2020. – Vol. 169. – P. 615-619. – <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.02.202>.
20. *Nagoev Z., Pshenokova I., Nagoeva O., and Kankulov S.* Situational analysis model in an intelligent system based on multi-agent neurocognitive architectures // *Journal of Physics: Conference Series (JPCS) 2131 (2021) 022103.* – DOI:10.1088/1742-6596/2131/2/022103.

#### REFERENCES

1. *Stepanov A.S.* Prognozirovanie urozhaynosti sel'skokhozyaystvennykh kul'tur na osnove dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli (na primere soi) [Forecasting crop yields based on Earth remote sensing data (on the example of soybeans)], *Vychislitel'nye tekhnologii* [Computational technologies], 2019, Vol. 24, No. 6, pp. 125-133. DOI: 10.25743/ICT.2019.24.6.015.
2. *Kleshchenko A.D., Virchenko O.V., Savitskaya O.V.* Sputnikovyy monitoring sostoyaniya i produktivnosti posevov zernovykh kul'tur [Satellite monitoring of the state and productivity of grain crops], *Tr. VNIISKhM* [Proceedings of VNIISHM], 2013, Issue 38, pp. 54-70.
3. *Sharpley A.N.; Williams J.R.* The Erosion-Productivity Impact Calculator (EPIC). Technical bulletin (United States. Department of Agriculture), No. 1768, 235 p.

4. Sladkikh L.A., Saprykin E.I., Zakhvatov M.G., Sakharova E.Yu. Tekhnologiya monitoringa sostoyaniya posevov po dannym distantsionnogo zondirovaniya Zemli na yuge Zapadnoy Sibiri [Technology for monitoring the state of crops according to remote sensing of the Earth in the south of Western Siberia], *GEOMATICS* [GEOMATICS], 2016, No. 2, pp. 39-48.
5. Iizumia T., Shinb Y., Kima W., Kimb M., Choib J. Global crop yield forecasting using seasonal climate information from a multi-model ensemble, *Climate Services.*, 2018, Vol. 11, pp. 13-23. – <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2018.06.003>.
6. Shashank V., Thomas K., Sangram V., Auroop G., Ganguly R. Data science for weather impacts on crop yield, *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2020. Available at: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00052>.
7. Bulletins and Publications. European Commission Joint Research Center. Available at: <http://mars.jrc.ec.europa.eu/mars/Bulletins-Publications>.
8. Zagorovskaya V. Sam sebe meteorolog. Pogoda s poley: zachem khozyaystva obzavodyatsya meteostantsiyami [Himself a meteorologist. Weather from the fields: why farms acquire weather stations], *Agrotehnika i tekhnologii* [Agrotechnics and technologies], 2020, No. 5. Available at: <https://www.agroinvestor.ru/agrotehnika/81/>.
9. Pogoda v pole [Weather in the field]. Available at: <https://pogodavpole.rf>.
10. Nagoev Z.V., Shuganov V.M., Bzhikhatlov K.Ch., Zammoev A.U., Ivanov Z.Z. Perspektivy povysheniya proizvoditel'nosti i effektivnosti sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva s primeneniem intellektual'noy integrirovannoy sredy [Prospects for increasing the productivity and efficiency of agricultural production using an intelligent integrated environment], *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2021, No. 6 (104). pp. 155-165. DOI: <https://doi.org/10.35330/1991-6639-2021-6-104-155-165>.
11. Bzhikhatlov K.Ch., Unagasov A.A. Programma dlya podklyucheniya besprovodnykh meteostantsiy k intellektual'noy sisteme prinyatiya resheniy [Program for connecting wireless weather stations to an intelligent decision-making system], Certificate of registration of the computer program No. 2021665983, 06.10.2021.
12. 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, 213 p.
13. Nagoev Z.V., Bzhikhatlov K.Ch., Pshenokova I.A., Nagoeva O.V., Sundukov Z.A., Atalikov B.A., Chechenova N.A., Malyshev D.A. 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 multi-agent neurocognitive architecture], *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Bulletin of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2020, No. 6 (98), pp. 68-79. DOI: <https://doi.org/10.35330/1991-6639-2020-6-98-68-79>.
14. Nagoev Z.V. Multiagent recursive cognitive architecture, *Biologically Inspired Cognitive Architectures 2012: Proceedings of the third annual meeting of the BICA Society, in Advances in Intelligent Systems and Computing series*. Springer, 2012, pp. 247-248.
15. Nagoev Z., Pshenokova I., Nagoeva O., Sundukov Z. Learning algorithm for an intelligent decision making system based on multi-agent neurocognitive architectures, *Cognitive Systems Research*. Elsevier, 2021, Vol. 66, pp. 82-88.
16. Nagoev Z., Nagoeva O., Pshenokova I., Bzhikhatlov K., Gurtueva I., Kankulov S. Multiagent neurocognitive models of the processes of understanding the natural language description of the mission of autonomous robots, *Biologically Inspired Cognitive Architectures 2021: Proceedings of the 12th Annual Meeting of the BICA Society. Studies in Computational Intelligence, volume XVI, 625 Cham, Switzerland*: Springer Nature, 2022. ISSN: 1860-949X.
17. Gurtueva I., Nagoeva O. and Pshenokova I. Speech recognition algorithm for natural language management systems under variety of accents, *E3S Web of Conferences*, 2020, Vol. 164, 10015. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016410015>.
18. 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. DOI: <https://doi.org/10.35330/1991-6639-2020-6-98-80-90>.

19. Nagoev Z., Pshenokova I., Anchekov M. Model of the reasoning process in a multiagent cognitive system, *Procedia Computer Science*, 2020, Vol. 169, pp. 615-619. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.02.202>.
20. Nagoev Z., Pshenokova I., Nagoeva O., and Kankulov S. Situational analysis model in an intelligent system based on multi-agent neurocognitive architectures, *Journal of Physics: Conference Series (JPCS)* 2131 (2021) 022103. DOI:10.1088/1742-6596/2131/2/022103.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор С.Ш. Рехвиашвили.

**Пшенокова Инна Аuesовна** – Институт информатики и проблем регионального управления Кабардино-Балкарского научного центра РАН; e-mail: pshenokova\_inna@mail.ru; г. Нальчик, Россия; тел: +79094901949; к.ф.-м.н.; зав. лабораторией «Интеллектуальные среды обитания».

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

**Унагасов Алим Ахмедханович** – e-mail: alim.unagasov@mail.ru; тел.: +79054372450; стажер-исследователь лаборатории «Нейрокогнитивные автономные интеллектуальные системы».

**Абазоков Мухамед Адмирович** – e-mail: abazokov1997@mail.ru; тел.: +79631673421; стажер-исследователь лаборатории «Нейрокогнитивные автономные интеллектуальные системы».

**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; phone: +79094901949; cand. of phys. and math. sc.; head of the laboratory «Intellektual'nyye sredy obitaniya».

**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, fax: +79631663448; cand. of phys. and math. sc.; head of the laboratory «Neurocognitive autonomous intelligent systems».

**Unagasov Alim Ahmedhanovich** – e-mail: alim.unagasov@mail.ru; phone: +79054372450; research assistant of the laboratory «Neurocognitive autonomous intelligent systems».

**Abazokov Muhammed Admirovich** – e-mail: abazokov1997@mail.ru; phone: +79631673421; research assistant of the laboratory «Neurocognitive autonomous intelligent systems».

УДК 681.51

DOI 10.18522/2311-3103-2022-1-101-109

**И.С. Тренёв**

### **СТАБИЛИЗАЦИЯ ДВИЖЕНИЯ КВАДРОКОПТЕРА ВДОЛЬ ЗАДАННОЙ ТРАЕКТОРИИ С ПОМОЩЬЮ СУБОПТИМАЛЬНОГО ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ С $H_2/H_\infty$ -КРИТЕРИЕМ**

*Целью данной работы является построение субоптимального регулятора с  $H_2/H_\infty$ -критерием, стабилизирующего отклонение динамической системы от заданной программной траектории. Предполагается, что на один вход системы будет подаваться импульсное возмущение, а на второй –  $L_2$ -возмущение. Рассматриваемая  $H_2/H_\infty$ -норма равняется максимальному значению  $L_2$ -нормы выхода по всем  $L_2$ -возмущениям и векторам импульсного возмущения, для которых сумма квадратичной формы вектора импульсного возмущения с заданной весовой матрицей и квадрата  $L_2$ -нормы второго возмущения не превосходит единицу. В работе реализуется процесс вычисления  $H_2/H_\infty$ -нормы в терминах линейных матричных неравенств для динамической системы. Важную роль в процессе сочетания  $H_2$ -нормы и  $H_\infty$ -нормы в  $H_2/H_\infty$ -норме выполняет весовая матрица, входящая в определение данной нормы. Стоит отметить, что в отличие от  $H_\infty$ -нормы,  $H_2/H_\infty$ -норма достигается в смысле наилучшего  $L_2$ - и импульсно-*

го возмущений, при которых достигается максимальное значение  $L_2$ -нормы выхода. Необходимо получить и линеаризовать математическую модель квадрокоптера, построить программную траекторию движения и стабилизировать отклонения с помощью субоптимального закона управления с  $H_2/H_\infty$ -критерием при наличии шумов в системе. В качестве инструмента поиска субоптимального управления используется аппарат линейных матричных неравенств. Объектом исследования в данной работе является квадрокоптер, который представляет собой беспилотный летательный аппарат, имеющий четыре двигателя с воздушными винтами (пропеллерами), создающими тягу. Оси винтов и углы лопастей зафиксированы и регулируются лишь скорости вращения, что существенно упрощает конструкцию. С помощью уравнения Ньютона-Эйлера, получена нелинейная математическая модель квадрокоптера, а также произведена линеаризация данной модели в окрестности заданной программной траектории. В среде MATLAB производится численное моделирование и построение траекторий движения квадрокоптера, с помощью прикладного пакета для оптимизации YALMIP, Sedumi toolbox, производится решение линейных матричных неравенств. В среде Simulink, производится построение блока управления, стабилизирующего движение квадрокоптера вдоль заданной траектории при наличии  $L_2$ - и импульсного возмущений в системе. Производится демонстрация процесса виртуальной визуализации полета.

*Субоптимальное управление; стабилизация; роботизированная система;  $H_2/H_\infty$ ; подавление влияния внешних возмущений; моделирование.*

I.S. Trenev

#### MOVEMENT STABILIZATION OF THE QUADCOPTER ALONG A GIVEN TRAJECTORY USING A SUBOPTIMAL CONTROL LAW WITH $H_2/H_\infty$ -CRITERION

*The aim of the study is to construct a suboptimal controller with the  $H_2/H_\infty$ -criterion that stabilizes the deviation of the dynamic system from the given program trajectory. It is assumed that an impulse disturbance will be applied to one input of the system, and an  $L_2$ -disturbance to the second one. The  $H_2/H_\infty$ -norm is equal to the maximum value of the  $L_2$ -output norm for all  $L_2$ - and impulse disturbances vectors for which the sum of the quadratic form of the impulse disturbance vector with a given weight matrix and the squared  $L_2$ -norm of the second disturbance never greater than one. In this paper, it is required to demonstrate the process of calculating the  $H_2/H_\infty$ -norm in terms of linear matrix inequalities for a dynamical system and a system with uncertainty. An important role in the process of combining the  $H_2$ -norm and the  $H_\infty$ -norm in the  $H_2/H_\infty$ -norm is played by the weight matrix included in the definition of this norm. It should be noted that, unlike the  $H_\infty$ -norm, the  $H_2/H_\infty$ -norm is achieved in the sense of the worst  $L_2$ - and impulse disturbances, where the maximum value of the  $L_2$ -output norm is reached. It is necessary to obtain and linearize the mathematical model of the quadcopter, build a programmed trajectory, and stabilize the deviations using a suboptimal control law with the  $H_2/H_\infty$ -criterion in the presence of noise in the system. Linear matrix inequalities are used for suboptimal control searching. The object of this study is a quadcopter, which is an unmanned aerial vehicle with four engines with propellers that create thrust. The axes of the propellers and the angles of the blades are fixed and only the speed of rotation is regulated, which greatly simplifies the design. Using the Newton-Euler equation, a nonlinear mathematical model of a quadcopter is obtained, and this model is linearized. In the MATLAB environment, using the applied package for modeling and optimization YALMIP, Sedumi toolbox, numerical modeling, and construction of quadcopter motion trajectories are performed. After that, in the Simulink environment, a control block that stabilizes the movement of the quadcopter along a given trajectory in the presence of  $L_2$ - and impulse disturbances in the system is constructed. At the end, a demonstration of the process of virtual visualization of the flight is made.*

*Suboptimal control; stabilization; robotic system;  $H_2/H_\infty$ ; disturbance rejection; simulation.*

**Введение.** В теории автоматического управления к одним из самых активно разрабатываемых задач оптимального управления и фильтрации относятся задачи с критериями, определяемыми индуцированными нормами в соответствующих нормированных пространствах [1]. Каждый из оптимальных по этим критериям регуляторов имеет свои определенные недостатки, поэтому возникла идея сочетания этих критериев и создание общей теории, которая бы позволила синтезировать оптимальный регулятор по смешанному критерию [10, 11]. В конце 80-х были заложены и активно раз-

работывались в 90-х основные идеи смешанного  $H_2/H_\infty$ -управления [15]. Под таким управлением, главным образом, понимали задачу минимизации верхней границы  $H_2$  нормы передаточной функции в одном канале, при ограничении на  $H_\infty$  норму передаточной функции замкнутой системы другого канала. Одна из главных трудностей, возникшая на этом пути в различных постановках задач, заключалась в сложности решения уравнения Рикатти для формирования законов управления [3]. Использование методов оптимизации выпуклых функций и аппарата линейных матричных неравенств дало возможность значительно продвинуться в синтезе оптимальных законов управления с соответствующими критериями [4]. Также возникла концепция так называемого многокритериального управления, которая подразумевает под собой наличие нескольких каналов со своими входами и выходами, для каждого из которых задан свой критерий, и все эти критерии сформулированы в терминах общей функции Ляпунова [5]. Но стоит отметить, что в полной мере теория смешанного  $H_2/H_\infty$ -управления своего завершения не получила.

**$H_2/H_\infty$ -норма.** Начнем описание  $H_2/H_\infty$ -синтеза с введения понятия  $H_2/H_\infty$ -нормы упрощенной системы. Пусть задана линейная устойчивая система уравнений [11]

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + B_v v + B_w w, & x(0) = 0 \\ z = Cx + Dv, \end{cases} \quad (1)$$

где  $x \in \mathbb{R}^{n_x}$  – вектор состояния,  $z \in \mathbb{R}^{n_z}$  – целевой выход, матрица  $A$  – Гурвицева,  $v = v(t) \in \mathbb{R}^{n_v}$  – возмущение, ограниченной по  $L_2$ -норме ( $L_2$ -возмущение),  $w \in \mathbb{R}^{n_w}$  – импульсное возмущение ( $w = d\delta(t)$ ), где  $d$  – неизвестный вектор,  $\delta(t)$  – функция Дирака).

Уровень гашения  $L_2$  возмущения для целевого выхода системы (1) представим в виде

$$\gamma_\infty(H_v) = \sup_{\|v\| \neq 0, d=0} \frac{\|z\|}{\|v\|},$$

где  $H_v(s) = C(sI - A)^{-1}B_v + D$  – передаточная функция системы (1) от входа  $v$  к выходу  $z$ .

Уровень гашения импульсного возмущения для целевого выхода системы (1) представим в виде

$$\gamma_2(H_w) = \sup_{d \neq 0, v=0} \frac{\|z\|}{|d|},$$

где  $H_w(s) = C(sI - A)^{-1}B_w$  – передаточная функция системы (1) от входа  $w$  к выходу  $z$ .

Уровень гашения совместных  $L_2$  и импульсного возмущений для целевого выхода системы (1) представим в виде

$$\gamma_{\infty,2}(H_v, H_w) = \sup_{\|v\|^2 + d^T R d \neq 0} \frac{\|z\|}{(\|v\|^2 + d^T R d)^{1/2}}, \quad (2)$$

где  $R = R^T > 0$  – весовая матрица.

Уровень гашения совместных возмущений можно интерпретировать как показатель, который определяется весовой матрицей  $R$  и характеризует указанные уровни, задаваемые  $H_\infty$ - и  $H_2$ -нормами. В качестве основного инструмента вычисления данного показателя можно рассмотреть следующее утверждение [12].

*Теорема 1.*  $H_2/H_\infty$ -норма удовлетворяет условию  $\gamma_{\infty,2}(H_v, H_w) < \gamma$  тогда и только тогда, когда следующие линейные матричные неравенства

$$\begin{pmatrix} A^T X + XA & XB_v & C^T \\ B_v^T X & -\gamma^2 I & D^T \\ C & D & -I \end{pmatrix} < 0, \quad B_w^T X B_w < \gamma^2 R \quad (3)$$

разрешимы относительно  $\gamma^2 > 0$  и матрицы  $X = X^T > 0$ ,  $X \in \mathbb{R}^{n \times n}$ .

Отметим, что из (2) непосредственно следует

$$\gamma_{\infty,2}(H_v, H_w) \geq \max\{\gamma_\infty(H_v), \lambda_{\max}^{-1/2}(R)\gamma_2(H_w)\}.$$

Поэтому, чтобы учитывать влияние возмущений обоих типов, должно быть выполнено условие  $\gamma_{\infty,2}(H_v, H_w) > \gamma_\infty(H_v)$ . Параллельно с этим, пусть  $X_\infty$  – решение первого неравенства в (3) для  $\gamma = \gamma_\infty(H_v) + \varepsilon$ , ( $\varepsilon > 0$ ). Если получится так, что  $B_w^T X_\infty B_w < \gamma^2 R$ , то второе неравенство в (3) будет выполнено, а значит с любой степенью точности будет выполнено  $\gamma_{\infty,2}(H_v, H_w) = \gamma_\infty(H_v)$  (т.е. уровень гашения  $L_2$  возмущений совпадет с уровнем гашения совместных возмущений). Исходя из этого, в дальнейших рассуждениях будем считать, что весовая матрица  $R$  должна удовлетворять условию  $R < R_* = \gamma_\infty^{-2}(H_v) B_w^T X_\infty B_w$  (т.е. не должна быть слишком «большой»). Будем требовать выполнения условия

$$\lambda_{\max}(R^{-1}R_*) > 1. \quad (4)$$

**Синтез  $H_2/H_\infty$ -субоптимального управления.** В том случае, если система является неустойчивой или  $H_2/H_\infty$ -норма не является достаточно малой, систему можно стабилизировать и уменьшить значения нормы за счет введения обратной связи по состоянию или измеряемому выходу [13]. Так, для случая измеряемого состояния замкнутая система с обратной связью примет вид:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + B_v v + B_w w + B_u u, & x(0) = x_0 \\ z = Cx + D_v v + D_u u, \end{cases} \quad (5)$$

где  $u \in \mathbb{R}^{n_u}$  – управляемый вход (управление).

Определим  $H_2/H_\infty$ -оптимальное управление вида

$$u = \Theta x, \quad (6)$$

при котором  $H_2/H_\infty$ -норма в системе должна быть минимальной.

Определим функцию

$$\Psi(u, v, w) = \|z\|^2 - \gamma^2(\|v\|^2 + d^T R d),$$

определяющую взаимосвязь между нормами входа и выхода, которую необходимо будет минимизировать.

Тогда можно сформулировать цель управления следующим образом: обеспечить на траекториях системы (5) выполнение условия

$$\min_u \max_{v \in L_2, d \in \mathbb{R}^{n_w}} \Psi(u, v, w) \leq 0,$$

при минимально возможном  $\gamma > 0$ .

В данном случае для вычисления  $H_2/H_\infty$ -нормы, согласно теореме 1, необходимо рассмотреть систему, замкнутую управлением вида (6). Умножив матрицу из первого неравенства в (3) для замкнутой системы слева и справа на

$$\begin{pmatrix} X^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & I \end{pmatrix},$$

обозначив  $Y = X^{-1}$  и  $Z = \Theta Y$ , получим следующее утверждение [15].

*Теорема 2.* Если выполнено условие (4), то минимальную  $H_2/H_\infty$ -норму системы с обратной связью (5), (6) можно найти при решении задачи минимизации  $\gamma^2$  с ограничениями, определяемыми следующими матричными неравенствами

$$\begin{pmatrix} AY + YA^T + B_u Z + Z^T B_u^T & B_v & YC^T + Z^T D_u^T \\ B_v^T & -\gamma^2 I & D_v^T \\ CY + D_u Z & D_v & -I \end{pmatrix} \leq 0, \quad \begin{pmatrix} Y & B_w \\ B_w^T & \gamma^2 R \end{pmatrix} \geq 0, \quad (7)$$

относительно  $Y = Y^T > 0$ ,  $Z$  и  $\gamma^2 > 0$ , где при минимальном значении  $\gamma^2 = \gamma_\infty^2$ ,  $R_* = \gamma_\infty^{-2} B_w^T X_\infty B_w$  и  $X_\infty$  удовлетворяют первому неравенству в (7). Матрица параметров  $H_2/H_\infty$ -оптимального управления, в данном случае, вычисляется как  $\Theta_* = ZY^{-1}$  [14].

Таким образом, при правильном выборе весовой матрицы  $R$ , можно синтезировать  $H_2/H_\infty$ -субоптимальный регулятор, обеспечивающий компромисс между  $H_2$ - и  $H_\infty$ -оптимальными регуляторами.

**Динамическая модель квадрокоптера.** С помощью уравнения Ньютона-Эйлера [16, 17] можно получить нелинейную математическую модель квадрокоптера, характеризующую его движение, в зависимости от общей тяги ( $U_1$ ) и крутящих моментов ( $U_2, U_3, U_4$ ). Данная система имеет вид:

$$\begin{cases} \ddot{x} = -\frac{1}{m} \cdot (\sin \psi \cdot \sin \varphi + \cos \psi \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi) \cdot U_1, \\ \ddot{y} = -\frac{1}{m} \cdot (-\cos \psi \cdot \sin \varphi + \sin \psi \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi) \cdot U_1, \\ \ddot{z} = -\frac{1}{m} \cdot \cos \theta \cdot \cos \varphi \cdot U_1 + g, \\ \dot{\varphi} = p + \sin \varphi \cdot \tan \theta \cdot q + \cos \varphi \cdot \tan \theta \cdot r, \\ \dot{\theta} = q \cdot \cos \varphi - r \cdot \sin \varphi, \quad \dot{\psi} = q \cdot \frac{\sin \varphi}{\cos \theta} + r \cdot \frac{\cos \varphi}{\cos \theta}, \\ \dot{p} = \frac{I_{yy} - I_{zz}}{I_{xx}} \cdot q \cdot r + \frac{U_2}{I_{xx}}, \quad \dot{q} = \frac{I_{zz} - I_{xx}}{I_{yy}} \cdot p \cdot r + \frac{U_3}{I_{yy}}, \\ \dot{r} = \frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}} \cdot p \cdot q + \frac{U_4}{I_{zz}}, \end{cases} \quad (8)$$

где  $x, y, z$  – координаты положения центра масс коптера в инерциальной системе координат (ИСК);  $\varphi, \psi, \theta$  – углы Крылова, определяющие позицию коптера в ИСК;  $p, q, r$  – угловые скорости в системе координат, связанной с коптером (ССК);  $m$  – масса квадрокоптера;  $g$  – ускорение свободного падения;  $I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}$  – диагональные элементы матрицы инерции.

Чтобы решить задачу управления методами выпуклой оптимизации, линеаризуем данную модель в окрестности программной траектории.

Линеаризованная в окрестности программного движения система имеет вид:

$$\Delta \dot{X} = A \Delta X + B \Delta U,$$

где  $\Delta X = X - X_d$  и  $\Delta U = U - U_d$  – приращения вектора состояния и управляющего воздействия ( $X_d$  – программная траектория,  $U_d$  – программное управление),  $A$  и  $B$  – матрицы, состоящие из значений частных производных нелинейной системы (8) по параметрам вектора состояния  $X$  и управляющего воздействия  $U$ .

**Построение программной траектории.** В данной работе разобьем общую программную траекторию на 3 (основных) вида: зависание (подъем и вращение вокруг собственной оси); смещение вдоль оси  $OX$ ; смещение вдоль оси  $OY$ , которые можно комбинировать и получать различные вариации движения. Программную траекторию и программное управление будем получать из исходной нелинейной системы (8). Один из возможных вариантов программной траектории, используемой в данной работе, представлена на рис. 1.

**Расчет субоптимального закона управления с  $H_2/H_\infty$ -критерием для системы с неопределенностью.** На рис. 2–5, показаны графики ошибок между желаемыми и измеренными значениями координат, скоростей, углового положения и угловых скоростей для системы с начальным состоянием  $X = (0.1 \ 0 \ -0.2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)^T$ .

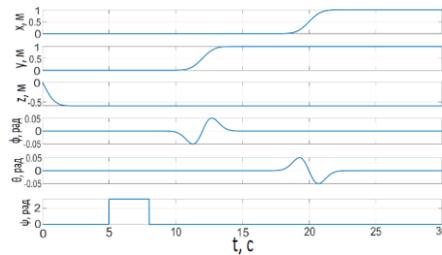


Рис. 1. Общая программная траектория полета квадрокоптера

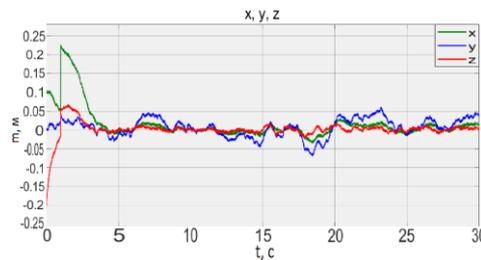


Рис. 2. Невязки координат  $x, y, z$



Рис. 3. Невязки скоростей  $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$

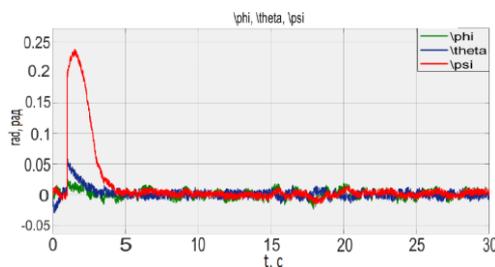


Рис. 4. Невязки углов  $\varphi, \theta, \psi$

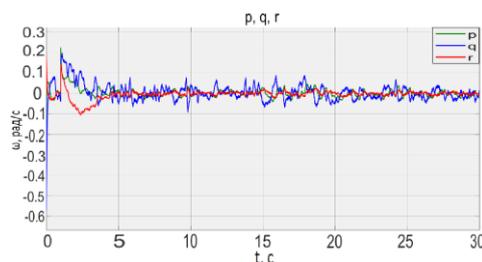


Рис. 5. Невязки угловых скоростей  $p, q, r$

**Заключение.** В работе, с помощью аппарата линейных матричных неравенств, был синтезирован субоптимальный закон управления с  $H_2/H_\infty$ -критерием. Было показано, что построенный закон управления с данным критерием позволяет оптимизировать реакцию целевого выхода на импульсные и  $L_2$ -возмущения.

При помощи уравнения Ньютона-Эйлера была построена и линеаризована модель квадрокоптера, для которой была решена задача стабилизации вдоль заданной программной траектории, при наличии импульсных и  $L_2$ -возмущений. В средах MATLAB и Simulink были вычислены матрицы параметров оптимального закона управления и произведено моделирование.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Duren P.L.* Theory of Hp Spaces. – Academic Press, 1970. – 261 p.
2. *Geir E. Dullerud, Fernando G. Paganini.* A Course in Robust Control Theory: A Convex Approach. – Academic Press, 2000. – 383 p.
3. *Petersen I.R., Hollot C.V.* A Riccati equation approach to the stabilization of uncertain linear systems // Automatica. – 1986. – Vol. 22. – P. 397-411.
4. *Boyd S., El Ghaoui L., Feron E., Balakrishnan V.* Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory. – Philadelphia: SIAM, 1994. – 205 p.
5. *Scherer C., Gahinet P., Chilali M.* Multiobjective output-feedback control via LMI optimization // IEEE Trans. Automat. Control. – 1997. – Vol. 42, No. 7. – P. 896-911.
6. *Alamo T., Normey-Rico J.E., Arahal M., Limon D. and Camacho E.* Introducing linear matrix inequalities in a control course // IFAC Proceedings. – 2006. – Vol. 39. – P. 205-210.
7. *Feron E.* Analysis of robust  $H_2$  performance using multiplier theory // SIAM Journal of Control and Optimization. – 1997. – Vol. 3. – P. 160-177.
8. *Feron E., Balakrishnan V., Boyd S., and El Ghaoui L.* Numerical methods for  $H_2$  related problems // In Proc. American Control Conference. – 1992. – P. 2921-2922.
9. *Gahinet P., Apkarian P.* A Linear Matrix Inequality approach to  $H_\infty$  control // International Journal of Robust and Nonlinear Control. – 1994. – Vol. 4. – P. 421-448.
10. *Doyle J.C., Glover K., Khargonekar P.P., Francis B.A.* State-space solutions to standard  $H_2$  and  $H_\infty$  control problems // IEEE Trans. Automat. Control. – 1989. – Vol. 34, No. 8. – P. 831-847.
11. *Khargonekar P.P., Rotea M.A.* Mixed  $H_2/H_\infty$ -control: a convex optimization approach // IEEE Trans. Automat. Control. – 1991. – Vol. 36, No. 7. – P. 824-831.

12. Yeh H.H., Banda S.S. Necessary and sufficient conditions for mixed  $H_2$  and  $H_\infty$  optimal control // Proceedings of 29 IEEE CDC, Hawaii, 1990. – P. 1013-1017.
13. Scherer C. Mixed  $H_2/H_\infty$  control // Trends in Control. A European Perspective. A. Isidori, ed. – Berlin: Springer-Verlag, 1995. – P. 173-216.
14. Коган М.М. Синтез оптимального и робастного управлений с  $H_2/H_\infty$ -критерием // Автоматика и телемеханика. – 2016. – № 8. – С. 3-23.
15. Sznajder M., Rotstein H., Bu J., Sideris A. An exact solution to continuous-time mixed  $H_2/H_\infty$  control problems // IEEE Trans. Automat. Control. – 2000. – Vol. 45, No. 11. – P. 2095-2101.
16. Bresciani T. Modelling, Identification and Control of a Quadrotor Helicopter. Czech Technical University in Prague. Master's Thesis. Prague. June 2011. – 75 p.
17. Hoffmann G.M., Huang H., Waslander S.L., and Tomlin C.J. Quadrotor helicopter flight dynamics and control: Theory and experiment // AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, Aug. 2007. – P. 401-406.
18. Lofberg J. YALMIP: A toolbox for modeling and optimization in MATLAB // IEEE Int. Conf. Robot. Autom. Conf. – 2004. – P. 284-289.
19. Trenev I., Tkachenko A., Kustov A. Movement stabilization of the parrot mambo quadcopter along a given trajectory based on PID controllers // 20th IFAC Conference on Technology, Culture, and International Stability TECIS. – 2021. – Vol. 54. I.13. – P. 227-232.
20. Tkachenko A.A., Trenev I.S., Yurchenkov A.V. Stabilization problem a quadrotor using a linear-quadratic regulator: modelling and practice // 20th IFAC Conference on Technology, Culture, and International Stability TECIS. – 2021. – Vol. 54. I.13. – P. 449-453.

## REFERENCES

1. Duren P.L. Theory of Hp Spaces. Academic Press, 1970 261 p.
2. Geir E. Dullerud, Fernando G. Paganini. A Course in Robust Control Theory: A Convex Approach. Academic Press, 2000 383 p.
3. Petersen I.R., Hollot C.V. A Riccati equation approach to the stabilization of uncertain linear systems, *Automatica*, 1986, Vol. 22, pp. 397-411.
4. Boyd S., El Ghaoui L., Feron E., Balakrishnan V. Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory. Philadelphia: SIAM, 1994, 205 p.
5. Scherer C., Gahinet P., Chilali M. Multiobjective output-feedback control via LMI optimization, *IEEE Trans. Automat. Control*, 1997, Vol. 42, No. 7, pp. 896-911.
6. Alamo T., Normey-Rico J.E., Arahal M., Limon D. and Camacho E. Introducing linear matrix inequalities in a control course, *IFAC Proceedings*, 2006, Vol. 39, pp. 205-210.
7. Feron E. Analysis of robust  $H_2$  performance using multiplier theory, *SIAM Journal of Control and Optimization*, 1997, Vol. 3, pp. 160-177.
8. Feron E., Balakrishnan V., Boyd S., and El Ghaoui L. Numerical methods for  $H_2$  related problems, *In Proc. American Control Conference*, 1992, pp. 2921-2922.
9. Gahinet P., Apkarian P. A Linear Matrix Inequality approach to  $H_\infty$  control, *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 1994, Vol. 4, pp. 421-448.
10. Doyle J.C., Glover K., Khargonekar P.P., Francis B.A. State-space solutions to standard  $H_2$  and  $H_\infty$  control problems, *IEEE Trans. Automat. Control*, 1989, Vol. 34, No. 8, pp. 831-847.
11. Khargonekar P.P., Rotea M.A. Mixed  $H_2/H_\infty$ -control: a convex optimization approach, *IEEE Trans. Automat. Control*, 1991, Vol. 36, No. 7, pp. 824-831.
12. Yeh H.H., Banda S.S. Necessary and sufficient conditions for mixed  $H_2$  and  $H_\infty$  optimal control, *Proceedings of 29 IEEE CDC, Hawaii, 1990*, pp. 1013-1017.
13. Scherer C. Mixed  $H_2/H_\infty$  control, *Trends in Control. A European Perspective*. A. Isidori, ed. Berlin: Springer-Verlag, 1995, pp. 173-216.
14. Коган М.М. Синтез оптимального и робастного управлений с  $H_2/H_\infty$ -критерием [Synthesis of optimal and robust controls with  $H_2/H_\infty$ -criterion], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and telemechanics], 2016, No. 8, pp. 3-23.
15. Sznajder M., Rotstein H., Bu J., Sideris A. An exact solution to continuous-time mixed  $H_2/H_\infty$  control problems, *IEEE Trans. Automat. Control*, 2000, Vol. 45, No. 11, pp. 2095-2101.
16. Bresciani T. Modelling, Identification and Control of a Quadrotor Helicopter. Czech Technical University in Prague. Master's Thesis. Prague. June 2011, 75 p.
17. Hoffmann G.M., Huang H., Waslander S.L., and Tomlin C.J. Quadrotor helicopter flight dynamics and control: Theory and experiment, *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, Aug. 2007*, pp. 401-406.

18. *Lofberg J.* YALMIP: A toolbox for modeling and optimization in MATLAB, *IEEE Int. Conf. Robot. Autom. Conf.*, 2004, pp. 284-289.
19. *Trenev I., Tkachenko A., Kustov A.* Movement stabilization of the parrot mambo quadcopter along a given trajectory based on PID controllers, *20th IFAC Conference on Technology, Culture, and International Stability TECIS*, 2021, Vol. 54. I.13, pp. 227-232.
20. *Tkachenko A.A., Trenev I.S., Yurchenkov A.V.* Stabilization problem a quadrotor using a linear-quadratic regulator: modelling and practice, *20th IFAC Conference on Technology, Culture, and International Stability TECIS*, 2021, Vol. 54. I.13, pp. 449-453.

Статью рекомендовал к опубликованию к.ф.-м.н. А.В. Юрченков.

**Тренёв Иван Сергеевич** – Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН; e-mail: trenev.99@mail.ru; г. Москва, Россия; тел.: +74953348910.

**Trenev Ivan Sergeevich** – V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences; e-mail: trenev.99@mail.ru; Moscow, Russia; phone: +74953348910.

## Раздел II. Системы управления и моделирования

УДК 007:52

DOI 10.18522/2311-3103-2022-1-110-120

**А.И. Савельев, В.В. Лебедева, И.В. Лебедев, К.В. Камынин, Л.Д. Кузнецов,  
А.Л. Ронжин**

### **УПРАВЛЕНИЕ ГРУППОЙ БПЛА ПРИ ОТРАБОТКЕ КРИЗИСНЫХ ПОЛЕТНЫХ СИТУАЦИЙ В РЕШЕНИИ ТРАНСПОРТНЫХ ЗАДАЧ\***

*В работе обоснована актуальность разработки алгоритмов управления группой БПЛА при возникновении кризисных ситуаций, влияющих на выполнение поставленной задачи по доставке грузов в труднодоступные места. Описан алгоритм автономного коллективного (децентрализованного) управления группой БПЛА при выполнении целевой задачи транспортировки грузов, а также комбинированного управления при возникновении кризисных ситуаций, когда режим автономного управления невозможно реализовать в полном объеме. Подробно описан алгоритм отработки кризисной ситуации при нехватке энергетического ресурса на борту БПЛА и возврате агентов группы на стартовую позицию. Представлены результаты моделирования движения группы БПЛА мультироторного и самолетного типов и отработки кризисной ситуации по управлению группой БПЛА на основе информации о запасах энергетических или топливных ресурсов. В ходе проведения экспериментов итеративно выполнялся расчет остатка топлива при движении БПЛА в точку посадки, а также количества топлива, доступного БПЛА в данный момент времени. В результате экспериментов было выявлено, что время расчета остатка энергетического ресурса не превышает 6,792 мс. В случае, если топливо заканчивается у лидера, миссия транспортировки груза завершается досрочно, поскольку не может быть выполнена без участия лидера. При выходе из строя нескольких ведомых миссия может быть продолжена в том случае, если их количество не превышает заданного значения, критичного для продолжения миссии доставки груза. Приведены результаты экспериментальных исследований моделированию полета БПЛА с грузом, в ходе которых выполнялось построение полетной маршрута, имитирующего криволинейную траекторию движения в городских условиях от точки старта до конечной точки, где происходит посадка БПЛА и передача груза. В экспериментах использовались разработанные БПЛА и бортовая система крепления термоконтейнера. При проведении летных испытаний средняя скорость горизонтального движения БПЛА была задана 10 м/с. Протяженность полета составляла 5350 м. Время, затраченное на полет, составило 13 мин. 51 с.*

*Групповое управление; БПЛА; автономного управления; транспортные задачи; полетный маршрут; робототехника; контроллеры; полезная нагрузка.*

**A.I. Savelyev, V.V. Lebedeva, I.V. Lebedev, K.V. Kamynin, L.D. Kuznetsov,  
A.L. Ronzhin**

### **UAV GROUP MANAGEMENT WHEN WORKING OUT OF CRISIS FLIGHT SITUATIONS IN SOLVING TRANSPORT PROBLEMS**

*The relevance of the development of algorithms for managing a group of UAVs in the event of crisis situations that affect the performance of the task is substantiated. An algorithm for autonomous collective (decentralized) control of a group of UAVs is described when performing the target task of transporting goods, as well as combined control in the event of crisis situations when the autonomous*

\* Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда: РНФ № 20-79-10325.

*control mode cannot be fully implemented. The algorithm for working out a crisis situation in case of a lack of energy resources on board the UAV and the return of group agents to the starting position is described in detail. The results of modeling the movement of a group of UAVs of multirotor and aircraft types and working out a crisis situation for managing a group of UAVs based on information about the reserves of energy or fuel resources are presented. During the experiment, iteratively calculated the remaining fuel when the UAV moved to the landing point, as well as the amount of fuel available to the UAV at a given time. As a result of the experiments, it was found that the time for calculating the balance of the energy resource does not exceed 6.792 ms. If the leader runs out of fuel, the cargo transportation mission ends ahead of schedule, since it cannot be completed without the participation of the leader. If several slaves fail, the mission can be continued if their number does not exceed a predetermined value, which is critical for the continuation of the cargo delivery mission. The results of experimental studies on modeling the flight of an UAV with a load are presented, during which a flight route was built that simulates a curvilinear trajectory of movement in urban conditions from the starting point to the end point, where the UAV is landing and transferring the cargo. In the experiments, the developed UAV and the onboard fastening system of the thermal container were used. During flight tests, the average horizontal speed of the UAV was set to 10 m/s. The length of the flight was 5350 m. The flight time was 13 minutes. 51 seconds.*

*Group control; UAV; autonomous control; transport tasks; flight route; robotics; controllers; payload.*

**Введение.** Управление группой БПЛА является перспективной задачей, так как её применение существенно повышает скорость выполнения полетного задания, при этом многие задачи упрощаются. Появляется возможность проведения мониторинга больших территорий за короткое время без упущения важных деталей, что очень вероятно при использовании одиночных БПЛА.

Под группой БПЛА понимается совокупность летательных аппаратов, которые обладают определенными правилами взаимодействия внутри группы. Такие аппараты способны выдерживать свое место в строю на прямолинейных и криволинейных участках полета всей группы в целом, реагировать на изменения окружающей среды и взаимодействовать друг с другом для решения единой целевой задачи, поставленной перед группой [1]. Часто в работах можно встретить методы управления формацией по принципу «лидер – ведомый» в различных вариациях [2], например, с использованием обмена информацией с бортовых датчиков для определения местоположения ведомой группы [3], а также использование виртуального лидера, который задаёт формацию для группы и отдаёт команды управления для её поддержания [4]. Также во многих случаях используется метод потенциальных полей для управления формацией при моделировании скоординированного управления группой БПЛА самолётного типа [5].

Разработанный в работе [6] распределенный скоординированный метод управления состоит из трех компонентов, а именно: согласованное движение по кругу на основе консенсуса (Consensus-based circling rendezvous), скоординированное управление по траектории для лидеров БПЛА в группах и скоординированное управление «лидер – ведомые» для ведомых БПЛА. В соответствии с согласованным движением по кругу на основе консенсуса БПЛА последовательно взлетают и готовятся к предстоящему созданию формации. Скоординированный подход к управлению с отслеживанием маршрута позволяет управлять лидерами БПЛА в каждой группе, а с помощью управления координацией «лидер – ведомые» позволяет лидеру направлять ведомые БПЛА по рассчитанному маршруту.

Правильно выбранные методы планирования, контроля и управления действиями группы БПЛА позволили бы наиболее эффективно использовать ресурсы (заряды аккумуляторов или запасы топлива, временные ресурсы, аппаратные вычислительные ресурсы БПЛА и навесное оборудование) и оперативно распределять поступающие в режиме реального времени новые транспортные задачи между отдельными аппаратами группы непосредственно в процессе выполнения заданий [7–9].

Полет группы БПЛА в фиксированном строю позволяет решить множество гражданских и военных задач. При выполнении полётных заданий в реальных условиях группа БПЛА должна реагировать на возникающие различные препятствия и кризисные ситуации [10, 11]. Целью исследования является повышение надежности управления группой БПЛА в кризисных ситуациях. Далее рассмотрим задачу движения группы БПЛА с иерархией «лидер-ведомые» в фиксированной формации на двумерной плоскости, так как движение БПЛА осуществляется на фиксированной высоте.

**Описание алгоритма движения группы БПЛА при возникновении кризисных ситуаций.** Для решения задачи движения группы БПЛА с иерархией «лидер-ведомые» в фиксированной формации на двумерной плоскости при движении БПЛА на фиксированной высоте разработана гибридная система управления группой, содержащая две подсистемы: программный модуль назначения ключевых точек глобальной траектории, строящий глобальную траекторию для лидера группы, и программный модуль координации поведения самоорганизующейся группы БПЛА, рассчитывающий траектории движения ведомой группы, таким образом, что все участники группы повторяют курс движения лидера с поправкой на собственную траекторию, а взаимное расположение корректируют посредством обмена данными между собой.

Для управления группой БПЛА в симуляции реализована стратегия «лидер-ведомый». В этом случае важно обеспечить путь без столкновений с препятствиями для лидера, а траектории ведомых определяются относительно позиции лидера.

В решении задачи управления группой БПЛА предложен вариант, когда лидер и направляемая им группа после взлёта и до конца совершения миссии по доставке груза функционируют на высоте, которая не изменяется с течением времени, поэтому примем условие, что БПЛА движутся в двумерной плоскости. Состояние  $i$ -го БПЛА (и лидера и ведомого) можно описать как:

$$[x_i, y_i, \theta_i]^T,$$

где  $x$  и  $y$  – координаты на плоскости  $O_{xy}$   $i$ -го БПЛА в инерциальной системе координат;  $\theta_i$  – курсовой угол  $i$ -го БПЛА. Соответственно, такой БПЛА будет двигаться по следующему закону движения:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v_i \cos \theta_i \\ \dot{y}_i = v_i \sin \theta_i, \\ \dot{\theta}_i = \omega_i \end{cases}$$

где  $v_i$  – поступательная скорость  $i$ -го БПЛА;  $\omega_i$  – угловая скорость  $i$ -го БПЛА. БПЛА подчиняются ограничениям на входные управляющие сигналы:

$$0 < v_{min} \leq v_i \leq v_{max},$$

где  $v_{max}$  – максимальная скорость движения БПЛА;  $v_{min}$  – минимальная скорость движения БПЛА.

Полетная миссия движения группы до целевого района описывается последовательностью путевых точек. Начиная со своего текущего местоположения, лидер БПЛА должен последовательно перемещаться к каждой путевой точке в своем списке.

На рис. 1 представлена схема задачи следования БПЛА по заданному пути. Точка  $p_i$  – проекция лидера БПЛА на направленный путь  $\Gamma_i$ . Точка  $P_i$  – текущее местоположение лидера БПЛА. Угол  $\psi_i$  – соответствует углу рыскания данного БПЛА. Согласно предложенному в работе решению задачи движения БПЛА вдоль запланированной траектории посредством полетного контроллера ошибка следования по траектории лидера БПЛА стремится к нулю.

При проведении летного эксперимента при построении фиксированных формаций целесообразно применять вертикальное эшелонирование БПЛА самолетного типа для исключения эффекта попадания в спутный след впереди идущего БПЛА.

В связи с тем, что группа БПЛА, выполняющая задание, является открытой системой, взаимодействующей со стохастической средой с возмущениями, возможно возникновение незапланированных и кризисных ситуаций [12–16]. В общем случае под кризисными ситуациями понимаются случаи, когда режим автономного управления невозможно реализовать в полном объеме. Выявление невозможности выполнения задания на этапе первичного планирования и целеполагания, например, в связи с отсутствием достаточных энергетических ресурсов, не является кризисной ситуацией.

С точки зрения выполнимости задачи можно разделить кризисные ситуации на две группы:

- 1) не имеющие прямого влияния на выполнение поставленной задачи:
  - ◆ истощение топливного и/или энергетического ресурса БПЛА, что делает невозможным его возвращение на точку завершения операции;
  - ◆ выход из строя навигационных и/или коммуникационных устройств, когда БПЛА не могут отправлять/получать команды от других БПЛА;
- 2) имеющие влияние на выполнимость поставленной задачи в целом или её части:
  - ◆ потеря лидера БПЛА в группе, что делает невозможной автономную координацию данной группы БПЛА;
  - ◆ потеря связи БПЛА с наземным пунктом управления.

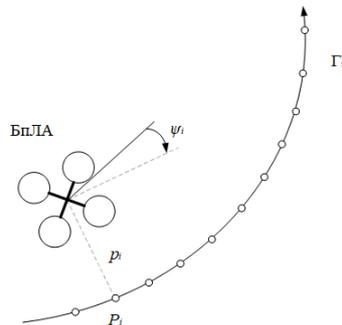


Рис. 1. Описание задачи следования БПЛА по пути

При этом в зависимости от обстановки ситуации из первой группы могут привести к невыполнимости поставленной задачи в полностью автономном режиме. В случае возникновения кризисной ситуации по радиоканалу наземному пункту передается информация об источнике кризисной ситуации и ожидается ответ оператора. На рис. 2 приведена общая схема алгоритма обработки кризисной ситуации при управлении БПЛА. В случае, если ответ оператора не получен за заданное время, то продолжается автономная (децентрализованная) обработка кризисного сценария – перепланирование задания с проверкой выполнимости. В случае невозможности выполнения поставленной задачи БПЛА прекращают выполнение задания и возвращаются на точку завершения миссии.

Оператор наземного пункта управления, в случае получения статуса возникновения кризисной ситуации может, используя радиоканал, перейти к отмене возврата БПЛА на точку завершения миссии и перейти в централизованный (ручной) режим управления БПЛА с использованием радиоканала.

На рис. 3 представлен алгоритм разрешения кризисной ситуации по управлению группой БпЛА на основе информации о запасах энергетических или топливных ресурсов.



Рис. 2. Схема отработки кризисной ситуации

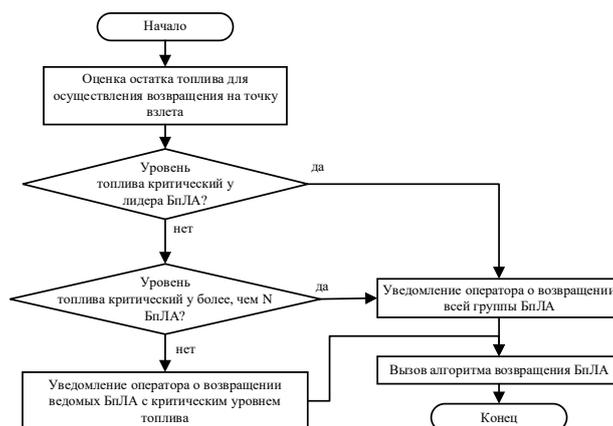


Рис. 3. Алгоритм разрешения кризисной ситуации по управлению группой БпЛА на основе информации о запасах энергетических или топливных ресурсов

В начале работы алгоритма на основании оставшегося количества топлива БпЛА и его траектории прогнозируется количество топлива, которое останется после возвращения БпЛА на точку посадки.

Если остаток топлива у БпЛА лидера группы ниже того уровня, который определен оператором в параметрах миссии, то оператор уведомляется о том, что лидер и ведомые возвращаются. То же самое происходит при превышении критического уровня остатка топлива у  $N$  ведомых. Число  $N$  задается в параметрах миссии до ее начала. Если менее, чем у  $N$  ведомых спрогнозированный остаток топлива ниже критического значения, то происходит уведомление оператора о возвращении  $N$  ведомых. Если ни одно из условий выше не выполнилось, то считается, что кризисной ситуации по энергетическим или топливным ресурсам не наступило.

Для возвращения группы БПЛА используется алгоритм, описанный на рис. 4, который обеспечивает построение траекторий до точки доставки груза, точки посадки в автономном режиме и уведомление оператора о необходимости перехода в ручной режим.

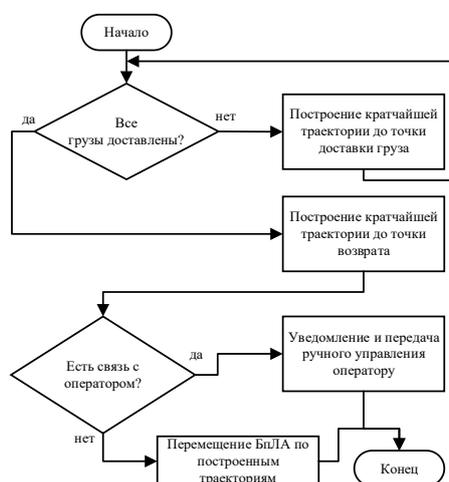


Рис. 4. Алгоритм возврата БПЛА

При возникновении кризисных ситуаций, и если по каким-либо причинам ситуация не была стабилизирована, группа БПЛА также завершает свою работу согласно данному алгоритму возврата БПЛА (рис. 4), который строит наикратчайшую траекторию движения в зависимости от наличия доставляемого груза.

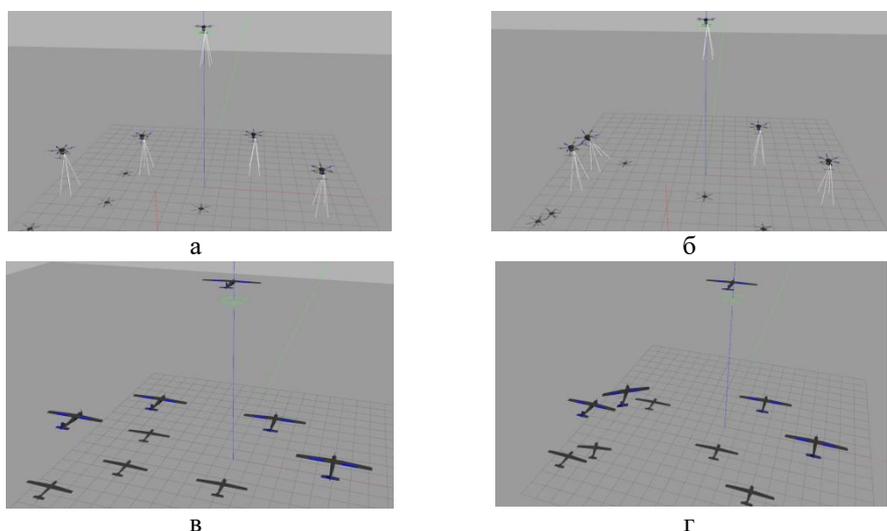
**Результаты экспериментов.** Для апробации предложенных алгоритмов было проведено моделирование движения группы БПЛА мультироторного и самолетного типов и отработки кризисной ситуации по управлению группой БПЛА на основе информации о запасах энергетических или топливных ресурсов [17–18]. Моделирование группового полета по предложенной стратегии и алгоритмам отработки кризисной ситуации проводилась в среде для моделирования Gazebo. Результаты моделирование представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты моделирование группового движение и кризисной ситуации**

№ эксперимента	Входные параметры		Оцениваемые параметры			
	Количество ведомых БПЛА, у которых закончилось топливо, шт	Наличие топлива у лидера группы (есть/нет)	Количество столкновений, шт	Средний остаток топлива у возвращающихся БПЛА, %	Миссия завершена досрочно? (Да, Нет)	Время расчета, мс
БПЛА мультироторного типа						
1	1	Нет	0	9,67	Нет	1,278
2	7	Нет	0	9,80	Нет	1,954
3	13	Нет	2	13,61	Да	1,803
4	0	Да	0	19,45	Да	5,260
БПЛА самолетного типа						
5	1	Нет	0	9,98	Нет	2,136
6	7	Нет	2	9,92	Нет	6,792
7	13	Нет	4	13,81	Да	0,880
8	0	Да	0	19,29	Да	3,411

Симуляция в Gazebo производилась со моделями БПЛА мультироторного типа и БПЛА с фиксированным крылом (рис. 5).



*Рис. 5. Примеры столкновения пары БПЛА при возврате на точку взлета в условиях кризисной ситуации по топливу: а – мультироторные БПЛА в формации «клин» до столкновения, б – мультироторные БПЛА в формации «клин» в момент столкновения, в – БПЛА самолетного типа в формации «клин» до столкновения, г – БПЛА самолетного типа в формации «клин» в момент столкновения*

Для проведения экспериментов по отработке кризисных ситуаций за расстояние между лидером и точкой посадки было взято 1178 метров. В качестве граничного значения остатка топлива было взято 10 %. В момент запуска эксперимента количество топлива у БПЛА, которые должны переместиться к точке посадки, равнялось 10 %, а у БПЛА, значение уровня топлива которых не было близко к граничному, равнялось 20 %. В ходе проведения эксперимента итеративно выполнялся расчет остатка топлива при движении БПЛА в точку посадки, а также количества топлива, доступного БПЛА в данный момент времени.

В ходе проведения экспериментов было выявлено, что время расчета не превышает 6,792 мс. В случае, если топливо заканчивается у лидера, миссия транспортировки груза завершается досрочно, поскольку не может быть выполнена без участия лидера. При выходе из строя нескольких ведомых миссия может быть продолжена в том случае, если их количество не превышает заданного значения, критичного для продолжения миссии доставки груза.

Также моделирование показало, что при работе группы БПЛА на одной высоте возможны коллизии при возвращении БПЛА на точку посадки в кризисной ситуации, что ведет к дополнительным потерям в группе, связанными со столкновениями с другими БПЛА [19–22]. Решение данной ситуации может быть обеспечено за счет набора или понижения высоты в момент возникновения кризисной ситуации. Такое решение позволит безопасно покинуть формацию и осуществить возврат БПЛА. Другой ситуацией, которая ведет к полной потере единицы БПЛА, попавшего в кризисную ситуацию, является столкновение с препятствием [23]. Для её разрешения в момент возникновения кризисной ситуации необходимо построить траекторию возвращения, которая учитывает текущее местоположение БПЛА и препятствия или переместить БПЛА на высоту, которая обеспечит его движение без возникновения столкновений со статическими объектами.

Для проверки предложенного алгоритма движения лидера группы был разработан беспилотный летательный аппарат с бортовой системой крепления и фиксации термоконтейнера для перевозки различных компонентов, показанный на рис. 6.



Рис. 6. Беспилотный летательный аппарат с зафиксированным контейнером

На данном этапе исследования экспериментально апробировались все этапы подготовки и полета БПЛА с грузом, включая построение полетной миссии, имитирующей криволинейную траекторию движения в городских условиях от точки старта до конечной точки, где происходит посадка БПЛА и передача груза, а также сам полет. В табл. 2 приведены основные условия и результаты эксперимента.

На рис. 7,а показана траектория полета БПЛА, заданная в планировщике полетных миссий, а на рис. 7,б реальная траектория, взятые из бортового журнала БПЛА. При проведении испытаний средняя скорость горизонтального движения БПЛА составила 10 м/с. Протяженность полета составляла 5350 м. Время, затраченное на полет, составило 13 мин. 51 с.

Таблица 2

**Параметры и результаты экспериментов**

Масса полезной нагрузки (кг)	8кг
Длина пройденного пути (м)	5350м
Высота полета (м)	35м
Расчетное время полета	11мин 29с
Реальное время полета	13мин 51с
Заданная горизонтальная скорость (м/с)	10м/с
Масса полезной нагрузки (кг)	8кг
Длина пройденного пути (м)	5350м

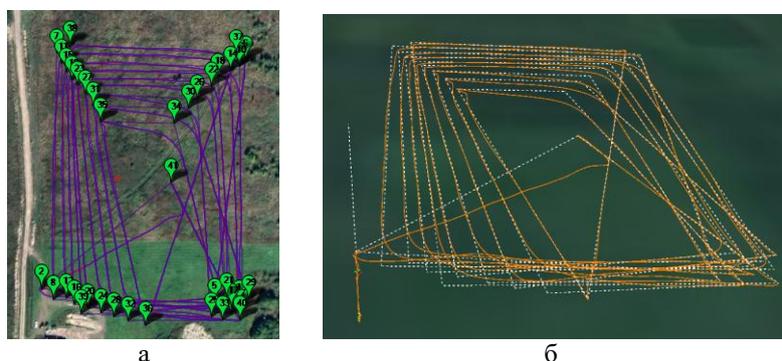


Рис. 7. Траектории полета БПЛА: а – расчетные; б – реальные

**Заключение.** Разработанный алгоритм управления полетом в кризисных ситуациях, возникающих в полете, позволяет определить степень автономности управления в текущих условиях. Разработанное программно-аппаратное обеспечение БПЛА апробировано для решения транспортных задач. Проведенные эксперименты подтверждают надежную работу БПЛА при перемещении в условиях, приближенных к городским. Дальнейшие исследования будут посвящены детальной проработке децентрализованного управления БПЛА при доставке грузов и решению других гражданских задач.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баранов Н.А. Оптимизация параметров строя группы ЛА по условиям безопасности при преодолении ПВО // Полет. – 2007. – №. 9. – С. 21-25.
2. 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.
3. Park C. et al. Formation flight of multiple uavs via onboard sensor information sharing // Sensors. – 2015. – Vol. 15, No. 7. – P. 17397-17419.
4. Zhang M., Liu H.H.T. Formation flight of multiple fixed-wing unmanned aerial vehicles // 2013 American Control Conference. – IEEE, 2013. – P. 1614-1619.
5. Nagao Y., Uchiyama K. Formation flight of fixed-wing UAVs using artificial potential field // 29th Congress of the International Council of the Aerospace Sciences. – 2014.
6. Wang X., Shen L., Liu Z., Zhao S., Cong Y., Li, Z., Wang Y. Coordinated flight control of miniature fixed-wing UAV swarms: methods and experiments // In: Science China Information Sciences. – 2019. – Vol. 62 (11). – P. 1-17.
7. Шапкина К.М., Девитт Д.В. Система группового управления бпла для решения задачи построения и удержания формаций в полете // Modern Science. – 2021. – №. 6-2. – С. 402-406.
8. Vinokursky D.L. et al. Model predictive control for path planning of UAV group // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2021. – Vol. 1155, No. 1. – P. 012092.
9. Muslimov T.Z., Munasypov R. A. Consensus-based cooperative control of parallel fixed-wing UAV formations via adaptive backstepping // Aerospace science and technology. – 2021. – Vol. 109. – P. 106416.
10. Campion M., Ranganathan P., Faruque S. UAV swarm communication and control architectures: a review // Journal of Unmanned Vehicle Systems. – 2018. – Vol. 7, No. 2. – P. 93-106.
11. Luna M.A. et al. A New Algorithm Using Hybrid UAV Swarm Control System for Fire-fighting Dynamical Task Allocation // 2021 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). – IEEE, 2021. – P. 655-660.
12. Mehalleque N., Djellab M., Loukhaoukha K. Efficient Use of UAVs for Public Safety in Disaster and Crisis Management // Wireless Personal Communications. – 2021. – Vol. 116, No. 1. – P. 369-380.
13. Calabrò A., Giuliano R. Integrated Wi-Fi and LoRa network on UAVs for localizing people during SAR operations // 2021 AEIT International Conference on Electrical and Electronic Technologies for Automotive (AEIT AUTOMOTIVE). – IEEE, 2021. – P. 1-6.
14. Croce V., Diamantidis D., Šykora M. Seismic damage evaluation and decisions on interventions supported by UAV-based surveys // International Conference on Protection of Historical Constructions. – Springer, Cham, 2021. – P. 206-221.
15. Boubeta-Puig J. et al. An autonomous UAV architecture for remote sensing and intelligent decision-making // IEEE Internet Computing. – 2018. – Vol. 22, No. 3. – P. 6-15.
16. Шальнев И.О. Объектно-ориентированный подход к описанию взаимодействия группы робототехнических средств на основе распределенной виртуальной машины // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – №. 1 (218). – С. 125-137.
17. Izhboldina V., Lebedev I. Method for inspecting high-voltage power lines using UAV, based on the RRT algorithm Electromechanics and Robotics. – 2021. – DOI: 10.1007/978-981-16-2814-6\_16.
18. Lebedev I., Lebedeva V. Analysis of «Leader – Followers» Algorithms in Problem of Trajectory Planning for a Group of Multi-rotor UAVs. Lecture Notes in Networks and Systems // Software Engineering Application in Informatics. – 2021. – Vol. 232. – P. 870-884. – DOI: 10.1007/978-3-030-90318-3\_68. – DOI: 10.1007/978-3-030-90318-3\_68.

19. Titkov I.P., Karpunin A.A. Collision-aware formation assignment of quadrotors // *Procedia Computer Science*. – 2021. – Vol. 186. – P. 727-735.
20. Vinokursky D.L. et al. Model predictive control for path planning of UAV group // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – IOP Publishing, 2021. – Vol. 1155, No. 1. – P. 012092.
21. Luo L. et al. GrpAvoid: Multigroup Collision-Avoidance Control and Optimization for UAV Swarm // *IEEE Transactions on Cybernetics*. – 2021.
22. Кутахов В.П., Мецзяков Р.В. Управление групповым поведением беспилотных летательных аппаратов: постановка задачи применения технологий искусственного интеллекта // *Проблемы управления*. – 2022. – № 1. – С. 67-74.
23. Banerjee P., Gorospe G., Ancel E. 3D Representation of UAV-obstacle Collision Risk Under Off-nominal conditions // *2021 IEEE Aerospace Conference (50100)*. – IEEE, 2021. – P. 1-7.

#### REFERENCES

1. Baranov N.A. Optimizatsiya parametrov stroya gruppy LA po usloviyam bezopasnosti pri preodolenii PVO [Optimization of the parameters of the formation of an aircraft group according to safety conditions when overcoming air defense], *Polet* [Flight], 2007, No. 9, pp. 21-25.
2. 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.
3. Park C. et al. Formation flight of multiple uavs via onboard sensor information sharing, *Sensors*, 2015, Vol. 15, No. 7, pp. 17397-17419.
4. Zhang M., Liu H.H.T. Formation flight of multiple fixed-wing unmanned aerial vehicles, *2013 American Control Conference*. IEEE, 2013, pp. 1614-1619.
5. Nagao Y., Uchiyama K. Formation flight of fixed-wing UAVs using artificial potential field, *29th Congress of the International Council of the Aerospace Sciences*, 2014.
6. Wang X., Shen L., Liu Z., Zhao S., Cong Y., Li, Z., Wang Y. Coordinated flight control of miniature fixed-wing UAV swarms: methods and experiments, *In: Science China Information Sciences*, 2019, Vol. 62 (11), pp. 1-17.
7. Shashkina K.M., Devitt D.V. Sistema gruppovogo upravleniya bpla dlya resheniya zadachi postroeniya i uderzhaniya formatsiy v polete [UAV group control system for solving the problem of building and holding formations in flight], *Modern Science* [Modern Science], 2021, No. 6-2, pp. 402-406.
8. Vinokursky D.L. et al. Model predictive control for path planning of UAV group, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2021, Vol. 1155, No. 1, pp. 012092.
9. Muslimov T.Z., Munasypov R. A. Consensus-based cooperative control of parallel fixed-wing UAV formations via adaptive backstepping, *Aerospace science and technology*, 2021, Vol. 109, pp. 106416.
10. Campion M., Ranganathan P., Faruque S. UAV swarm communication and control architectures: a review, *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 2018, Vol. 7, No. 2, pp. 93-106.
11. Luna M.A. et al. A New Algorithm Using Hybrid UAV Swarm Control System for Fire-fighting Dynamical Task Allocation, *2021 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*. IEEE, 2021, pp. 655-660.
12. Mehallegue N., Djellab M., Loukhaoukha K. Efficient Use of UAVs for Public Safety in Disaster and Crisis Management, *Wireless Personal Communications*, 2021, Vol. 116, No. 1, pp. 369-380.
13. Calabrò A., Giuliano R. Integrated Wi-Fi and LoRa network on UAVs for localizing people during SAR operations, *2021 AEIT International Conference on Electrical and Electronic Technologies for Automotive (AEIT AUTOMOTIVE)*. IEEE, 2021, pp. 1-6.
14. Croce V., Diamantidis D., Sýkora M. Seismic damage evaluation and decisions on interventions supported by UAV-based surveys, *International Conference on Protection of Historical Constructions*. Springer, Cham, 2021, pp. 206-221.
15. Boubeta-Puig J. et al. An autonomous UAV architecture for remote sensing and intelligent decision-making, *IEEE Internet Computing*, 2018, Vol. 22, No. 3, pp. 6-15.
16. Shal'nev I.O. Ob"ektno-orientovanny podkhod k opisaniyu vzaimodeystviya gruppy robototekhnicheskikh sredstv na osnove raspredelennoy virtual'noy mashiny [An object-oriented approach to describing the interaction of a group of robotic tools based on a distributed virtual machine], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. 1 (218), pp. 125-137.

17. *Izhboldina V., Lebedev I.* Method for inspecting high-voltage power lines using UAV, based on the RRT algorithm *Electromechanics and Robotics*, 2021. DOI: 10.1007/978-981-16-2814-6\_16.
18. *Lebedev I., Lebedeva V.* Analysis of «Leader – Followers» Algorithms in Problem of Trajectory Planning for a Group of Multi-rotor UAVs. *Lecture Notes in Networks and Systems, Software Engineering Application in Informatics*, 2021, Vol. 232, pp. 870-884. DOI: 10.1007/978-3-030-90318-3\_68. – DOI: 10.1007/978-3-030-90318-3\_68.
19. *Titkov I.P., Karpunin A.A.* Collision-aware formation assignment of quadrotors, *Procedia Computer Science*, 2021, Vol. 186, pp. 727-735.
20. *Vinokursky D.L. et al.* Model predictive control for path planning of UAV group, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2021, Vol. 1155, No. 1, pp. 012092.
21. *Luo L. et al.* GrpAvoid: Multigroup Collision-Avoidance Control and Optimization for UAV Swarm, *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2021.
22. *Kutakhov V.P., Meshcheryakov R.V.* Upravlenie gruppovym povedeniem bespilotnykh letatel'nykh apparatov: postanovka zadachi primeneniya tekhnologiy iskusstvennogo intellekta [Management of group behavior of unmanned aerial vehicles: statement of the problem of application of artificial intelligence technologies], *Problemy upravleniya* [Problems of management], 2022, No. 1, pp. 67-74.
23. *Banerjee P., Gorospe G., Ancel E.* 3D Representation of UAV-obstacle Collision Risk Under Off-nominal conditions, *2021 IEEE Aerospace Conference (50100)*. IEEE, 2021, pp. 1-7.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Р.В. Мещеряков.

**Савельев Антон Игоревич** – Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук»; e-mail: saveliev@iias.spb.su; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79522496544; к.т.н.; с.н.с.; руководитель лаборатории автономных робототехнических систем.

**Лебедева Валерия Валентиновна** – e-mail: izhboldina.valeriia@gmail.com; тел.: +7931314940; лаборатория автономных робототехнических систем; м.н.с.

**Лебедев Игорь Владимирович** – e-mail: igorlevedev@gmail.com; тел.: +79313589135; лаборатория автономных робототехнических систем; м.н.с.

**Камынин Константин Викторович** – e-mail: konstvictorovich@mail.ru; тел.: +79213599876; лаборатория автономных робототехнических систем; программист.

**Кузнецов Лев Дмитриевич** – e-mail: levaku@yandex.ru; тел.: +7952 2316087; лаборатория автономных робототехнических систем; программист.

**Ронжин Андрей Леонидович** – e-mail: ronzhin@iias.spb.su; тел.: +78123283311; д.т.н.; профессор, директор.

**Savelyev Anton Igorevich** – St. Petersburg Institute of Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences; e-mail: saveliev@iias.spb.su; St. Petersburg, Russia; phone: +79522496544; cand. of eng.; senior researcher; laboratory of autonomous robotic systems; head of the laboratory.

**Lebedeva Valeria Valentinovna** – e-mail: izhboldina.valeriia@gmail.com; phone: +7931314940; laboratory of autonomous robotic systems; junior researcher.

**Lebedev Igor Vladimirovich** – e-mail: igorlevedev@gmail.com; phone +79313589135; laboratory of autonomous robotic systems; junior researcher.

**Kamynin Konstantin Viktorovich** – e-mail: konstvictorovich@mail.ru; phone: +79213599876; laboratory of autonomous robotic systems; software engineer.

**Kuznetsov Lev Dmitrievich** – e-mail: levaku@yandex.ru; phone: +79522316087; laboratory of autonomous robotic systems; software engineer.

**Ronzhin Andrey Leonidovich** – e-mail: ronzhin@iias.spb.su; phone: +78123283311; dr. of eng. sc.; professor, director.

**В.Х. Пшихопов, М.Ю. Медведев**

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО  
И ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО АЛГОРИТМОВ ДВИЖЕНИЯ СТРОЕМ БЛА  
МУЛЬТИКОПТЕРНОГО ТИПА\***

*Развитие робототехнических комплексов делает актуальным их групповое применение для решения различных задач. Эффективность выполнения задач обнаружения и определения координат объектов группой роботов существенно зависит от точности поддержания заданного строя. В этой связи практический интерес представляет задача определения алгоритмов планирования движения, обеспечивающих наибольшую точности поддержания заданного строя. Данная статья посвящена исследованию точности поддержания строя группой БЛА мультикоптерного типа с использованием централизованного алгоритма планирования движения и децентрализованного алгоритма. В централизованном алгоритме используется ведущий БЛА, который передает свои координаты ведомым БЛА. На основании полученных координат и заданной структуре строя ведомые БЛА планируют свое движение. В децентрализованной системе соседние БЛА группы передают свои координаты друг другу, на основании чего планируется движение отдельного БЛА. Точность исследуется в зависимости от погрешностей навигационной системы и частоты обновления данных о положении ведущего или соседних БЛА. Полагается, что БЛА группы в дискретные моменты времени определяют свои координаты, используя внешнюю навигационную систему. Централизованный и децентрализованный алгоритмы обрабатываются одинаковой системой управления движением. Алгоритмы исследуются в данной статье методами численного моделирования. В процессе моделирования учитываются модели кинематики, динамики и исполнительных механизмов, а также модели формирования погрешностей навигационной системы. Показано, что децентрализованный алгоритм группового планирования движения обеспечивает более высокую точность по сравнению с централизованным алгоритмом. Однако техническая реализация децентрализованного алгоритма более сложна с точки зрения организации системы групповой связи. В централизованной системе должна быть реализована передача данных от ведущего БЛА ведомым. В децентрализованной системе требуется реализовать сетевую связь.*

*Группа БЛА; формирование строя; централизованный алгоритм; децентрализованный алгоритм; групповое управление.*

**V.Kh. Pshikhopov, M.Yu. Medvedev**

**COMPARATIVE ANALYSIS OF CENTRALIZED AND DECENTRALIZED  
ALGORITHMS FOR THE MOVEMENT OF MULTICOPTER-TYPE UAVS**

*The development of robotics makes their group application relevant for solving various tasks. The effectiveness of performing the tasks of detecting and determining the coordinates of objects by a group of robots significantly depends on the accuracy of maintaining a given formation. In this regard, the task of determining motion planning algorithms that ensure the greatest accuracy of maintaining a given formation is of practical interest. This article is devoted to the study of the accuracy of maintaining the formation of a multicopter-type UAV group using a centralized motion planning algorithm and a decentralized algorithm. The centralized algorithm uses a master UAV, which transmits its coordinates to the slave UAVs. Based on the coordinates obtained and the given framework of the formation, the guided UAVs plan their movement. In a decentralized system, neighboring UAV groups transmit their coordinates to each other, on the basis of which the movement of a separate UAV is planned. The accuracy of the control system is investigated depending on the errors of the navigation system and the frequency of updating data on the position of the leading or neighboring UAVs. It is assumed that the group's UAVs determine their*

\* Работа при поддержке РНФ, проект № 22-29-00533.

*coordinates in discrete moments of time using an external navigation system. Centralized and decentralized algorithms are worked out by the same motion control system. The algorithms are investigated in this article by numerical modeling methods. In the process of simulation, models of kinematics, dynamics and actuators are taken into account, as well as models for the formation of errors in the navigation system. It is shown that the de-centralized algorithm of group motion planning provides higher accuracy compared to the centralized algorithm. However, the technical implementation of a decentralized algorithm is more complicated from the point of view of organizing a group communication system. In a centralized system, data transmission from the master UAV to the slave should be implemented. In a decentralized system, it is required to implement network communication.*

*UAVs group; formation control; centralized algorithm; decentralized algorithm; group control.*

**Введение.** Поддержание заданного строя актуально при решении задач движения колонной [1], слежения за целью [2], ретрансляции связи [3], поиска объектов [4], проведения георазведки [5]. Перспективной задачей является создание на базе группы БЛА многопозиционных радиолокационных или оптических систем [6–9]. Такие системы, обладая преимуществами многопозиционных систем, обеспечивают быстрое развертывание в заданном направлении и перемещение в требуемую область. Вместе с тем, в таких группах высокие требования предъявляются к системам управления и планирования движением. Если система навигации и управления обеспечивают высокую точность поддержания взаимного положения элементов группы в пространстве и синхронизированы между собой, что такая группа БЛА способна выполнять задачи радиолокации с высокой точностью. В этой связи в данной статье рассматриваются два подхода к пространственной координации – с выделением ведущего БЛА и с децентрализованной структурой.

В задаче создания многопозиционной радиолокационной системы на базе БЛА строй представляет собой линию, либо несколько линий, следующих друг за другом. В этой связи имеет смысл рассматривать метод виртуальных структур для формирования строя. При этом виртуальная структура может формироваться относительно ведущего БЛА [10–12] или децентрализованными методами [13–15]. При выделении ведущего БЛА его положение является точкой, относительно которой строится виртуальная структура. Ведущий БЛА передает свои координаты другим членам группы, которые рассчитывают собственные желаемые положения. При использовании децентрализованных методов каждый БЛА определяет координаты соседних БЛА и рассчитывает текущее желаемое положение.

В система с ведущим БЛА достаточно передавать только его координаты остальным членам группы. Это снижает требования к системе групповой связи. В режиме передачи данных работает только система связи ведущего БЛА. При большом расстоянии между отдельными БЛА группы может потребоваться ретрансляция координат ведущего БЛА. Также отметим, что в централизованной системе ведущий БЛА движется по заданной программе, не реагируя на текущее состояние остальных членов группы.

В централизованной систем задачей ведомых БЛА является слежение за точкой, положение которой определяется ведущим БЛА. В работе [1] рассмотрена задача слежения за роботом-лидером на основе оценок взаимного положения и ориентации, получаемых с помощью бортовой видеокамеры. Слежение за лидером осуществляется на основе уравнений кинематики материальной точки на плоскости [16]. Предложены алгоритмы слежения за лидером в системе координат робота-лидера и оценивания линейной и угловой скоростей робота-лидера. Алгоритм оценивания базируется на расширенном наблюдателе [17], обеспечивающем оценку скоростей и внешних возмущений. Алгоритм слежения базируется на методе линеаризации с обратной связью [18]. Предложен метод снижения ошибки слежения за лидером, учитывающий ограничения визуальной системы определения вза-

имного положения и ориентации. Однако использование уравнений кинематики материальной точки и упрощенных уравнений динамики ограничивает результаты статьи [1], особенно, при высоких требованиях к точности слежения за лидером, в трехмерных средах, а также в режимах маневрирования реальных роботов.

В статье [2] рассмотрена задача слежения за лидером группой роботов, движущихся заданным строем. При этом построение осуществляется за заданное конечное время, т.е. задача решается в терминальной постановке [19, 20]. За это время лидер должен оказаться в геометрическом центре группы. Все роботы группы описаны уравнениями кинематики материальной точки. При решении задачи делается предположение о том, что координаты и ориентации лидера группы известны только части ведомых роботов. Вместе с тем следует отметить, что задача решена без учета динамики движения.

В статье [21] также рассматривается задача движения за лидером на плоскости. Модель роботов представлена уравнениями кинематики и динамики материальной точки. Изучается проблема слежения за лидером в условиях, когда координаты и ориентация робота-лидера передаются через систему связи с ошибками. Предложен адаптивный динамический регулятор, использующий аппроксимирующую сеть радиальных базисных функций. Как в ранее рассмотренных статьях, основным недостатком является рассмотрение уравнений материальной точки, что не позволяет учесть ограничений, связанных с особенностями физической реализации роботов.

Также известны другие работы по групповому слежению за лидером, которые учитывают возможность не измерять ориентацию робота [22], обеспечивать устойчивость и робастность гладких траекторий движения [13, 23], ограничивать передачу информации о расстоянии между лидером и ведомыми [24]. Во всех указанных работах использованы уравнения кинематики материальной точки в двумерной среде, что не позволяет полноценно оценить возникающие в системе погрешности.

Аналогичная ситуация имеет место с методами децентрализованного управления. Так в работе [12] рассматриваются агенты, описываемые упрощенными уравнениями динамики материальной точки, для которых предлагается децентрализованный алгоритм, базирующийся на понятии виртуальных лидеров, которые рассчитываются каждым агентом в отдельности и являются его целевым положением.

В работе [14] представлены алгоритмы децентрализованной системы управления, в которых учитываются уравнения кинематики и динамики движения твердого тела. Указанные алгоритмы не предполагают выделение лидера или предварительно заданного строя. Роботы автоматически распределяются в заданной области и перестраиваются при обнаружении препятствий. Однако, используются сложные алгоритмы оптимизации, включая триангуляцию Делоне, минимаксную оптимизацию и нейронные сети.

В работе [15] рассмотрена группа роботов в 3-D пространстве, которые описаны уравнениями твердого тела. Группа автоматически распределяется в прямоугольной области, а затем движется, поддерживая взаимное положение и перестраиваясь при встрече с препятствиями. Для создания формации используется триангуляция Делоне. Обход препятствий осуществляется с использованием неустойчивых по расстоянию до препятствий режимов движения, основанных на использовании третьей теоремы Ляпунова [17, 25]. Это позволяет не использовать сложных в вычислительном плане нейронных сетей на борту робота.

В работе [26] рассмотрен метод децентрализованного управления движением группы однородных роботов при перемещении группы грузов. Роботы описаны уравнениями кинематики и упрощенной динамики материальной точки. Упрощения состоят в том, что существует преобразование, приводящее исходную систему

к линейному виду. Предлагаются алгоритмы группового управления, получаемые в результате решения уравнения Риккати [27]. В итоге роботы подразделяются на подгруппы, которые формируют строй, осуществляющий перемещение грузов.

Проведенный обзор позволяет сделать выводы о том, что при разработке систем группового управления используются достаточно простые модели движения, не учитывающие динамические особенности мобильных роботов. В данной статье проводится сравнительный анализ методов централизованного и децентрализованного управления группой БЛА при решении задачи движения строем. При этом учитываются погрешности навигационных систем и запаздывания в каналах связи.

**II. Математическая модель БЛА и формулировка задачи.** Рассматривается БЛА мультикоптерного, которые описываются уравнениями кинематики и динамики твердого тела и исполнительных механизмов [28–30]

$$\dot{y} = R(y)x, \quad (1)$$

$$\dot{x} = M^{-1}(K_\delta \delta + F_d), \quad (2)$$

$$T_\delta \dot{\delta} = K_u u - \delta, \quad (3)$$

где  $y$  – вектор линейных и угловых координат БЛА в неподвижной системе координат размерностью 6;  $x$  – вектор линейных и угловых скоростей в связанной системе координат размерностью 6;  $R(y)$  – матрица кинематики;  $\delta$  – вектор координат исполнительных механизмов;  $F_d$  – вектор прочих сил и моментов, действующих на БЛА;  $M$  – матрица инерционных параметров;  $u$  – вектор управлений;  $K_u$  – матрица связи управляющих воздействий и переменных состояния исполнительных механизмов БЛА;  $T_\delta$  – матрица постоянных времени исполнительных механизмов БЛА.

В случае, если угловое положение описывается углами Эйлера [29], то матрица кинематики  $R(y)$ , которая определяет связь между неподвижной и связанной системами координат, имеет вид:

$$R = \begin{bmatrix} A & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & A_\omega \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$0_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$A = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \vartheta & -\cos \psi \sin \vartheta \cos \gamma + \cos \psi \sin \vartheta \sin \gamma + \sin \psi \sin \gamma & \cos \psi \sin \vartheta \sin \gamma + \sin \psi \cos \gamma \\ \sin \vartheta & \cos \vartheta \cos \gamma & -\cos \vartheta \sin \gamma \\ -\sin \psi \cos \vartheta & \cos \psi \sin \gamma + \sin \psi \sin \vartheta \cos \gamma & \cos \psi \cos \gamma - \sin \psi \sin \vartheta \sin \gamma \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$A_\omega = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\cos \gamma}{\cos \vartheta} & -\frac{\sin \gamma}{\cos \vartheta} \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \\ 1 & -\tan \vartheta \cos \gamma & \tan \vartheta \sin \gamma \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Матрица инерционных параметров сбалансированного БЛА имеет вид

$$M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 & -my_T \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & my_T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & my_T & J_x & -J_{xy} & -J_{xz} \\ 0 & 0 & 0 & -J_{xy} & J_y & -J_{yz} \\ -my_T & 0 & 0 & -J_{xz} & -J_{yz} & J_z \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где  $m$  – масса БЛА;  $J_x, J_y, J_z, J_{xy}, J_{xz}, J_{yz}$  – моменты инерции относительно осей связанной системы координат БЛА;  $y_T$  – отклонение масс БЛА относительно начала координат связанной системы по оси ОУ.

Вектор сил и моментов  $F_d$ , действующих на БЛА, включает составляющие

$$F_d = F_g + F_J + F_h, \quad (9)$$

где  $F_g$  – вектор силы тяжести;  $F_J$  – вектор инерционных сил вращающегося БЛА;  $F_h$  – вектор аэродинамических сил и моментов.

Вектор силы тяжести определяется в неподвижной системе координат имеет компоненты  $[0, -mg, 0]^T$ . С помощью матрицы  $A$  (6) можно найти его компоненты в связанной системе координат  $K$

$$F_g = \begin{bmatrix} -\sin \vartheta \\ -\cos \vartheta \cos \gamma \\ \cos \vartheta \sin \gamma \\ y_T \cos \vartheta \sin \gamma \\ 0 \\ y_T \sin \vartheta \end{bmatrix} mg. \quad (10)$$

Вектор инерционных сил вращающегося БЛА равен

$$F_J = \begin{bmatrix} m(\omega_z V_y - \omega_y V_z) \\ m(\omega_x V_z - \omega_z V_x) \\ m(\omega_x V_y - \omega_y V_x) \\ (J_y - J_z)\omega_y \omega_z \\ (J_z - J_x)\omega_z \omega_x \\ (J_x - J_y)\omega_x \omega_y \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Вектор аэродинамических сил и моментов, действующих на БЛА, определяется выражением [31]

$$F_h = 0,5\rho V^2 \begin{bmatrix} Sc_x \\ Sc_y \\ Sc_z \\ Um_x \\ Um_y \\ Um_z \end{bmatrix}, \quad (12)$$

где  $S$  – характерная площадь БЛА;  $U$  – характерный объем БЛА;  $V$  – модуль вектора скорости движения БЛА относительно среды;  $c_x, c_y, c_z, m_x, m_y, m_z$  – аэродинамические коэффициенты.

Если углы атаки  $\alpha$  и скольжения  $\beta$  малы, то аэродинамические коэффициенты приближенно рассчитываются по следующим формулам [32]

$$c_x = c_{x0} + c_x^V V + c_x^\alpha \alpha^2 + c_x^\beta \beta^2, \quad (13)$$

$$c_y = c_{y0} + c_y^\alpha \alpha + c_y^{\alpha^2} \alpha |\alpha| + c_y^{\omega_z} \bar{\omega}_z, \quad (14)$$

$$c_z = c_z^\beta \beta + c_z^{\beta^2} \beta |\beta| + c_z^{\omega_y} \bar{\omega}_y, \quad (15)$$

$$m_x = m_x^\beta \beta + m_x^{\omega_x} \bar{\omega}_x, \quad (17)$$

$$m_y = m_y^\beta \beta + m_y^{\beta^2} \beta |\beta| + m_y^{\omega_y} \bar{\omega}_y, \quad (18)$$

$$m_z = m_{z0} + m_z^\alpha \alpha + m_z^{\alpha^2} \alpha |\alpha| + m_z^{\omega_z} \bar{\omega}_z, \quad (19)$$

где  $\bar{\omega}_x = \omega_x/V$ ;  $\bar{\omega}_y = \omega_y/V$ ;  $\bar{\omega}_z = \omega_z/V$ .

Матрица  $K_\delta$  зависит от типа БЛА. Для квадрокоптера, обладающего четырьмя винтами, вектор  $\delta$  координат исполнительных механизмов и указанная матрица определяются выражениями [33, 34]:

$$K_{\delta} = K_f \begin{bmatrix} k_v & k_v & k_v & k_v \\ k_v l_v \sin(\varphi_v) & k_v l_v \sin(\varphi_v) & -k_v l_v \sin(\varphi_v) & -k_v l_v \sin(\varphi_v) \\ -b_v & b_v & -b_v & b_v \\ k_v l_v \sin(\varphi_v) & -k_v l_v \sin(\varphi_v) & -k_v l_v \sin(\varphi_v) & k_v l_v \sin(\varphi_v) \end{bmatrix}, \quad (20)$$

$$\delta = \begin{bmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \end{bmatrix}, K_f = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (21)$$

где  $l_v$  – расстояние от начала системы координат, связанной с БЛА до пропеллеров;  $\varphi_v$  – угол, под которым размещены винты;  $k_v$ ,  $b_v$  – аэродинамические коэффициенты винтов,  $\omega_i$  – скорости вращения винтов.

Матрица постоянных времени двигателей является диагональной, т.к. винты БЛА работают независимо друг от друга, т.е.

$$T_{\delta} = \begin{bmatrix} T_{\delta 1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & T_{\delta 1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & T_{\delta 1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_{\delta 1} \end{bmatrix}. \quad (22)$$

Матрица коэффициентов передачи исполнительных механизмов также является диагональной в силу того, что винты БЛА работают независимо друг от друга:

$$K_u = \begin{bmatrix} k_{u1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{u2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{u3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{u4} \end{bmatrix}. \quad (23)$$

Структура модели навигационной системы представлена на рис. 1. Она включает в себя блок вычисления координат и модуль параметров навигационной системы.

Входными переменными модели навигационной системы являются: 1) точные значения курса  $\psi$ , угла крена  $\gamma$ , угла тангажа  $\vartheta$  и путевого угла  $\psi_p$  БЛА в неподвижной системе координат; 2) точные значения угловых скоростей  $\omega_x$ ,  $\omega_y$ ,  $\omega_z$  относительно осей связанной с БЛА системы координат; 3) точные значения угловых ускорений  $\dot{\omega}_x$ ,  $\dot{\omega}_y$ ,  $\dot{\omega}_z$  относительно осей связанной с БЛА системы координат; 4) точные значения координат  $x$ ,  $y$ , и  $z$  БЛА в неподвижной системе; точные значения линейных скоростей  $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$  БЛА в подвижной системе координат и скоростей  $\dot{x}$ ,  $\dot{y}$ ,  $\dot{z}$  БЛА в неподвижной системе координат; 5) точные значения линейных ускорений  $\dot{V}_x$ ,  $\dot{V}_y$ ,  $\dot{V}_z$  БЛА в связанной системе координат и линейных ускорений  $\ddot{x}$ ,  $\ddot{y}$ ,  $\ddot{z}$  в неподвижной системе координат; 6) признак наличия сигналов внешней навигационной системы ПСНС; 7) точное время  $t$ .

Выходными переменными модели навигационной системы являются: 1) измеренные значения курса  $\psi_n$ , угла крена  $\gamma_n$ , угла тангажа  $\vartheta_n$  и путевого угла  $\psi_{pn}$  БЛА в неподвижной системе координат; 2) измеренные значения угловых скоростей  $\omega_{xn}$ ,  $\omega_{yn}$ ,  $\omega_{zn}$  относительно осей связанной с БЛА системы координат; 3) измеренные значения угловых ускорений  $\dot{\omega}_{xn}$ ,  $\dot{\omega}_{yn}$ ,  $\dot{\omega}_{zn}$  относительно осей связанной с БЛА системы координат; 4) измеренные значения координат  $x_n$ ,  $y_n$ , и  $z_n$  БЛА в неподвижной системе; 5) измеренные значения линейных скоростей  $V_{xn}$ ,  $V_{yn}$ ,  $V_{zn}$  БЛА в связанной с ним подвижной системе координат и скоростей  $\dot{x}_n$ ,  $\dot{y}_n$ ,  $\dot{z}_n$  БЛА в неподвижной системе координат; 6) измеренные значения линейных ускорений  $\dot{V}_{xn}$ ,  $\dot{V}_{yn}$ ,  $\dot{V}_{zn}$  БЛА в связанной системе и линейных ускорений  $\ddot{x}_n$ ,  $\ddot{y}_n$ ,  $\ddot{z}_n$  в неподвижной системе координат; 7) время проведения текущего измерения координат  $t_n$ .

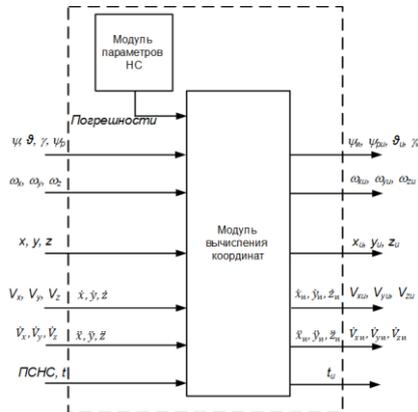


Рис. 1. Структура модели навигационной системы

Измеренные углы Эйлера  $\psi$ ,  $\gamma$ ,  $\vartheta$  и путевой угол  $\psi_p$  на выходе модуля вычисления координат определяются по следующим формулам:

$$\psi_{и} = \psi + E_{\psi 1} R_{\psi 1}(\tau_{\psi}) + R_{\psi 2}(t), \quad (24)$$

$$\vartheta_{и} = \vartheta + E_{\vartheta} R_{\vartheta 1}(\tau_{\vartheta}), \quad (25)$$

$$\gamma_{и} = \gamma + E_{\gamma} R_{\gamma 1}(\tau_{\gamma}), \quad (26)$$

$$\psi_{pи} = \psi_p + E_{\psi p 1} R_{\psi p 1}(\tau_{\psi p}) + R_{\psi p 2}(t), \quad (27)$$

где  $E_{\psi 1}$ ,  $E_{\vartheta}$ ,  $E_{\vartheta 1}$ ,  $E_{\psi p}$  – СКО погрешностей измерения навигационной системы;  $R_{\psi 1}$ ,  $R_{\vartheta 1}$ ,  $R_{\gamma 1}$ ,  $R_{\psi p 1}$  – функции генерации случайной помехи;  $R_{\psi 2}$ ,  $R_{\psi p 2}$  – функции генерации систематической погрешности при отсутствии сигналов внешней навигации;  $\tau_{\psi}$ ,  $\tau_{\vartheta}$ ,  $\tau_{\gamma}$ ,  $\tau_{\psi p}$  – параметры, определяющие время корреляции случайной составляющей измеряемых сигналов.

Значение константы  $E_{\psi}$  определяется погрешностью навигационной системы. Данная погрешность, в зависимости от класса используемой навигационной системы, может составлять от нескольких угловых минут до нескольких градусов.

Функция  $R_{\psi 1}(\tau_{\psi})$  моделируется как коррелированный случайный шум [35], полученный путем пропускания белого шума через инерционное звено первого порядка [36]. Уравнение, описывающее такой шум, имеет вид

$$\frac{d\xi_{\psi}}{dt} = -\tau_{\psi} (\xi_{\psi} - \zeta_{\psi}), \quad (28)$$

$$R_{\psi 1} = \xi_{\psi},$$

где  $\xi_{\psi}$  – переменная состояния инерционного звена первого порядка;  $\zeta_{\psi}$  – случайный сигнал типа белый шум.

Функция  $R_{\psi 2}$  генерирует нарастающую погрешность определения курса в соответствии с выражением:

$$R_{\psi 2}(t) = E_{\psi 2} t, i\Delta t \leq t < (i + 1)\Delta t, i = 0, 1, 2 \dots \quad (29)$$

где  $E_{\psi 2}$  – параметр, определяющий скорость нарастания погрешности,  $\Delta t$  – интервал коррекции навигационной системы от внешних сигналов.

Угол тангажа описывается уравнением (25), в котором отсутствует составляющая, нарастающая во времени. Функции  $R_{\vartheta 1}(\tau_{\vartheta})$  генерируется с помощью уравнения вида (28), отличия состоят только в другом значении времени корреляции  $\tau_{\vartheta}$  и СКО  $E_{\vartheta}$ . Аналогичным образом формируется модель измерения угла крена (26), для которой используется уравнение, аналогичное (28), с параметрами  $\tau_{\gamma}$  и  $E_{\gamma}$ :

Путевой угол определяется аналогично углу рысканья, с использованием параметров  $E_{\psi p1}$ ,  $\tau_{\psi p}$  и  $E_{\psi p2}$  в уравнениях (28), (29). Отметим, что путевой угол является суммой углов рысканья и скольжения [37].

Угловые скорости измеряются непосредственно датчиками угловых скоростей, основными погрешностями которых являются дрейф нуля и нестабильность коэффициента передачи [38]. Указанные погрешности моделируются с помощью следующих соотношений

$$\omega_{xi} = \omega_x + R_{\omega x}, \quad (30)$$

$$\omega_{yi} = \omega_y + R_{\omega y}, \quad (31)$$

$$\omega_{zi} = \omega_z + R_{\omega z}, \quad (32)$$

$$R_{\omega x2}(s) = \frac{1}{s} \xi_{\omega x2}, R_{\omega y2}(s) = \frac{1}{s} \xi_{\omega y2}, R_{\omega z2}(s) = \frac{1}{s} \xi_{\omega z2},$$

где  $\xi_{\omega x1}$ ,  $\xi_{\omega x2}$ ,  $\xi_{\omega y1}$ ,  $\xi_{\omega y2}$ ,  $\xi_{\omega z1}$ ,  $\xi_{\omega z2}$  – белые шумы.

Акселерометры измеряют так называемые кажущиеся ускорения. В этой связи показания акселерометров описываются следующими выражениями:

$$\dot{V}_{xi} = \dot{V}_x - g \sin \vartheta_i + R_{Vx}, \quad (33)$$

$$\dot{V}_{yi} = \dot{V}_y - g \cos \gamma_i \cos \vartheta_i + R_{Vy}, \quad (34)$$

$$\dot{V}_{zi} = \dot{V}_z + g \sin \gamma_i \cos \vartheta_i + R_{Vz}. \quad (35)$$

где  $R_{Vx}$ ,  $R_{Vy}$ ,  $R_{Vz}$  – случайные погрешности дрейфа нуля и неточностей коэффициентов передачи акселерометров и перекосов его осей.

Ускорения в неподвижной системе координат определяются расчетным путем на основе следующего выражения

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_{0i} \\ \ddot{y}_{0i} \\ \ddot{z}_{0i} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \dot{V}_{xi} \\ \dot{V}_{yi} \\ \dot{V}_{zi} \end{bmatrix}, \quad (36)$$

где матрица  $A$  определяется выражением (6).

Скорости БЛА в связанной системе координат вычисляются путем интегрирования ускорений в соответствии с выражениями

$$V_{xi} = V_{xi}(i\Delta t) + \int_{i\Delta t}^{(i+1)\Delta t} \dot{V}_{xi} d\tau, \quad i = 0, 1, 2 \dots \quad (37)$$

$$V_{yi} = V_{yi}(i\Delta t) + \int_{i\Delta t}^{(i+1)\Delta t} \dot{V}_{yi} d\tau, \quad (38)$$

$$V_{zi} = V_{zi}(i\Delta t) + \int_{i\Delta t}^{(i+1)\Delta t} \dot{V}_{zi} d\tau. \quad (39)$$

Скорости БЛА в неподвижной системе координат определяются в соответствии с выражением

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{0i} \\ \dot{y}_{0i} \\ \dot{z}_{0i} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} V_{xi} \\ V_{yi} \\ V_{zi} \end{bmatrix}, \quad (40)$$

где матрица  $A$ , как и ранее, вычисляется в соответствии с выражением (6).

Координаты БЛА определяются путем интегрирования скоростей, согласно выражениям:

$$x_{0i} = x_{0i}(i\Delta t) + \int_{i\Delta t}^{(i+1)\Delta t} \dot{x}_{0i} x_0, \quad (41)$$

$$y_{0i} = y_{0i}(i\Delta t) + \int_{i\Delta t}^{(i+1)\Delta t} \dot{y}_{0i} x_0, \quad (42)$$

$$z_{0i} = z_{0i}(i\Delta t) + \int_{i\Delta t}^{(i+1)\Delta t} \dot{z}_{0i} x_0. \quad (43)$$

Структура модели системы связи представлена на рис. 2.

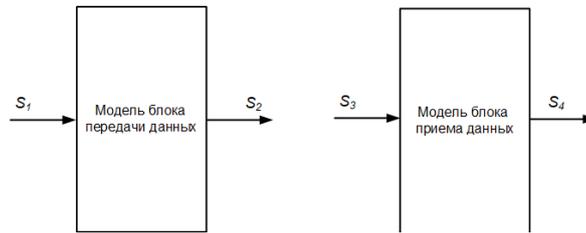


Рис. 2. Структура модели системы связи

Модель системы связи состоит из модели блока передачи данных и модели блока приема данных. На вход модели блока передачи данных поступает сообщение  $S_1$ , которое содержит следующую информацию: 1) полезное сообщение  $S_1$  и его размер  $D_1$  в килобайтах; 2) время появления сообщения  $t_1$ ; 3) текущие координаты БЛА, передающего сообщение.

Выходом модели блока передачи данных является сообщение  $S_2$ , которое содержит информацию: 1) сообщение  $S_2$  и его размер  $D_2$  в килобайтах; 2) время начала передачи сообщения  $t_{2н}$ ; 3) время окончания передачи сообщения  $t_{2к}$ ; 4) координаты передающего БЛА в момент начала передачи сообщения.

Сообщение  $S_2$  дублирует содержание сообщения  $S_1$  при моделировании. Размер  $D_2$  сообщения  $S_2$  вычисляется в соответствии с выражением

$$D_2 = K_s D_1, \quad (44)$$

где  $K_s$  – коэффициент, задающий степень увеличения размера передаваемого сообщения за счет служебной информации и кодирования. Принято  $K_s = 2$ .

Время начала передачи сообщения вычисляется в соответствии с выражением

$$t_{2н} = t_1 + \Delta t_1, \quad (45)$$

где  $\Delta t_1$  – время необходимое для подготовки к передаче данных.

Время окончания передачи сообщения  $t_{2к}$  определяется выражением

$$t_{2к} = t_{2н} + D_2/V_{пер}. \quad (46)$$

Входом блока приема данных является сообщение  $S_3$ , которое равно сообщению сообщения  $S_2$ , но время его приема вычисляется в соответствии с выражением

$$t_{3п} = t_{2к} + r/V_{пер}.$$

Ставится задача исследования точности поддержания строя группой из  $N_r$  БЛА при движении с постоянной скоростью в заданном направлении, в зависимости от точности навигационной системы, частоты получения данных о собственном положении  $i$ -го БЛА и частоты обновления данных о положении других БЛА группы, для следующих подходов поддержания строя: 1) централизованный подход, заключающийся на передаче координат лидера ведомым БЛА; 2) децентрализованный подход, использующий обмен координатами между соседними БЛА.

**III. Алгоритмы формирования строя.** Будем считать, что в начальный момент времени БЛА группы построены в линию на расстоянии гш. Рассмотрим вначале вариант движения с использованием лидера. Схема информационного обмена данными в такой группе представлена на рис. 3. Согласно этой схеме из пункта наземного управления поступает задание для БЛА-лидера. Задание включает в себя направление и скорость полета группы, а также требуемое расстояние, на котором БЛА должны находиться друг от друга.

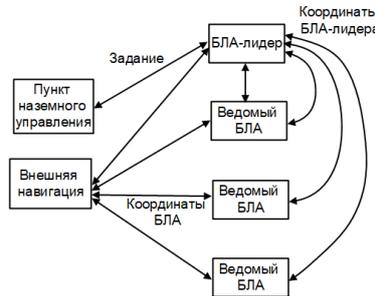


Рис. 3. Информационный обмен в системе с лидером

Определение собственных координат каждого БЛА определяется с помощью сигналов внешней навигационной системы. Кроме того, БЛА-лидер передает каждому ведомому БЛА свои координаты  $(x_1, y_1, z_1)$ , на основании которых каждый БЛА определяет свое желаемое положение в строю, используя выражения:

$$x_1^0 = V_0 t, x_i^0 = x_1, i = \overline{2, N_r}, \quad (47)$$

$$y_i^0 = y^0, i = \overline{1, N_r}, \quad (48)$$

$$z_i^0 = z_0 + (i - 1)r_{ш}, i = \overline{1, N_r}, \quad (49)$$

$$\psi_i = \psi^0, i = \overline{1, N_r}, \quad (50)$$

где  $z_0$  – заданное положение первого БЛА;  $\psi^0$  – заданное желаемое направление движения группы БЛА. При этом принято, что система координат привязана к положению лидера в начальный момент времени [39], а ось OX направлена вдоль желаемого движения группы.

Проекция желаемой скорости БЛА группы в связанной системе координат вычисляются в соответствии с выражением

$$V_i^0 = A^T V_0 p_{ni} / \|p_n\|, i=x,y,z, \quad (51)$$

где  $V_0$  – заданная скорость движения группы; матрица кинематики A определяется в соответствии с выражением (6), а направляющий вектор  $p_n$  и его элементы  $p_{ni}$  вычисляются по формуле

$$p_n = \begin{bmatrix} x_i^0 - x_i \\ y_i^0 - y_i \\ z_i^0 - z_i \end{bmatrix}. \quad (52)$$

Желаемый угол тангажа БЛА-лидера определяется выражением

$$\vartheta_i^0 = \begin{cases} k_\vartheta (V_{xi}^0 - V_{xi} - e_{dz}), \forall V_{xi}^0 - V_{xi} > e_{dz}, \\ k_\vartheta (V_{xi}^0 - V_{xi} + e_{dz}), \forall V_{xi}^0 - V_{xi} < -e_{dz}, \\ 0, -e_{dz} \leq V_{xi}^0 - V_{xi} \leq e_{dz}, \end{cases} \quad (53)$$

где  $e_{dz}$  – зона нечувствительности, вводимая для фильтрации высокочастотных измерительных шумов [40];  $V_{xi}$  – проекция скорости БЛА на ось OX связанной системы координат;  $k_\vartheta$  – параметр регулятора.

При этом угол тангажа дополнительно ограничен значениями  $\pm \vartheta^{max}$ .

Аналогичным образом, формируются требования к углу крена

$$\gamma_i^0 = \begin{cases} k_\gamma (V_{zi}^0 - V_{zi} - e_{dz}), \forall V_{zi}^0 - V_{zi} > e_{dz}, \\ k_\gamma (V_{zi}^0 - V_{zi} + e_{dz}), \forall V_{zi}^0 - V_{zi} < -e_{dz}, \\ 0, -e_{dz} \leq V_{zi}^0 - V_{zi} \leq e_{dz}, \end{cases} \quad (54)$$

где  $V_{zi}$  – проекция скорости БЛА на ось OZ связанной системы координат;  $\gamma_i^0$  – целевой угол крена;  $k_\gamma$  – параметр регулятора.

Угол крена, как и угол тангажа, дополнительно ограничен значениями  $\pm\gamma^{max}$ . Ограничения на углы крена и тангажа связаны с особенностями управления. При превышении указанными углами некоторых максимальных значений, БЛА мультикоптерного типа падает [41–43].

Желаемая скорость полета в установившемся режиме определяется проекцией скорости  $V_{yi}$ , которая равна

$$V_{yi} = V_y^0. \quad (55)$$

Рассмотрим теперь вариант движения с роевыми принципами формирования группы [44, 45]. Схема информационного обмена данными в такой группе представлена на рис. 4. Согласно этой схеме, из пункта наземного управления поступает задание всех БЛА. Задание включает в себя направление и скорость полета группы, а также требуемое расстояние, на котором БЛА должны находиться друг от друга.

Как и ранее, определение собственных координат каждого БЛА определяется с помощью сигналов внешней навигационной системы. Кроме того, все БЛА обмениваются своими координатами с соседними БЛА группы.

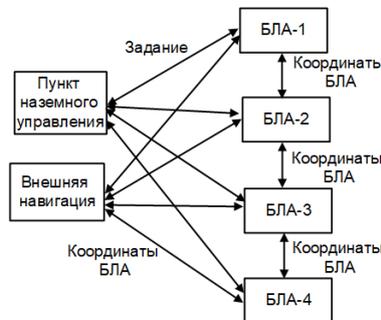


Рис. 4. Информационный обмен в роевой системе

Высота движения каждого БЛА для роевого принципа построения группы, как и для движения с лидером, задается выражением (48). Желаемое направление движения для всех БЛА группы вычисляется в соответствии с выражением (50).

Желаемая координата по оси OZ вычисляется в соответствии выражением

$$z_i^0 = z_{i-1} + r_{ш}, z_1^0 = 0, i = \overline{2, N_r}. \quad (56)$$

Желаемая координата по оси OX в случае роевого принципа формирования строя, определяется выражениями

$$x_1^0 = V_0 t + k_v(x_2 - x_1), \quad (57)$$

$$x_{N_r}^0 = V_0 t + k_v(x_{N_r-1} - x_{N_r}), \quad (58)$$

$$x_i^0 = V_0 t + k_v\left(\frac{x_{i-1} + x_{i+1}}{2} - x_i\right), \quad (59)$$

где  $i = \overline{2, N_r - 1}$ .

Желаемые углы дифферента, крена и рысканья вычисляются в соответствии с выражениями (53) и (54), а вектор желаемых скоростей БЛА определяется выражением (51). Таким образом, при роевом управлении строем, каждый БЛА вычисляет свое положение по оси OZ и оси OX относительно соседних БЛА, а не БЛА-лидера.

Система управления движением строится на базе метода позиционно-траекторного управления. Описание процедуры синтеза алгоритма управления движением БЛА, а также алгоритмы адаптации системы управления, представлены в работах [15, 28, 43]. Общий вид алгоритма управления имеет следующую форму

$$\begin{bmatrix} A_2 R \\ A_4 \end{bmatrix} M^{-1} (K_\delta \delta + F_d) = - \begin{bmatrix} A_2 \dot{R} + T_2 \dot{\Psi}_{tr} + T_1 \Psi_{tr} \\ T_3 \Psi_v \end{bmatrix}, \quad (60)$$

где  $T_1, T_2, T_3$  – матрицы регулятора;  $\dot{R}$  – матрица, элементы которых являются производными по времени элементов матрицы  $R$ ;

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, A_3 = \begin{bmatrix} -\psi^0 \\ -\vartheta_i^0 \\ -\gamma_i^0 \end{bmatrix}, \Psi_{tr} = A_2 y + A_3,$$

$$A_4 = [0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0], A_5 = [-V_0], \Psi_v = A_4 y + A_5.$$

**IV. Результаты исследования алгоритмов формирования строя.** Сравнение алгоритма управления с лидером и роевого алгоритма проведено с использованием численного моделирования.

Моделирование проведено при следующих параметрах БЛА и системы управления: начальные положения БЛА (0; 100; 0) – лидер, (0; 100; 50), (0; 100; 100) и (0; 100; 150); желаемое направление полета  $\psi^0 = 0$ ; желаемая высота полета  $y^0 = 100$  м; расстояние между БЛА  $r_{ш} = 50$  м; желаемая скорость полета  $V_0 = 3$  м/с; параметры регуляторов углов крена и тангажа  $k_\gamma = 0.1, k_\vartheta = 0.1$ ; значения углов тангажа и крена ограничены значениями  $\pm 0,3$  рад; максимальная скорость полета БЛА 4 м/с; инерционные параметры БЛА  $m=5$  кг,  $J_x=5, J_y=0.1, J_z=5$ ; максимальная тяга винтов 100 Н. Постоянная времени замкнутой системы управления 2.0 с.

На рис. 5 представлены результаты моделирования движения группы из 4-х БЛА с лидером при интервале обновления навигационных сигналов 1 с и максимальной погрешностью навигации 6,0 м.

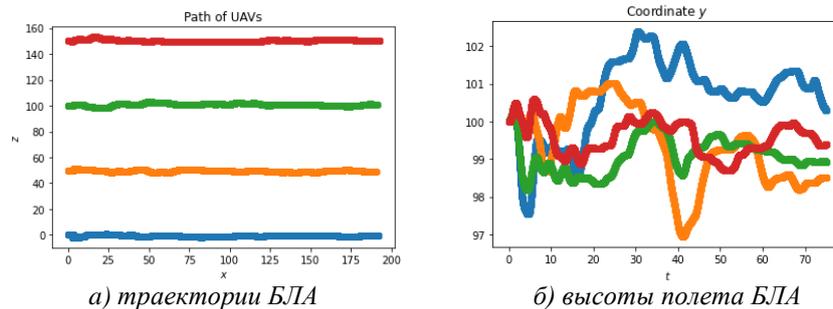


Рис. 5. Результаты моделирования группы БЛА с лидером

В табл. 1 представлены погрешности поддержания заданного строя группой БЛА с лидером при различных частотах обновления навигационных сигналов и различных погрешностях навигации.

Из табл. 1 следует, что с ростом погрешности навигационной системы растет и погрешность поддержания заданного положения в строю группой БЛА с лидером. При этом наибольшая точность обеспечивается по каналу управления высотой, т.к. она поддерживается независимо друг от друга. Наибольшая погрешность наблюдается в каналах управления по координатам  $Ox$  и  $Oz$ , что связано с необходимостью отслеживать группой положения лидера. При этом погрешность поддержания положения по оси  $Ox$  максимальна, т.к. необходимо отслеживать изменяющуюся координату. В качестве погрешности навигационной системы выбрано средне-квадратичное отклонение [46], а в качестве погрешности системы управления – усредненное по реализациям значение от максимальных ошибок в процессе полета.

Таблица 1

**Зависимость погрешностей системы управления с лидером от точности и частоты обновления навигационных данных**

СКО НС, м		0,5	1,0	1,5	2,0
Ошибка по оси ОУ	$\Delta t_{\text{нав}}=0,1$ с	0,73	1,07	1,53	2,6
	$\Delta t_{\text{нав}}=0,2$ с	0,7	0,8	2,13	2,77
	$\Delta t_{\text{нав}}=0,5$ с	0,7	0,9	2,17	2,67
	$\Delta t_{\text{нав}}=1,0$ с	0,87	1,43	1,93	3,6
Ошибка по оси ОХ	$\Delta t_{\text{нав}}=0,1$ с	1,7	3,2	4,3	6,8
	$\Delta t_{\text{нав}}=0,2$ с	1,93	3,1	3,9	7,17
	$\Delta t_{\text{нав}}=0,5$ с	1,67	2,87	5,27	6,77
	$\Delta t_{\text{нав}}=1,0$ с	2,07	3,0	4,97	6,57
Ошибка по оси ОZ	$\Delta t_{\text{нав}}=0,1$ с	0,27	1,87	2,9	4,5
	$\Delta t_{\text{нав}}=0,2$ с	0,33	1,97	2,33	3,77
	$\Delta t_{\text{нав}}=0,5$ с	0,47	1,8	2,83	4,57
	$\Delta t_{\text{нав}}=1,0$ с	0,47	1,97	3,2	4,17

На основе данных табл. 1 можно отметить, что погрешность системы группового управления с лидером слабо зависит от интервала обновления навигационных данных до того момента, пока он не приблизится к постоянной времени замкнутой системы. После этого система управления резко теряет качество и устойчивость. Так, в моделируемом примере потеря устойчивости наблюдается при частоте обновления навигационных данных около 1,5 с, что примерно соответствует постоянной времени замкнутой системы, равной 2,0 с.

В табл. 2 представлены результаты моделирования роевой системы управления, в которой желаемые положения БЛА по осям ОХ и ОZ задаются выражениями (56)–(59).

Сравнивая данные, представленные в табл. 1 и 2 можно заметить, что наиболее существенное отличие роевой системы от системы группового управления с лидером – более высокая точность позиционирования относительно оси ОХ. В частности, для СКО навигационной системы 2,0 м, роевая система управления повышает точность позиционирования в среднем в 3,5 раза. Вместе с тем, погрешность позиционирования по высоте и по оси ОZ существенно не изменяется. Это связано с тем, что роевой принцип позиционирования применен именно для позиционирования по фронту (по оси ОХ).

Таблица 2

**Зависимость погрешностей роевой системы управления от точности и частоты обновления навигационных данных**

СКО НС, м		0,5	1,0	1,5	2,0
Ошибка по оси ОУ	$\Delta t_{\text{нав}}=0,1$ с	0,83	1,0	2,0	2,28
	$\Delta t_{\text{нав}}=0,2$ с	0,83	0,97	1,75	2,23
	$\Delta t_{\text{нав}}=0,5$ с	0,7	10,3	1,8	2,8
	$\Delta t_{\text{нав}}=1,0$ с	0,9	1,34	3,33	3,0
Ошибка по оси ОХ	$\Delta t_{\text{нав}}=0,1$ с	0,45	0,6	1,33	1,15
	$\Delta t_{\text{нав}}=0,2$ с	0,5	1,07	1,46	1,54
	$\Delta t_{\text{нав}}=0,5$ с	0,29	1,0	1,2	2,17
	$\Delta t_{\text{нав}}=1,0$ с	0,32	0,7	1,7	2,4
Ошибка по оси ОZ	$\Delta t_{\text{нав}}=0,1$ с	0,47	1,58	2,85	3,6
	$\Delta t_{\text{нав}}=0,2$ с	0,5	1,5	2,24	3,2
	$\Delta t_{\text{нав}}=0,5$ с	0,35	1,57	2,3	4,3
	$\Delta t_{\text{нав}}=1,0$ с	0,4	1,57	3,2	3,92

Можно отметить, что повышение точности поддержания строя требует более развитой системы связи или наличия на борту БЛА средств, позволяющий с достаточной точностью определять положения соседних БЛА группы. В случае группы с лидером, свои координаты остальным членам группы передает только лидер. В роевом методе БЛА передают свои координаты соседям. Совместная работа систем связи БЛА требует организации специальной сети связи [47], что в некоторых средах может создавать технические проблемы, например, под водой [48].

Отметим, что в данной работе не рассматриваются режимы значительных отклонений от желаемых положений. Это связано с тем, что в таких режимах требуется решать задачи планирования движения [49–52] и устранения коллизий.

**Заключение.** В данной статье проведено сравнение двух подходов к управлению движением группы БЛА при движении строем – управление с лидером и децентрализованное управление. Сравнение проведено по точности поддержания строя, которая имеет важное значение при выполнении ряда практических задач. Результаты моделирования показали, что система децентрализованного управления позволяет примерно в 3,5 раза уменьшить погрешность поддержания строя по сравнению с системой управления с лидером. Вместе с тем, реализация системы децентрализованного управления требует, чтобы соседние БЛА передавали друг другу информацию о своем местонахождении. В системе с лидером передачу своих координат группе осуществляет только лидер, а ведомые БЛА находятся в режиме молчания. Таким образом, в ситуации, когда имеется возможность организовать сеть связи, применение децентрализованного метода управления представляется более перспективным.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-29-00533, выполняемого в АО "Научно-конструкторское бюро робототехники и систем управления".

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Arteaga-Escamilla C.M., Castro-Linares R., Álvarez-Gallegos J.* Leader–follower formation with reduction of the off-tracking and velocity estimation under visibility constraints // *International Journal of Advanced Robotic Systems*. – 2021. – Vol. 18 (610).
2. *Sun F., Li H., Zhu W., Kurths J.* Fixed-time formation tracking for multiple nonholonomic wheeled mobile robots based on distributed observer // *Nonlinear Dynamics*. – 2021. – Vol. 106. – P. 3331-3349.
3. *Dong X., Yu B., Shi Z., Zhong Y.* Time-Varying Formation Control for Unmanned Aerial Vehicles: Theories and Applications // *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. – Vol. 23 (1). – P. 340-348.
4. *Pack D.J., DeLima P., Toussaint G.J., York G.* Cooperative control of UAVs for localization of intermittently emitting mobile targets // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*. – 2009. – Vol. 39 (4). – P. 959-970.
5. *Безрук Г.Г., Мартынова Л.А., Саенко И.Б.* Динамический метод поиска антропогенных объектов в морском дне с использованием автономных необитаемых подводных аппаратов // *Тр. СПИИРАН*. – 2018. – Т. 3 (58). – С. 203-226.
6. *Шенета А.П., Ненашев В.А.* Точностные характеристики определения координат объектов в двухпозиционной системе малогабаритных бортовых РЛС // *Информационно-управляющие системы*. – 2020. – Т. 2. – P. 31-36.
7. *Nenashev V.A., Shepeta A.P., Kryachko A.F.* Fusion Radar and Optical Information in MultiPosition on-Board Location Systems // *2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*. – 2020. – P. 1-5. – DOI: 10.1109/WECONF48837.2020.9131451.
8. *Nenashev V.A., Khanykov I.G.* Formation of Fused Images of the Land Surface from Radar and Optical Images in Spatially Distributed On-Board Operational Monitoring Systems // *Journal of Imaging*. – 2021. – Vol. 7 (251). – <https://doi.org/10.3390/jimaging7120251>.
9. *Ненашев В.А., Ханьков И.Г.* Формирование комплексного изображения земной поверхности на основе кластеризации пикселей локационных снимков в многопозиционной бортовой системе // *Информатика и автоматизация*. – 2021. – Т. 20, № 2. – С. 302-340.

10. Lewis M.A., Tan K.-H. High Precision Formation Control of Mobile Robots Using Virtual Structures // *Autonomous Robots*. – 1997. – No. 4. – P. 387-403.
11. Tan K.-H., Lewis M. Virtual Structures for High-Precision Cooperative Mobile Robotic Control // *Proc. of the IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems*. – 1996. – P. 132-139.
12. Морозова Н.С. Виртуальные формации и виртуальные лидеры в задаче о движении строем группы роботов // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10. Прикладная математика // Информатика. Процессы управления*. – 2015. – № 1. – С. 135-149.
13. Эндо Т., Маэда Р., Мацуно Ф. Анализ устойчивости роя гетерогенных роботов с ограниченным полем зрения // *Информатика и автоматизация*. – 2020. – Т. 19 (5). – С. 942-966.
14. Гайдук А.Р., Мартьянов О.В., Медведев М.Ю., Пшихопов В.Х., Хамдан Н., Фархунд А. Нейросетевая система управления группой роботов в неопределенной двумерной среде // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2020. – Т. 21 (8). – С. 470-479.
15. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю. Групповое управление движением мобильных роботов в неопределенной среде с использованием неустойчивых режимов // *Тр. СПИИРАН*. – 2018. – Вып. 60. – С. 39-63.
16. Medvedev M., Pshikhopov V., Gurenko B., Hamdan N. Path planning method for mobile robot with maneuver restrictions // *Proc. of the International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME) 7-8 October 2021, Mauritius*. 10.1109/ICECCME52200.2021.9591090.
17. Carlos A., Hebertt S., Jos'e A. Stability of Active Disturbance Rejection Control for Uncertain Systems: a Lyapunov Perspective // *International Journal of Robust Nonlinear Control*. – 2017. – Vol. 27. – P. 4541-4553. – DOI: 10.1002/rnc.3812.
18. Воронников В.И., Вохмянина А.В. Метод линеаризующей обратной связи в задаче управления по части переменных при неконтролируемых помехах // *Тр. СПИИРАН*. – 2018. – Вып. 6 (61). – С. 61-93.
19. Фельдбаум А.А. О распределении корней характеристического уравнения системы регулирования // *Автоматика и телемеханика*. – 1948. – № 4. – С. 253-279.
20. Finaev V.I., Medvedev M.Yu., Pshikhopov V.K., Pereverzev V.A., Soloviev V.V. Unmanned Powerboat Motion Terminal Control in an Environment with Moving Obstacles // *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. – 2021. – Vol. 22 (3). – P. 145-154. – <https://doi.org/10.17587/mau.22.145-154>.
21. Park B.-S., Yoo, S.-J. Adaptive Secure Control for Leader-Follower Formation of Nonholonomic Mobile Robots in the Presence of Uncertainty and Deception Attacks // *Mathematics*. – 2021. – Vol. 9. – <https://doi.org/10.3390/math9182190>.
22. Hirata-Acosta J., Pliego-Jiménez J., Cruz-Hernández C., Martínez-Clark R. Leader-Follower Formation Control of Wheeled Mobile Robots without Attitude Measurements // *Applied Sciences*. – 2021. – Vol. 11 (12), 5639. – <https://doi.org/10.3390/app11125639>.
23. Maghenem M., Loria A., Panteley E. Cascades-based leader-follower formation tracking and stabilization of multiple nonholonomic vehicles // *IEEE Transactions on Automatic Control*. – Vol. 65 (8). – P. 3639-3646.
24. Wang Z., Wang L., Zhang H., Chen Q., Liu J. Distributed regular polygon formation control and obstacle avoidance for non-holonomic wheeled mobile robots with directed communication topology // *IET Control Theory and Applications*. – 2020. – Vol. 14 (9). – P. 1113-1122.
25. Sun J., Chen J. A survey on Lyapunov-based methods for stability of linear time-delay systems // *Frontiers of Computer Science*. – 2017. – Vol. 11. – P. 555-567. – <https://doi.org/10.1007/s11704-016-6120-3>.
26. Hu J., Bhowmick P., Lanzon A. Group Coordinated Control of Networked Mobile Robots With Applications to Object Transportation // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. – 2021. – Vol. 70 (8). – P. 8269-8274. – DOI: 10.1109/TVT.2021.3093157.
27. Arnold W.F., Laub A.J. Generalized Eigenproblem Algorithms and Software for Algebraic Riccati Equations // *Proceedings of the IEEE*. – 1984. – Vol. 72 (12). – P. 1746-1754.
28. Pshikhopov V., Medvedev M. Multi-Loop Adaptive Control of Mobile Objects in Solving Trajectory Tracking Tasks // *Automation and Remote Control*. – 2020. – Vol. 81 (11). – P. 2078-2093. – <https://doi.org/10.1134/S0005117920110090>.
29. Stephen T. Thornton, Jerry B. Marion. *Classical Dynamics of Particles and Systems*. Brooks Cole. – 5th ed. – 2003. – 672 p. – ISBN-10: 0534408966.

30. *Пушхопов В.Х., Медведев М.Ю., Гайдук А.Р., Нейдорф Р.А., Беляев В.Е., Федоренко Р.В., Костюков В.А., Крухмалев В.А.* Система позиционно-траекторного управления роботизированной воздухоплавательной платформой: математическая модель // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2013. – № 6. – С. 14-21.
31. *Götten F., Finger D.F., Havermann M. et al.* Full configuration drag estimation of short-to-medium range fixed-wing UAVs and its impact on initial sizing optimization // CEAS Aeronautical Journal. – 2021. – Vol. 12. – P. 589-603. – <https://doi.org/10.1007/s13272-021-00522-w>.
32. *Milne-Thomson L.M.* Theoretical aerodynamics. – Courier Corporation, 2012.
33. *Li X., Qi G., Zhang L.* Time-varying formation dynamics modeling and constrained trajectory optimization of multi-quadrotor UAVs // Nonlinear Dynamics. – 2021. – Vol. 106. – P. 3265-3284. – <https://doi.org/10.1007/s11071-021-06788-3>.
34. *Medvedev M., Pshikhopov V.* Path Planning of Mobile Robot Group Based on Neural Networks // Lecture Notes in Artificial Intelligence. – 2020. – P. 51-62. – [https://doi.org/10.1007/978-3-030-55789-8\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-55789-8_5).
35. *Ren X.X., Yang G.H.* Noise covariance estimation for networked linear systems under random access protocol scheduling // Neurocomputing. – 2021. – Vol. 455 (30). – P. 68-77.
36. *Golnaraghi F., Kuo B.C.* Automatic Control Systems. – 9-th ed. – JOHN WILEY & SONS, 2010. – 944 p.
37. *Diebold F.* Elements of Forecasting (Fourth ed.). – Thomson/South-Western, 2007. – 366 p.
38. *El-Sheimy N., Hou H., Niu X.* Analysis and modeling of inertial sensors using Allan variance // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2008. – Vol. 57 (1). – P. 140-149.
39. *Consolini L., Morbidi F., Prattichizzo D., et al.* Leader-follower formation control of nonholonomic mobile robots with input constraints // Automatica. – 2008. – Vol. 44 (5). – P. 1343-1349.
40. *Cocetti M., Tarbouriech S., Zaccarian L.* High-Gain Dead-Zone Observers for Linear and Nonlinear Plants // IEEE Control Systems Letters. – 2019. – Vol. 3 (2). – P. 356-361. – DOI: 10.1109/LCSYS.2018.2880931.
41. *Liu Y., Chen C., Wu H. et al.* Structural stability analysis and optimization of the quadrotor unmanned aerial vehicles via the concept of Lyapunov exponents // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2018. – Vol. 94. – P. 3217-3227. – <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9311-z>.
42. *Ömürlü V.E., Büyüksahin U., Artar R. et al.* An experimental stationary quadrotor with variable DOF // Sadhana. – 2013. – Vol. 38. – P. 247–264. <https://doi.org/10.1007/s12046-013-0132-6>.
43. *Пушхопов В.Х., Медведев М.Ю., Гуренко Б.В.* Алгоритмы терминального управления подвижными объектами мультикоптерного типа // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2019. – Т. 20, № 1. – С. 44-51. – 10.17587/mau.20.44-51.
44. *Bayindir L.* A review of swarm robotics tasks // Neurocomputing. – 2016. – <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.05.116>.
45. *Shi Y.* Particle swarm optimization: Developments, applications and re- 23 sources // Evolutionary Computing, 2001 IEEE International Conference on. – 2001. – Vol. 1. – P. 81-86.
46. *Bruce P.C., Bruce A.G.* Practical Statistics for Data Scientists. – 1-st ed. O'Reilly Media, USA, 2016.
47. *Zhou P., Fang X., Fang Y., He R., Long Y. and Huang G.* Beam Management and Self-Healing for mmWave UAV Mesh Networks // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2019. – Vol. 68 (2). – P. 1718-1732. – DOI: 10.1109/TVT.2018.2890152.
48. *Li N., Cürüklü B., Bastos J., Sucasas V., Fernandez J.A.S., Rodriguez J.* A Probabilistic and Highly Efficient Topology Control Algorithm for Underwater Cooperating AUV Networks // Sensors. – 2017. – Vol. 17, 1022. – <https://doi.org/10.3390/s17051022>.
49. *Kostjukov V., Medvedev M., Pshikhopov V.* Method for Optimizing of Mobile Robot Trajectory in Repeller Sources Field // Informatics and Automation. – 2021. – Vol. 20 (3). – P. 690-726.
50. *Медведев М.Ю., Костюков В.А., Пушхопов В.Х.* Оптимизация движения мобильного робота на плоскости в поле конечного числа источников-репеллеров // Тр. СПИИРАН. – 2020. – Вып. 19 (1). – С. 43-78. – <https://doi.org/10.15622/10.15622/sp.2020.19.1.2>.
51. *Sánchez-Ibáñez J.R., Pérez-del-Pulgar C.J., García-Cerezo A.* Path Planning for Autonomous Mobile Robots: A Review // Sensors. – 2021. – Vol. 21. – P. 7898. – <https://doi.org/10.3390/s21237898>.
52. *Mac T.T., Copot C., Tran D.T., De Keyser R.* Heuristic approaches in robot path planning: A survey // Robotics and Autonomous Systems. – 2016. – Vol. 86. – P. 13-28.

## REFERENCES

1. *Arteaga-Escamilla C.M., Castro-Linares R., Álvarez-Gallegos J.* Leader–follower formation with reduction of the off-tracking and velocity estimation under visibility constraints, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2021, Vol. 18 (610).
2. *Sun F., Li H., Zhu W., Kurths J.* Fixed-time formation tracking for multiple nonholonomic wheeled mobile robots based on distributed observer, *Nonlinear Dynamics*, 2021, Vol. 106, pp. 3331-3349.
3. *Dong X., Yu B., Shi Z., Zhong Y.* Time-Varying Formation Control for Unmanned Aerial Vehicles: Theories and Applications, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 23 (1), pp. 340-348.
4. *Pack D.J., DeLima P., Toussaint G.J., York G.* Cooperative control of UAVs for localization of intermittently emitting mobile targets, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 2009, Vol. 39 (4), pp. 959-970.
5. *Bezruk G.G., Martynova L.A., Saenko I.B.* Dinamicheskiy metod poiska antropogennykh ob"ektov v morskoy vode s ispol'zovaniem avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov [Dynamic Method of Searching Anthropogenic Objects in Use of Seabed with Autonomous Underwater Vehicles], *Tr. SPIIRAN [SPIIRAS Proceedings]*, 2018, Vol. 3 (58), pp. 203-226.
6. *Shepeta A.P., Nenashev V.A.* Tochnostnye kharakteristiki opredeleniya koordinat ob"ektov v dvukhpozitsionnoy sisteme malogabaritnykh bortovykh RLS [Accuracy characteristics of object location in a two-position system of small onboard radars], *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy [Informatsionno-Upravlyayushchie Sistemy]*, 2020, Vol. 2, pp. 31-36.
7. *Nenashev V.A., Shepeta A.P., Kryachko A.F.* Fusion Radar and Optical Information in Multi-Position on-Board Location Systems, *2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, 2020, pp. 1-5. – DOI: 10.1109/WECONF48837.2020.9131451.
8. *Nenashev V.A., Khanykov I.G.* Formation of Fused Images of the Land Surface from Radar and Optical Images in Spatially Distributed On-Board Operational Monitoring Systems, *Journal of Imaging*, 2021, Vol. 7 (251). Available at: <https://doi.org/10.3390/jimaging7120251>.
9. *Nenashev V.A., Khanykov I.G.* Formirovanie kompleksnogo izobrazheniya zemnoy poverkhnosti na osnove klasterizatsii pikseley lokatsionnykh snimkov v mnogopozitsionnoy bortovoy sisteme [Formation of Fused Images of the Land Surface from Radar and Optical Images in Spatially Distributed On-Board Operational Monitoring Systems], *Informatika i avtomatizatsiya [Informatics and Automation]*, 2021, Vol. 20, No. 2, pp. 302-340.
10. *Lewis M.A., Tan K.-H.* High Precision Formation Control of Mobile Robots Using Virtual Structures, *Autonomous Robots*, 1997, No. 4, pp. 387-403.
11. *Tan K.-H., Lewis M.* Virtual Structures for High-Precision Cooperative Mobile Robotic Control, *Proc. of the IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 1996, pp. 132-139.
12. *Morozova N.S.* Virtual'nye formatsii i virtual'nye lidery v zadache o dvizhenii stroem gruppy robotov [Virtual formations and virtual leaders in the task of moving a group of robots in formation], *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 10. Prikladnaya matematika // Informatika. Protsessy upravleniya [Vestnik of Saint Petersburg University Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes]*, 2015, No. 1, pp. 135-149.
13. *Endo T., Maeda R., Matsuno F.* Analiz ustoychivosti roya geterogennykh robotov s ogranichennym polem zreniya [Stability Analysis of Swarm Heterogeneous Robots with Limited Field of View], *Informatika i avtomatizatsiya [Informatics and Automation]*, 2020, Vol. 19 (5), pp. 942-966.
14. *Gayduk A.R., Mart'yanov O.V., Medvedev M.Yu., Pshikhopov V.Kh., Khamdan N., Farkhud A.* Neyrosetevaya sistema upravleniya gruppy robotov v neopredelennoy dvumernoy srede [Neural network based control system for robots group operating in 2-d uncertain environment], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie [Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie]*, 2020, Vol. 21 (8), pp. 470-479.
15. *Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu.* Gruppovoe upravlenie dvizheniem mobil'nykh robotov v neopredelennoy srede s ispol'zovaniem neustoychivykh rezhimov [Group control of autonomous robots motion in uncertain environment via unstable modes], *Trudy SPIIRAN [SPIIRAS Proceedings]*, 2018, Issue 60, pp. 39-63.

16. Medvedev M., Pshikhopov V., Gurenko B., Hamdan N. Path planning method for mobile robot with maneuver restrictions, *Proc. of the International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME) 7-8 October 2021, Mauritius*. 10.1109/ICECCME52200.2021.9591090.
17. Carlos A., Hebertt S., Jos'e A. Stability of Active Disturbance Rejection Control for Uncertain Systems: a Lyapunov Perspective, *International Journal of Robust Nonlinear Control*, 2017, Vol. 27, pp. 4541-4553. DOI: 10.1002/rnc.3812.
18. Vorotnikov V.I., Vokhmyanina A.V. Metod linearizuyushchey obratnoy svyazi v zadache upravleniya po chasti peremennykh pri nekontroliruemyykh pomekhakh [Feedback Linearization Method for Problem of Control of a Part of Variables in Uncontrolled Disturbances], *Tr. SPIIRAN [SPIIRAS Proceedings]*, 2018, Issue 6 (61), pp. 61-93.
19. Fel'dbaum A.A. O raspredelenii korney kharakteristicheskogo uravneniya sistemy regulirovaniya [On the distribution of the roots of the characteristic equation of control systems], *Avtomatika i telemekhanika [Automation and Remote Control]*, 1948, No. 4, pp. 253-279.
20. Finaev V.I., Medvedev M.Yu., Pshikhopov V.K., Pereverzev V.A., Soloviev V.V. Unmanned Powerboat Motion Terminal Control in an Environment with Moving Obstacles, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, Vol. 22 (3), pp. 145-154. Available at: <https://doi.org/10.17587/mau.22.145-154>.
21. Park B.-S., Yoo, S.-J. Adaptive Secure Control for Leader-Follower Formation of Nonholonomic Mobile Robots in the Presence of Uncertainty and Deception Attacks, *Mathematics*, 2021, Vol. 9. Available at: <https://doi.org/10.3390/math9182190>.
22. Hirata-Acosta J., Pliego-Jiménez J., Cruz-Hernández C., Martínez-Clark R. Leader-Follower Formation Control of Wheeled Mobile Robots without Attitude Measurements, *Applied Sciences*, 2021, Vol. 11 (12), 5639. – <https://doi.org/10.3390/app11125639>.
23. Maghenem M., Loria A., Panteley E. Cascades-based leader-follower formation tracking and stabilization of multiple nonholonomic vehicles, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 65 (8), pp. 3639-3646.
24. Wang Z., Wang L., Zhang H., Chen Q., Liu J. Distributed regular polygon formation control and obstacle avoidance for non-holonomic wheeled mobile robots with directed communication topology, *IET Control Theory and Applications*, 2020, Vol. 14 (9), pp. 1113-1122.
25. Sun J., Chen J. A survey on Lyapunov-based methods for stability of linear time-delay systems, *Frontiers of Computer Science*, 2017, Vol. 11, pp. 555-567. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11704-016-6120-3>.
26. Hu J., Bhowmick P., Lanzon A. Group Coordinated Control of Networked Mobile Robots With Applications to Object Transportation, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, Vol. 70 (8), pp. 8269-8274. DOI: 10.1109/TVT.2021.3093157.
27. Arnold W.F., Laub A.J. Generalized Eigenproblem Algorithms and Software for Algebraic Riccati Equations, *Proceedings of the IEEE*, 1984, Vol. 72 (12), pp. 1746-1754.
28. Pshikhopov, V., Medvedev, M. Multi-Loop Adaptive Control of Mobile Objects in Solving Trajectory Tracking Tasks, *Automation and Remote Control*, 2020, Vol. 81 (11), pp. 2078-2093. – <https://doi.org/10.1134/S0005117920110090>.
29. Stephen T. Thornton, Jerry B. Marion. *Classical Dynamics of Particles and Systems*. Brooks Cole. 5th ed., 2003, 672 p. ISBN-10: 0534408966.
30. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gayduk A.R., Neydorf R.A., Belyaev V.E., Fedorenko R.V., Kostyukov V.A., Krukhmalev V.A. Sistema pozitsionno-traektornogo upravleniya robotizirovannoy vozdukhoplavatel'noy platformoy: matematicheskaya model' [Positional trajectory control system of a robotic aeronautical platform: mathematical model], *Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravlenie [Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie]*, 2013, No. 6, pp. 14-21.
31. Götten F., Finger D.F., Havermann M. et al. Full configuration drag estimation of short-to-medium range fixed-wing UAVs and its impact on initial sizing optimization, *CEAS Aeronautical Journal*, 2021, Vol. 12, pp. 589-603. Available at: <https://doi.org/10.1007/s13272-021-00522-w>.
32. Milne-Thomson L.M. *Theoretical aerodynamics*. Courier Corporation, 2012.
33. Li X., Qi G., Zhang L. Time-varying formation dynamics modeling and constrained trajectory optimization of multi-quadrotor UAVs, *Nonlinear Dynamics*, 2021, Vol. 106, pp. 3265-3284. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11071-021-06788-3>.
34. Medvedev M., Pshikhopov V. Path Planning of Mobile Robot Group Based on Neural Networks, *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, 2020, pp. 51-62. Available at: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-55789-8\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-55789-8_5).

35. Ren X.X., Yang G.H. Noise covariance estimation for networked linear systems under random access protocol scheduling, *Neurocomputing*, 2021, Vol. 455 (30), pp. 68-77.
36. Golnaraghi F., Kuo B.C. Automatic Control Systems. 9-th ed. JOHN WILEY & SONS, 2010, 944 p.
37. Diebold F. Elements of Forecasting (Fourth ed.). Thomson/South-Western, 2007, 366 p.
38. El-Sheimy N., Hou H., Niu X. Analysis and modeling of inertial sensors using Allan variance, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2008, Vol. 57 (1), pp. 140-149.
39. Consolini L., Morbidi F., Prattichizzo D., et al. Leader-follower formation control of nonholonomic mobile robots with input constraints, *Automatica*, 2008, Vol. 44 (5), pp. 1343-1349.
40. Cocetti M., Tarbouriech S., Zaccarian L. High-Gain Dead-Zone Observers for Linear and Nonlinear Plants, *IEEE Control Systems Letters*, 2019, Vol. 3 (2), pp. 356-361. DOI: 10.1109/LCSYS.2018.2880931.
41. Liu Y., Chen C., Wu H. et al. Structural stability analysis and optimization of the quadrotor unmanned aerial vehicles via the concept of Lyapunov exponents, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, Vol. 94, pp. 3217-3227. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9311-z>.
42. Ömürlü V.E., Büyüksahin U., Artar R. et al. An experimental stationary quadrotor with variable DOF, *Sadhana*, 2013, Vol. 38, pp. 247-264. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12046-013-0132-6>.
43. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gurenko B.V. Algoritmy terminal'nogo upravleniya podvizhnymi ob"ektami mul'tikopternogo tipa [Algorithms for terminal control of moving objects of multicopter type], *Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravlenie [Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie]*, 2019, Vol. 20, No. 1, pp. 44-51. 10.17587/mau.20.44-51.
44. Bayindir L. A review of swarm robotics tasks, *Neurocomputing*, 2016. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.05.116>.
45. Shi Y. Particle swarm optimization: Developments, applications and re- 23 sources, *Evolutionary Computing, 2001 IEEE International Conference on*, 2001, Vol. 1, pp. 81-86.
46. Bruce P.C., Bruce A.G. Practical Statistics for Data Scientists. 1-st ed. O'Reilly Media. USA, 2016.
47. Zhou P., Fang X., Fang Y., He R., Long Y. and Huang G. Beam Management and Self-Healing for mmWave UAV Mesh Networks, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, Vol. 68 (2), pp. 1718-1732. DOI: 10.1109/TVT.2018.2890152.
48. Li N., Cürüklü B., Bastos J., Sucasas V., Fernandez J.A.S., Rodriguez J. A Probabilistic and Highly Efficient Topology Control Algorithm for Underwater Cooperating AUV Networks, *Sensors*, 2017, Vol. 17, 1022. Available at: <https://doi.org/10.3390/s17051022>.
49. Kostjukov V., Medvedev M., Pshikhopov V. Method for Optimizing of Mobile Robot Trajectory in Repeller Sources Field, *Informatics and Automation*, 2021, Vol. 20 (3), pp. 690-726.
50. Medvedev M.Yu., Kostjukov V.A., Pshikhopov V.Kh. Optimizatsiya dvizheniya mobil'nogo robota na ploskosti v pole konechnogo chisla istochnikov-repellerov [Optimization of mobile robot movement on a plane with finite number of repeller sources], *Tr. SPIIRAN [SPIIRAS Proceedings]*, 2020, Issue 19 (1), pp. 43-78. Available at: <https://doi.org/10.15622/sp.2020.19.1.2>.
51. Sánchez-Ibáñez J.R., Pérez-del-Pulgar C.J., García-Cerezo A. Path Planning for Autonomous Mobile Robots: A Review, *Sensors*, 2021, Vol. 21, pp. 7898. Available at: <https://doi.org/10.3390/s21237898>.
52. Mac T.T., Copot C., Tran D.T., De Keyser R. Heuristic approaches in robot path planning: A survey, *Robotics and Autonomous Systems*, 2016, Vol. 86, pp. 13-28.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.Г. Капустян.

**Медведев Михаил Юрьевич** – НИИ робототехники и процессов управления Южного федерального университета; e-mail: medvmihal@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371694; д.т.н.; в.н.с.

**Пшихопов Вячеслав Хасанович** – e-mail: pshichop@rambler.ru; д.т.н.; профессор; директор.

**Medvedev Mikhail Yurjevich** – R&D Institute of Robotics and Control Systems; e-mail: medvmihal@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: 88634371694; dr. of eng. sc.; leading researcher.

**Pshikhopov Viacheslav Khasanovich** – e-mail: pshichop@rambler.ru; dr. of eng. sc.; professor; director.

**А.А. Медельцев, П.А. Шаповалов, М.В. Воронов, А.И. Полухина,  
П.Н. Сигалева, А.В. Фролов**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА ВНУТРИ  
ГЕРМЕТИЧНОГО КОРПУСА БИНС В МУЛЬТИФИЗИЧНОЙ  
ПОСТАНОВКЕ В ANSYS CFX И SYSTEM COUPLING**

*В настоящей работе рассматривается численное моделирование нестационарного конвективно-кондуктивного теплообмена бесплатформенной инерциальной навигационной системы высокоманевренного летательного аппарата (БИНС ВЛА), разработанной в АО «ЦНИИАГ», с использованием расчётного комплекса ANSYS. Целью исследования является всесторонний анализ теплообменных процессов, характерных для функционирования прибора, в том числе взаимного пространственного влияния источников тепловых мощностей друг на друга, а также на блок чувствительных элементов. Моделирование теплообмена внутри герметичного корпуса прибора проведено для критических условий функционирования (в рассматриваемом случае обусловлены нагревом элементов прибора) в сильно и слабо сопряжённых постановках с последующим сравнением результатов применения обоих подходов. Для программной реализации каждого подхода были выбраны модули пакета прикладных программ ANSYS: Mechanical, CFX, System Coupling. Выбрана k-ε модель турбулентности воздуха с неявным учётом эффекта в пограничных слоях и корректировкой диффузии в сдвиговых течениях. Учтён внешний естественный теплообмен с окружающим воздухом посредством задания конвективных граничных условий на внешние поверхности прибора. Для получения численных значений коэффициентов теплоотдачи была принята во внимание ориентация каждой поверхности в пространстве благодаря использованию соответствующего коэффициента. С помощью расчёта термических сопротивлений были учтены потери мощности, возникающие ввиду наличия неровностей на поверхностях прибора в контактах между твердотельными компонентами с использованием термических сопротивлений фактического контакта и межконтактной прослойки. Графически представлены результаты моделирования деформированного состояния несущей системы прибора, возникающего вследствие действия несимметричного температурного поля в нагретом приборе. Проведён анализ полученных графиков. Определены показатели жёсткости несущей системы прибора – углы отклонения взаимной ортогональности чувствительных элементов, а именно акселерометров и датчиков угловой скорости (ВОГ – волоконно-оптических гироскопов), возникающие вследствие тепловых деформаций. Полученные результаты позволили оценить технические решения по качеству теплоотвода от элементов плат в обход чувствительных элементов прибора, принятых на этапе компоновки компонентов изделия.*

*Численное моделирование; метод конечных элементов; ANSYS; CFX; System Coupling; БИНС; естественная конвекция в герметичном объёме; сопряжённый теплообмен; охлаждение электронных компонентов.*

**A.A. Medel'tsev, P.A. Shapovalov, M.V. Voronov, A.I. Polukhina,  
P.N. Sigaleva, A.V. Frolov**

**MULTIPHYSICS SIMULATION IN ANSYS CFX AND SYSTEM COUPLING  
OF HEAT TRANSFER INSIDE HERMETIC CASE OF STRAPDOWN  
INERTIAL NAVIGATION SYSTEM**

*The article presents a numerical simulation of non-stationary convective-conductive heat transfer of the strapdown inertial navigation system (SINS), developed in the JSC «CNIAG». The numerical simulation is carried out in the ANSYS Mechanical. The aim of the study is a comprehensive analysis of heat exchange processes, which are characteristic to the device operation, including mutual spatial influence of thermal powers on each other, as well as on the block of sensitive elements. The simulation of heat transfer inside the hermetic case of the SINS is carried*

*out for critical operating conditions in a strongly and weakly coupled consideration with a comparison of both approaches. ANSYS Mechanical, CFX and System Coupling simulation modules are chosen for program implementation of each approach. The k-ε model of air turbulence with implicit consideration of the effect in the boundary layers and diffusion correction in shear flows is chosen for this approach. External heat exchange with ambient air is considered by setting convective boundary conditions on the external surfaces of the SINS, considering their orientation. To obtain numerical values of the heat transfer coefficients, the orientation of each surface in space is taken into account by using the appropriate coefficient. The presence of irregularities on the surfaces of the SINS in the contacts between solid components is considered by using the calculation of thermal resistances of the actual contact and intercontact layer. The simulation results of deformed state of SINS structural system, resulting from the action of a non-symmetric thermal field, is presented. The analysis of the obtained graphs is carried out. Stiffness indicators of the SINS structural system is defined as angles of deviation of sensitivity axes caused by thermal deformations. The obtained results make it possible to evaluate the engineering solutions for the quality of heat removal from the elements of the PCBs, bypassing the sensitive elements of the device, adopted at the stage of product layout.*

*Numerical simulation; finite-element method; ANSYS; CFX; Strapdown inertial navigation system (SINS); natural convection inside hermetic volume; conjugate heat transfer; cooling of electronic components, fluid-solid interaction.*

**Введение.** Современные конкурентоспособные бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС) для высокоманевренных летательных аппаратов (ВЛА) являются технически сложными приборами, разработка и модернизация которых предполагает, в частности, увеличение точности выходных параметров БИНС. БИНС ВЛА [1–3] в процессе функционирования испытывают комплекс внешних воздействующих факторов (ВВФ), приводящих к отклонениям взаимной ортогональности чувствительных элементов (ЧЭ) друг относительно друга [4, 5], что ведёт к снижению точности навигационного комплекса в целом.

Требования, предъявляемые к БИНС, необходимость учесть влияние комплекса ВВФ, а также предусмотреть решения, снижающие негативные воздействия внешних факторов, обуславливают использование комплексных оптимизационных методов проектирования конструкции и компоновки прибора в целом, основанных на имитационном моделировании процессов и откликов прибора на ВВФ; следование такому пути предполагает разработку сложных пространственных термомеханических численных моделей.

По оценкам, проведённым в работах [6, 7], один из наиболее существенных ВВФ с точки зрения влияния на отклонения осей чувствительности (ОЧ) – температурные деформации.

Настоящая работа посвящена разработке методики построения численных моделей нестационарного сложного теплообмена в приборе БИНС, определению на основе этих моделей температурных полей и отклонений углов ОЧ под влиянием асимметричных температурных распределений в приборе. Возможен термодинамический расчёт с использованием методов численного моделирования, в основе которых лежит решение дифференциальных уравнений течения жидкости и газа в конечно-объёмной модели газовой среды и теплопроводности в узлах конечно-элементной модели твердотельных объектов. Он позволяет учесть основные ВВФ и выявить нужные отклики.

В открытых источниках мало задач, посвящённых исследованию сложного теплообмена в герметичных объёмах со множеством независимых источников тепловыделений. Это делает настоящую работу актуальной в части компьютерного моделирования указанных процессов.

Подготовка и решение рассматриваемой задачи являются трудоёмкими вследствие наличия большого количества элементов внутри прибора, сложной геометрии и мультифизичности процесса. В определённых зонах можно наблю-

дать как турбулентный режим течения воздуха, так и ламинарный. Распределение температурных полей становится неравномерным из-за различных значений рассеиваемых мощностей, исходящих от элементов, а также перемешивания воздушных масс с различными температурами с течением времени. Для задания корректных граничных условий необходимо построить геометрию жидкостной и твердотельной зоны.

Были рассмотрены два подхода к исследованию процесса естественной конвекции в герметичном объёме с помощью численного моделирования: методом конечных объёмов (сильно сопряжённая постановка) и сочетанием методов конечных объёмов и конечных элементов (слабо сопряжённая постановка); оба подхода позволили добиться адекватных результатов, сокращения затрат на исследование и производство опытных экземпляров и уменьшения времени разработки навигационной системы в целом.

Газодинамический подход реализован в модуле ANSYS CFX. Его достоинствами являются высокая гибкость настроек, точность и возможность расширенной визуализации результатов. К недостаткам можно отнести трудоёмкость постановки задачи на нестационарный расчёт, высокие требования к ресурсоёмкости рабочей станции.

Второй подход, Fluid-Solid Interaction (FSI), подразумевает моделирование теплообмена в твёрдых телах (ANSYS Mechanical, модуль Transient Thermal) и отдельное моделирование течения (CFX), омывающего исследуемые твёрдые тела среды. Передача значений параметров теплообмена на сопряжённых поверхностях производится с помощью модуля System Coupling.

Результаты моделирования посредством обоих подходов для настоящей задачи близки. Преимущество такого разделения заключается в возможности подготовки модели в среде Mechanical для последующих расчётов напряжённо-деформированного состояния, имеющего значение на этапах оценки жёсткости и прочности в виде откликов на комплекс ВВФ. Так, цикл оптимального проектирования прибора требует включения в анализ расчётов, проводимых методами вычислительной газодинамики, лишь опционально. Кроме того, модуль System Coupling позволяет сопрягать нестационарную и стационарную постановки в рамках одной расчётной модели. Это актуально для данной работы вследствие низкой интенсивности процессов теплообмена внутри прибора.

Программная реализация моделей выполнена в трёхмерной постановке в программном модуле ANSYS CFX 2021R1 [8, 15] и CAE-комплексе Ansys Mechanical [9] с использованием модуля Transient Thermal и System Coupling 2021R1, а также Python3 [10]. Подготовка расчётной геометрической модели для расчёта проводилась в программе SolidWorks и модуле Ansys SpaceClaim 2021R1.

Особая часть работы по настройке нестационарных численных моделей связана с подготовкой начальных условий в виде рассеиваемых электронными компонентами тепловых мощностей. Данные получены в виде зависимостей рассеиваемых мощностей от времени экспериментально на базе исследований АО «ЦНИИАГ». Подробно-сти экспериментальных исследований лежат за рамками настоящей работы.

В модуле Ansys CFX естественная конвекция воздуха учитывалась следующими факторами: ускорение свободного падения, теплообмен между твердотельными телами и воздухом, вязкостный нагрев (влияние критерия Бринкмана) и свойство плавучести воздуха. Учитывался процесс теплообмена, напрямую зависящий от входных параметров, таких как коэффициент теплоотдачи (по соотношению Михеева), рассчитанный для каждой теплоотдающей поверхности на крышке и корпусе прибора.

Результатами численного моделирования для обоих подходов явились температурные поля внутри прибора, позволившие оценить технические решения по качеству теплоотвода от элементов плат в обход ЧЭ прибора, принятые на этапе компоновки компонентов изделия.

**Особенности задачи.** Общими для обоих подходов являются задача моделирования течения однофазной среды в герметичном корпусе прибора БИНС и моделирование процесса естественной конвекции методом конечных объёмов. Теплопередача между твердотельными элементами: деталями, узлами конструкции прибора, основными электронными компонентами моделировалась по-разному.

В части вычислительной газодинамики задача была рассмотрена для следующих условий: газ сжимаемый, течение турбулентное, рассматриваемое в присутствии теплообмена между газом и стенками корпуса, а также между твердотельными частями конструкции, рабочее вещество – идеальный газ.

В случае сложного температурного распределения при необходимости учесть зависимость температуры стенки от координат и от времени необходимо решать сопряжённую задачу теплообмена, то есть совместно решать уравнения распространения теплоты в воздухе и твёрдом теле и уравнения движения. На границе твёрдого тела и воздуха температуры и тепловые потоки считаются равными. Вследствие этого учитывается взаимное тепловое влияние воздуха и тела, что определяет зависимость теплообмена теплофизических, геометрических и прочих свойств тела.

Относительный перепад температуры является функцией локального значения безразмерного числа Брюна, описанного в [11] и являющегося критерием сопряженности задачи.

В задаче присутствуют как ламинарный, так и турбулентный режимы течения, разделить которые в части моделирования крайне затруднительно. Для обоих этих режимов были построены оценки числа Брюна, показавшие, что лишь в малой окрестности интенсивного теплообмена имеет место превышение числом Брюна критического значения. В дальнейшем рассмотрены оба описанных подхода.

**Объект исследования.** Объектом исследования в настоящей работе является БИНС для ВЛА, применяющийся в бортовых приборах с целью определения параметров движения ВЛА и непосредственно влияющий на их точность.

Как правило, БИНС строятся на базе следующих ЧЭ: акселерометров и датчиков угловой скорости, обладающих рядом погрешностей (смещением нулевых сигналов, отклонением масштабных коэффициентов и отклонением ОЧ от базового направления).

Основным достоинством БИНС является автономность функционирования, а недостатком – накапливающиеся с течением времени и в процессе совершения интенсивных манёвров ошибки, причинами возникновения которых являются как наличие инструментальных погрешностей ЧЭ БИНС, так и нестабильность несущей конструкции БИНС от времени, температурных (климатических, аэродинамических, внутренних – от электронных компонентов) и механических воздействий (перегрузки, вибрации, удары).

Исследования, проведенные в АО «ЦНИИАГ» в рамках многих НИОКР, показали, что на текущий момент наиболее эффективным способом существенного повышения точности БИНС ВЛА является обеспечение стабильно высокого значения жёсткости несущей системы, которая позволит уменьшить отклонение ЧЭ БИНС с соблюдением массогабаритных ограничений. Вопросам разработки оптимальных несущих систем БИНС были посвящены работы [5–7].

Рассматриваемый прибор БИНС показан на рис. 1 с полупрозрачными корпусом и крышкой.

Внутри корпуса размещаются три акселерометра, вычислительная и питающая электроника, рассеивающая значительное количество тепловой мощности. Рассеиваемая тепловая мощность поступает в корпус с внешних поверхностей от трёх датчиков угловой скорости (ВОГ – волоконно-оптических гироскопов).

Размещение значительно нагревающейся электроники и блока ЧЭ в герметичном объёме определило необходимость предусмотреть элементы конструкции, интенсивно отводящие вредные для ЧЭ тепловые потоки в обход акселерометров: алюминиевые радиаторы, гелиевые прокладки вблизи наиболее «горячих» элементов, оребрения на внешней поверхности крышки.

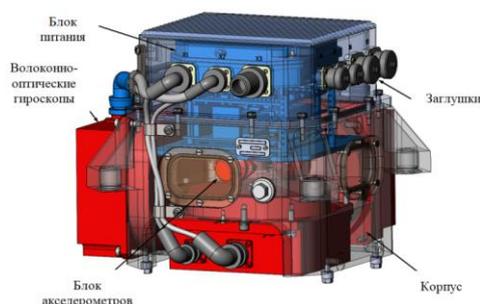


Рис. 1. БИНС АО «ЦНИИАГ»: конструкторский вариант прибора

Прибор содержит детали, состоящие из конструкционных алюминиевых сплавов, фольгированного стеклотекстолита, пластика ABS-M30, латунного сплава. Для интенсификации теплоотвода наиболее теплонагруженных элементов в опасных зонах использованы прокладки из КПДТ-2/3.

**Подготовка численных моделей.** Начальный этап подготовки расчётных моделей – идеализация геометрии узлов прибора. Исключены: геометрические объекты, значительно не влияющие на отклик системы (фаски и рёбра, часть крепёжных элементов, внешние жгуты и кабели, разъёмы), датчики угловых скоростей (ЧЭ), размещаемые вне герметичного корпуса с заменой рассеиваемых от них мощностей на эквивалентные граничные условия (ГУ) на внешних поверхностях корпуса. Оребрение на верхней поверхности крышки прибора заменено гладкой поверхностью и эквивалентным значением конвективного ГУ.

Идеализированная геометрия, содержащая около 50 твердотельных компонентов, представлена на рис. 2.

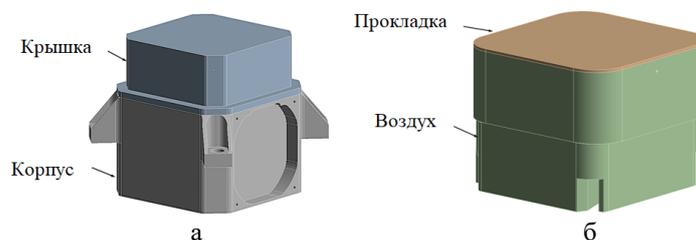


Рис. 2. Идеализированная геометрическая модель: а – внешний вид корпуса и крышки БИНС; б – внутренность прибора под его оболочкой

Средствами SolidWorks и ANSYS SpaceClaim была проведена подготовка 5 независимых внутренних воздушных доменов, имитирующих омывающий твердотельные элементы воздух.

На рис. 3 показаны три воздушных домена, омывающих элементы, находящиеся внутри радиаторов плат питания.

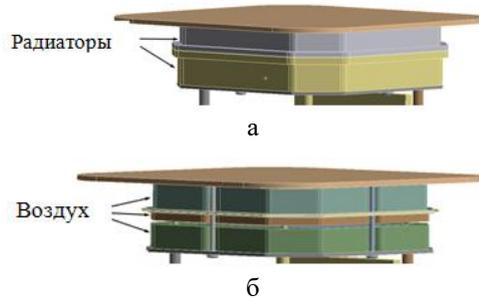


Рис. 3. Внешний вид радиаторов БИНС: а – внешний вид радиаторов БИНС; б – внутренний воздух в радиаторах

Оставшиеся два домена обтекают открытые платы и их компоненты, а также блок акселерометров.

На рис. 4 показан пакет электронных плат прибора без корпуса, крышки и радиаторов.

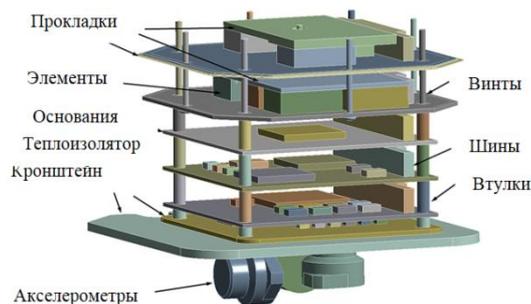


Рис. 4. Общий вид внутренней части прибора БИНС

В текущей задаче, как правило, выбирались комбинации контактов связанного типа и без трения, за исключением верхней прокладки над радиатором, на которой был задан контакт трением.

Для определения деформированного состояния системы прибор фиксировался с помощью комбинации неразделимого недеформируемого ограничения по четырём отверстиям в корпусе, а также контакта без трения, ограничивающего деформации плоских поверхностей на проушинах корпуса.

**Дискретизация.** Подготовка сеточных моделей проведена в сеточном процессоре ANSYS Meshing [12].

Для решения газодинамической задачи построена преимущественно тетраэдрическая сетка, содержащая около 30 миллионов расчётных узлов и около 17 миллионов объёмных элементов высокого порядка с послойными сгущениями сетки в окрестностях поверхностей перехода мультифизического взаимодействия твёрдых тел и газа (по 7 пограничных слоёв на сторону).

Для решения сопряжённой задачи методом System Coupling также применён преимущественно тетраэдрический метод дискретизации. Суммарно модель включает около 9 миллионов расчётных узлов и около 13 миллионов объёмных элементов второго порядка.

Сеточные модели прибора, используемые в чисто газодинамической постановке, представлены на рис. 5.

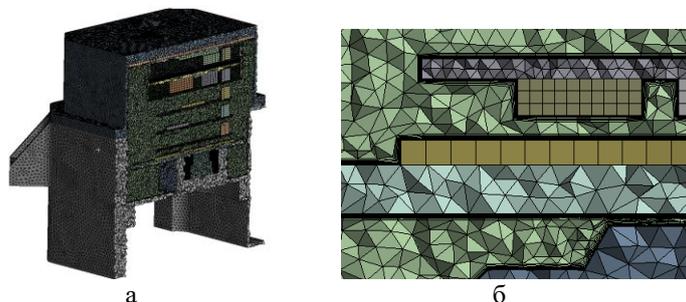


Рис. 5. Вид расчётной сетки конструкции в разрезе:  
а – общий вид расчётной сетки; б – увеличенный вид пограничных слоёв

**Задание краевых условий.** Начальная температура всей системы задана  $50^{\circ}\text{C}$ . Постоянная температура внешнего воздуха была задана как часть конвективного ГУ.

Выбрана k-ε модель турбулентности воздуха, содержащая уравнения, ориентированные на диффузионные задачи и корректирующая диффузию при сдвиговых течениях. Эффект в пограничных слоях учтён неявно.

В модуле Ansys CFX внутренняя естественная конвекция воздуха учитывалась посредством следующих параметров: гравитационная сила, плавучесть воздуха, теплообмен между твердотельными телами и воздухом, вязкостный нагрев (число Бринкмана).

**Расчёт коэффициентов теплоотдачи.** Для моделирования взаимодействия теплоотдающих поверхностей прибора с окружающим воздухом для каждой поверхности корпуса прибора БИНС были рассчитаны коэффициенты теплоотдачи на основании работ [11, 13, 14, 20].

Воспользовавшись общей формулой числа Нуссельта, выраженного при помощи критериального уравнения, можно выразить коэффициент теплоотдачи, учитывая ориентацию поверхности в пространстве с помощью  $K_{op}$ , описанного в работе [20] – коэффициента ориентации, принимающего значения в диапазоне от 0,85 до 1,3.

**Определение термомеханических параметров.** Средняя удельная мощность на каждом элементе прибора рассчитывалась как отношение рассеиваемой элементом мощности к объёму элемента.

Ввиду наличия неровностей на поверхностях прибора в контактах между твердотельными компонентами присутствуют потери мощности, которые были учтены при помощи расчёта термических сопротивлений.

Полное термическое сопротивление контакта вычислялось с учётом термических сопротивлений фактического контакта и межконтактной прослойки методом, описанным в [16–19].

**Результаты и анализ моделирования.** Расчёт выполнен в трёхмерной нестационарной постановке с общим временем 600 секунд.

В результате моделирования процесса естественной конвекции в модуле Ansys CFX удобно рассмотреть графические зависимости осреднённой температуры воздуха от времени по каждому воздушному домену, представленные на рис. 6.

На рис. 6 видно, что в целом средняя температура воздуха увеличилась на 3–4 градуса. Незначительное изменение температуры воздуха, обтекающего всю внутреннюю электронику за исключением внутренней части радиаторов, отображено

синей линией. Значительный рост температуры воздуха приходится на внутреннюю часть радиаторов. Как показано на красном графике, второй радиатор греется сильнее других за счёт наибольшей мощности, исходящей от одного из элементов и отсутствия охлаждения.

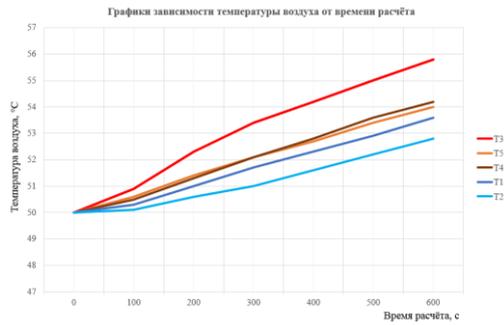


Рис. 6. Графики зависимости температуры воздуха от времени расчёта

Принадлежности доменам температур, графики которых показаны на рис. 6, в соответствии с устройством прибора БИНС показаны на рис. 7 в виде условных наименований.

Температура воздуха между акселерометрами изменилась на 4°C за 10 минут функционирования прибора.

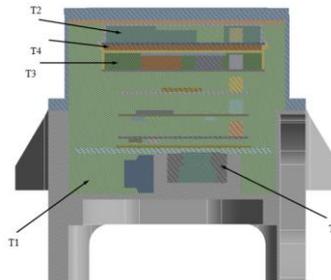


Рис. 7. Общий вид распределения воздуха внутри прибора БИНС

Поле температур представлено в виде объёмного рендеринга на рис. 8.

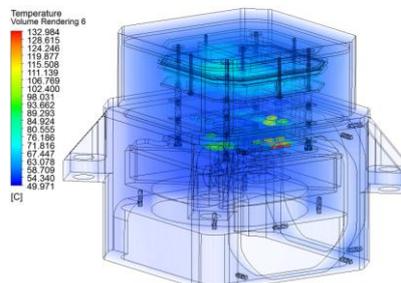


Рис. 8. Визуализация объёмного распределения температуры внутри корпуса БИНС

За 10 минут наиболее интенсивно нагреваются элементы открытых плат, для которых не предусмотрены теплоотводящие пластины и радиаторы.

Аналогичное распределение температур, определённое в рамках FSI-подхода, представлено средствами интерфейса ANSYS Mechanical на рис. 9.

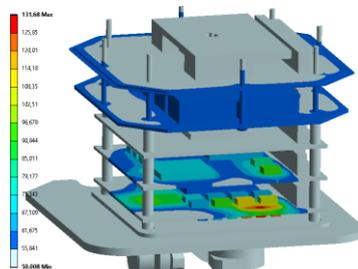


Рис. 9. Визуализация объёмного распределения температуры внутри корпуса БИНС при FSI-моделировании

На рис. 10 представлены пространственная визуализация векторного поля скоростей тепловых потоков по объёму основного воздушного домена внутри прибора и поле температур на внешних поверхностях корпуса и крышки через 10 минут работы прибора.

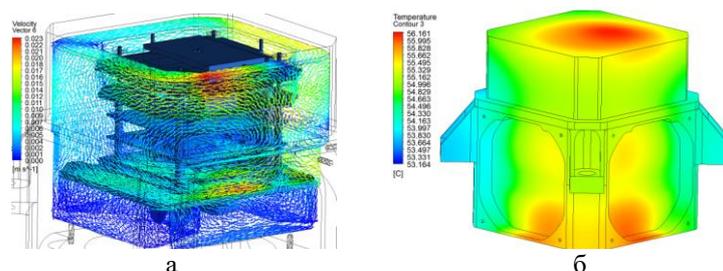


Рис. 10. Визуализация результатов через 10 минут работы прибора:  
а – распределение векторов скоростей воздуха с отображением узлов БИНС;  
б – температурное поле на внешних поверхностях несущей системы БИНС

На рис. 11 представлено деформированное состояние несущей системы прибора, возникающее вследствие действия несимметричного температурного поля в нагретом приборе.

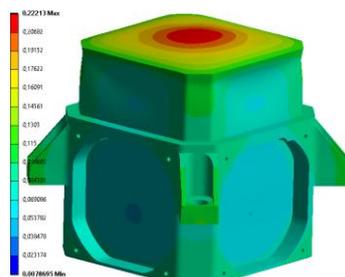


Рис. 11. Деформированное состояние несущей системы БИНС

Визуальный анализ полученных распределений показал, что в области интерфейсов отсутствуют резкие скачки параметров теплообмена. Результаты моделирования с помощью модуля Ansys CFX являются приемлемыми и близкими к реальной картине.

Деформированное состояние корпуса прибора в окрестностях установки ЧЭ представлено на рис. 12.

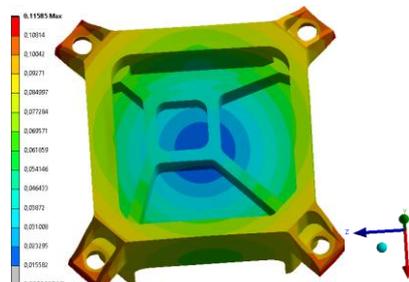


Рис. 12. Деформированное состояние корпуса БИНС

Определены отклонения площадок установки ЧЭ (акселерометров) в результате действия температурных деформаций; значения отклонений для трёх взаимно ортогональных осей представлены в табл. 4.

Таблица 4

Отклонения измерительных осей ЧЭ

	Ось X	Ось Y	Ось Z
Отклонение оси, угл. сек	3	16	5

Отклонения измерительных осей определялись с помощью встраиваемого в ANSYS Mechanical Python-приложения, реализующего метод многомерной регрессии, аппроксимирующей облако деформированных узлов искомым граней.

**Заключение.** Реализовано численное моделирование сложного теплообмена внутри герметичного корпуса БИНС, позволившее всесторонне исследовать теплообменные процессы, характерные для функционирования прибора, в том числе взаимное пространственное влияние источников тепловых мощностей друг на друга, а также на блок ЧЭ в критических условиях функционирования.

Получено представление о работе прибора в части тепловыделений, позволяющее определить пути снижения негативных факторов, возникающих при работе прибора, в отсутствие подробных экспериментов.

Разработаны численные модели сильно и слабо сопряжённого теплообмена в рамках гидродинамического подхода в ANSYS CFX, а также совместного решения задачи теплообмена с помощью System Coupling (постановка Fluid-Solid Interaction).

Расчёты, проведённые в рамках обоих подходов, приводят к качественно и количественно сходным результатам. Моделирование удовлетворительно сходится с экспериментальными данными проведённых в АО «ЦНИИАГ» испытаний по нагреву печатных плат и электронных компонентов.

Моделирование теплообмена в БИНС позволило провести проверочные расчёты критических условий нагрева для элементов прибора, но главным образом, данные модели рассматриваются в качестве части комплексной оптимизационной модели прибора. В этом отношении FSI-постановка оценивается более перспективной для будущих исследований теплообмена с похожими краевыми условиями. Во-первых, такой подход позволяет совмещать стационарную постановку с нестационарной для расчётов течений и процессов в твёрдых телах; он менее требователен к сеточным моделям. Во-вторых, благодаря простоте настройки расчётных моделей в интерфейсе ANSYS Mechanical поддерживается модульный подход к разработке и анализу сложных моделей.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Гурский Б.Г., Люшанов Э.П., Спирин Э.П.* Основы теории систем управления высокоточных ракетных комплексов Сухопутных войск. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001.
2. *Бромберг П.В.* Теория инерциальных навигационных систем. – М.: Наука, 1979. – 296 с.
3. *Липтон А.* Выставка инерциальных систем на подвижном основании. – М.: Наука, 1971.
4. *Salychev O.S.* Applied Inertial Navigation: Problems and Solutions. – М.: BMSTU Press, 2004.
5. *Медельцев А.А., Фролов А.В., Смирнов С.В.* Численное моделирование жёсткости и прочности несущих конструкций перспективной БИНС под действием комплекса термомеханических факторов // Сб. научных трудов «Наука и технологии»: Матер. XLI Всероссийской конференции, посвящённой 60-летию полёта Ю.А. Гагарина в космос. – М.: РАН, 2021.
6. *Медельцев А.А., Савватеев Д.О., Тутков Е.И. и др.* Опыт оптимизации конструкции самоприцеливающейся БИНС высокоманевренного летательного аппарата // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – Вып. 1
7. *Фролов А.В., Смирнов С.В., Попов Е.А.* Исследования влияния теплоты на стабильность осей несущей системы блока акселерометров БИНС // XXVII Санкт-петербургская международная конференция по интегрированным системам. – 2020.
8. ANSYS CFX 2021 R1 User Guide. August 2021. ANSYS Inc.
9. ANSYS Mechanical 2021 R1 User Guide. August 2021. ANSYS Inc.
10. *Лутц М.* Изучаем Python, многотом. – 5-е изд.: пер. с англ. – СПб.: ООО «Диалектика», 2019.
11. *Лыков А.В.* Тепломассообмен (Справочник). – 2-е изд. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.
12. ANSYS Meshing 2021 R1 User Guide. August 2021. ANSYS Inc.
13. *Кухтин А.С.* Определение коэффициента теплоотдачи образцов для экспериментальных исследований условий теплового самовозгорания // Пожаровзрывобезопасность. Сер. Процессы горения. – 2004. – № 2.
14. *Исаев С.И., Кожин И.А., Кофанов В.И. и др.* Теория тепломассообмена: учебник для технических университетов и вузов / под ред. А.И. Леонтьева. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. – 683 с.
15. ANSYS CFX 2021 R1 Theory Guide. August 2021. ANSYS Inc.
16. *Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В.* Методы расчёта теплового режима приборов. – М.: Радио и связь, 1990. – 312 с.
17. *Попов В.М.* Теплообмен в зоне контакта разъёмных и неразъёмных соединений. – М.: Энергия, 1971. – 216 с.
18. *Мадера А.Г.* Математическое моделирование конвективного теплопереноса в электронных устройствах // Программные продукты и системы. – 2011.
19. *Роткоп Л.Л., Спокойный Ю.Е.* Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Сов. радио, 1976.
20. *Воловиков В.В., Дектерев М.Л., Кофанов Ю.Н. и др.* Исследование тепловых характеристик РЭА с применением программного комплекса ТРИАНА: монография. – М.: Изд-во «ДМК Пресс», 2014.

## REFERENCES

1. *Gurskiy B.G., Lyushanov E.P., Spirin E.P.* Osnovy teorii sistem upravleniya vysokotochnykh raketnykh kompleksov Sukhoputnykh voysk [Fundamentals of the theory of control systems of high-precision missile systems of the Ground Forces]. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 2001.
2. *Bromberg P.V.* Teoriya inertial'nykh navigatsionnykh sistem [Theory of inertial navigation systems]. Moscow: Nauka, 1979, 296 p.
3. *Lipton A.* Vystavka inertial'nykh sistem na podvizhnom osnovanii [Exhibition of inertial systems on a movable base]. Moscow: Nauka, 1971.
4. *Salychev O.S.* Applied Inertial Navigation: Problems and Solutions. Moscow: BMSTU Press, 2004.
5. *Medel'tsev A.A., Frolov A.V., Smirnov S.V.* Chislennoe modelirovanie zhestkosti i prochnosti nesushchikh konstruksiy perspektivnoy BINS pod deystviem kompleksa termomekhanicheskikh faktorov [Numerical modeling of stiffness and strength of load-bearing structures of promising BINS under the action of a complex of thermomechanical factors], *Sb.*

- nauchnykh trudov «Nauka i tekhnologii»: Mater. XLI Vserossiyskoy konferentsii, posvyashchennoy 60-letiyu poleta Yu.A. Gagarina v kosmos* [Collection of scientific papers "Science and Technology": Mater. XLI All-Russian Conference dedicated to the 60th anniversary of Yuri Gagarin's flight into space]. Moscow: RAN, 2021.
6. Medel'tsev A.A., Savvateev D.O., Titkov E.I. i dr. Opyt optimizatsii konstruksii samoprishelivayushchey BINS vysokomanevrennogo letatel'nogo apparata [Experience in optimizing the design of a self-aiming BINC of a highly maneuverable aircraft], *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical sciences], 2021, Issue 1
  7. Frolov A.V., Smirnov S.V., Popov E.A. Issledovaniya vliyaniya teploty na stabil'nost' osey nesushchey sistemy bloka akselerometrov BINS [Studies of the influence of heat on the stability of the axes of the carrier system of the BINS accelerometer block], *XXVII Sankt-peterburgskaya mezhdunarodnaya konferentsiya po integrirovannym sistemam* [XXVII St. Petersburg International Conference on Integrated Systems], 2020.
  8. ANSYS CFX 2021 R1 User Guide. August 2021. ANSYS Inc.
  9. ANSYS Mechanical 2021 R1 User Guide. August 2021. ANSYS Inc.
  10. Lutts M. *Izuchaem Python, mnogotom* [Learning Python, multi-volume]. 5 ed.: transl. from engl. Saint Petersburg: OOO «Dialektika», 2019.
  11. Lykov A.V. *Teplomassoobmen (Spravochnik)* [Heat and mass transfer (Directory)]. 2 ed. Moscow: Energiya, 1978, 480 p.
  12. ANSYS Meshing 2021 R1 User Guide. August 2021. ANSYS Inc.
  13. Kukhtin A.S. *Opreделение koeffitsienta teplootdachi obraztsov dlya eksperimental'nykh issledovaniy usloviy teplovogo samovozgoraniya* [Determination of the heat transfer coefficient of samples for experimental studies of thermal spontaneous combustion conditions], *Pozharovzryvobezopasnost'. Ser. Protsessy goreniya* [Fire and explosion safety. Ser. Gorenje processes], 2004, No. 2.
  14. Isaev S.I., Kozhinov I.A., Kofanov V.I. i dr. *Teoriya teplomassoobmena: uchebnyk dlya tekhnicheskikh universitetov i vuzov* [Theory of heat and mass transfer: textbook for technical universities and universities], ed. by A.I. Leont'eva. 2 ed. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 1997, 683 p.
  15. ANSYS CFX 2021 R1 Theory Guide. August 2021. ANSYS Inc.
  16. Dul'nev G.N., Parfenov V.G., Sigalov A.V. *Metody rascheta teplovogo rezhima priborov* [Methods of calculating the thermal regime of devices]. Moscow: Radio i svyaz', 1990, 312 p.
  17. Popov V.M. *Teploobmen v zone kontakta raz'emnykh i neraz'emnykh soedineniy* [Heat exchange in the contact zone of detachable and non-removable joints]. Moscow: Energiya, 1971, 216 p.
  18. Madera A.G. *Matematicheskoe modelirovanie konvektivnogo teploperenosa v elektronnykh ustroystvakh* [Mathematical modeling of convective heat transfer in electronic devices], *Programmye produkty i sistemy* [Software products and systems], 2011.
  19. Rotkop L.L., Spokoynyu Yu.E. *Obespechenie teplovykh rezhimov pri konstruirovanii radioelektronnoy apparatury* [Provision of thermal modes in the design of radio-electronic equipment]. Moscow: Sov. radio, 1976.
  20. Volovikov V.V., Dekterev M.L., Kofanov Yu.N. i dr. *Issledovanie teplovykh kharakteristik REA s primeneniem programmnoho kompleksa TRiANA: monografiya* [Investigation of thermal characteristics of REA using the TRiANA software package: monograph]. Moscow: Izd-vo «DMK Press», 2014.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. Ю.В. Михайлов.

**Медельцев Антон Александрович** – АО «ЦНИИАГ»; e-mail: medeltsev@hotmail.com; г. Москва, Россия; тел.: 89017737331; инженер-конструктор 2 категории.

**Шаповалов Петр Анатольевич** – e-mail: kinik.keni@yandex.ru; тел.: 89267101927; начальник лаборатории.

**Воронов Максим Владимирович** – e-mail: duality696@mail.ru; тел.: 89177687590; инженер 1 категории.

**Полухина Анастасия Игоревна** – e-mail: loading1221@yandex.ru; тел.: 89162794097; инженер.

**Сигалева Полина Николаевна** – e-mail: polina@sigaleva.ru; тел.: 89153280920; инженер.

**Фролов Александр Владимирович** – e-mail: frolov@frolov.moscow; тел.: 89037867374; к.т.н.; начальник отдела.

**Medeltsev Anton Aleksandrovich** – JSC «СНИАГ»; e-mail: medeltsev@hotmail.com; Moscow, Russia; phone: +79017737331; CAE-engineer.

**Shapovalov Petr Anatolievich** – e-mail: kinik.keni@yandex.ru; phone: +79267101927; head of laboratory.

**Voronov Maksim Vladimirovich** – e-mail: duality696@mail.ru; phone: +79177687590; CAE-engineer.

**Polukhina Anastasia Igorevna** – e-mail: loading1221@yandex.ru; phone: +79162794097; engineer.

**Sigaleva Polina Nikolaevna** – e-mail: polina@sigaleva.ru; phone: +79153280920; engineer.

**Frolov Aleksandr Vladimirovich** – e-mail: frolov@frolov.moscow; phone: +79037867374; cand. of eng. sc.; head of division.

УДК 621.865.8

DOI 10.18522/2311-3103-2022-1-152-162

**Д.И. Малышев, Л.А. Рыбак, А.С. Писаренко, В.В. Черкасов**

### **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СИНГУЛЯРНОСТЕЙ НА РЕШЕНИЕ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ КИНЕМАТИКИ И ГЕОМЕТРИЮ РАБОЧЕГО ПРОСТРАНСТВА ПЛАТФОРМЫ ГОФА-СТЮАРТА\***

*Одним из обязательных требований при проектировании механизмов параллельной структуры является исключение из рабочей области особых положений, в которых механизм теряет свою управляемость и могут возникать сбои в работе. Анализ рабочей области механизмов параллельной структуры сложнее аналогичного для механизмов последовательной структуры, особенно если механизм имеет более трех степеней свободы. В статье рассмотрена задача анализа влияния особых положений на решение прямой задачи кинематики и геометрию рабочего пространства 3/6 платформы Гофа-Стюарта (коммерческое название - «Гексапод»). Разработан численный алгоритм решения прямой задачи о положениях платформы. Он основан на непосредственном использовании системы уравнений кинематических связей платформы. Аппроксимация множества решений системы уравнений выполнена на основе детерминированных методов глобальной оптимизации. Выполнен анализ изменения количества решений прямой задачи кинематики вблизи зоны особого положения. Анализ состоит из двух этапов. Первый этап заключается в решении обратной задачи кинематики для положения и ориентации платформы, при котором возникает особое положение. Второй этап заключается в решении прямой задачи кинематики для случая особого положения и случая вблизи особого положения. В результате решения прямой задачи кинематики выявлено различное количество решений прямой задачи кинематики для различных случаев. Синтезирован алгоритм, позволяющий определить рабочее пространство, свободное от особых положений, для заданных диапазонов изменения углов ориентации платформы, заданных углами Эйлера. Проведён анализ зависимости изменения объёма рабочей области в зависимости от диапазона изменения углов ориентации платформы. Алгоритмы реализованы программно на языке программирования C++. Моделирование выполнено с использованием параллельных вычислений и реализацией экспорта трёхмерных моделей положений платформы и рабочей области в универсальный формат трёхмерных моделей STL.*

*Особые положения; платформа Гофа-Стюарта; прямая задача кинематики; рабочая область; обратная задача кинематики.*

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01614.

D.I. Malyshev, L.A. Rybak, A.S. Pisarenko, V.V. Cherkasov

**ANALYSIS OF THE SINGULARITIES INFLUENCE ON THE FORWARD KINEMATICS SOLUTION AND THE GEOMETRY OF THE WORKSPACE OF THE GOUGH-STEWART PLATFORM**

*One of the obligatory requirements for parallel mechanisms design is the exclusion from the workspace of singularities in which the mechanism loses its controllability and malfunctions may occur. The analysis of the workspace of the mechanisms of a parallel structure is more complicated than that for the mechanisms of a serial structure, especially if the mechanism has more than three degrees of freedom. The article considers the problem of analyzing the influence of singularities on the solution of the forward kinematics and the geometry of the workspace 3/6 of the Gough-Stewart platform (commercial name - "Hexapod"). A numerical algorithm for solving the forward kinematics of platform has been developed. It is based on the direct use of the system of equations of the platform's kinematic constraints. Approximation of the set of solutions to the system of equations is based on deterministic methods of global optimization. An analysis of the change in the number of forward kinematics near the zone of singularities is performed. The analysis consists of two stages. The first stage consists in solving the forward kinematics for the position and orientation of the platform, at which singularities arises. The second stage consists in solving the forward kinematics for the case of a singularity and the case near a singularity. As a result of solving the forward kinematics, a different number of forward kinematics solutions for different cases was revealed. An algorithm has been synthesized that makes it possible to determine a singularity-free workspace free for given ranges of change in the platform orientation angles specified by Euler angles. An analysis of the dependence of the change in the volume of the workspace depending on the range of change in the angles of the platform orientation was carried out. The algorithms are implemented programmatically in the C++ programming language. The modeling was performed using parallel computing and the implementation of the export of three-dimensional models of the positions of the platform and workspace to the universal format of three-dimensional models STL.*

*Singularities; Gough-Stewart platform; forward kinematics; workspace; inverse kinematics.*

**Введение.** Вопросы проектирования и управления роботами и роботизированными системами являются актуальными и рассмотрены во многих работах отечественных ученых [1–5]. Роботы на основе механизмов параллельной структуры имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными механизмами последовательной структуры [6, 7], основными преимуществами которых является высокая грузоподъемность и скорость перемещения. Недостатком таких структур является появление особых положений, при которых робот лишается степени свободы или теряет управляемость, что может привести к неконтролируемой ситуации или поломке. В связи с этим возникает задача анализа рабочего пространства с учётом условия исключения особых положений. Особые положения бывают двух видов: граничные особые положения и внутренние особые положения [8]. Один из методов анализа особых положений основан на определителе матрицы Якоби, полученной в результате дифференцирования функций зависимости входных и выходных координат. С. Gosselin и J. Angeles в своей работе [9] описали условия возникновения особых положений, когда матрица Якоби входных или выходных координат является вырожденной (определитель матрицы равен 0). Причем вырожденная матрица Якоби, состоящая из частных производных функций прямой задачи кинематики по входным координатам, соответствует особому положению на внешней границе рабочей области или внутренней границе, разделяющей субрегионы рабочего пространства. Вырожденная матрица, состоящая из частных производных функций обратной задачи кинематики по выходным координатам, соответствует особому положению, которое обычно находится внутри рабочей области и соответствует положению, где происходит изменение количества решений прямой задачи кинематики.

Сложность вычисления матрицы Якоби существенно возрастает при решении задач более чем с тремя степенями свободы, из-за сложности нахождения определителя матрицы. Например, С. Gosselin и J. Wang [10] использовали численные методы для решения обратной задачи кинематики и нахождения всех особых положений механизма внутри рабочей области. Для механизмов параллельной структуры с шестью степенями свободы исследования привели к выявлению некоторых особых положений. К.Н. Hunt в своей работе [11] впервые указал на особое положение, которое возникает, когда все линии, проходящие через ось прямолинейных приводов, пересекают общую линию. Затем Е.Ф. Fichter [12] показал, что особое положение достигается, когда платформа поворачивается вокруг оси, ортогональной плоскости основания, на угол  $90^\circ$ . J.P. Merlet в своих работах [13, 14] предложил подход для определения особых положений, основанный на использовании геометрии грассманиана. J.P. Merlet отметил, что особое положение для платформы Гофа-Стюарта возникает при попадании оси любой из штанг в плоскость подвижной платформы. Используя геометрию грассманиана, определить геометрические условия, которые приводят к особой конфигурации легко, однако сложно выразить их аналитически. Это серьезный недостаток в контексте анализа и проектирования, где очень важно получать аналитические выражения для особых положений. Другой графический способ определения особых положений предложил D. Dönmez [15], он и ещё несколько исследователей предложили метод стереографической проекции. Установлено, что в случае, если четыре из шести направляющих стержней пересекаются друг с другом в общей точке, возникает два различных решения, следовательно, при заданных характеристиках возникает особое положение. В работах [16] М. Slavutin приводит подход определения особых положений различных конфигурации платформ 6/6, основу метода включает применение теоремы Кеннеди. В этих работах также приведено графическое представление особых положений с пояснениями относительно метода их определения.

Анализ существующих исследований показал существенный задел в области анализа особых положений для платформы Гофа-Стюарта. Однако, аналитические методы определения особых положений сложно реализуемы, необходимо наличие высокопроизводительных вычислительных систем. Геометрические методы применимы только для конкретного механизма. В существующих работах не рассмотрена задача исследования рабочей области платформы Гофа-Стюарта для различных диапазонов изменения углов ориентации с учётом особых положений на основе численных методов. В рамках настоящей работы предложены численные алгоритмы решения прямой задачи кинематики и анализа рабочего пространства на основе детерминированных методов глобальной оптимизации.

**Математическая модель платформы.** Рассмотрим структуру платформы Гофа-Стюарта (рис. 1). 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  $B_i$ ). Подвижная платформа представляет собой равносторонний треугольник.

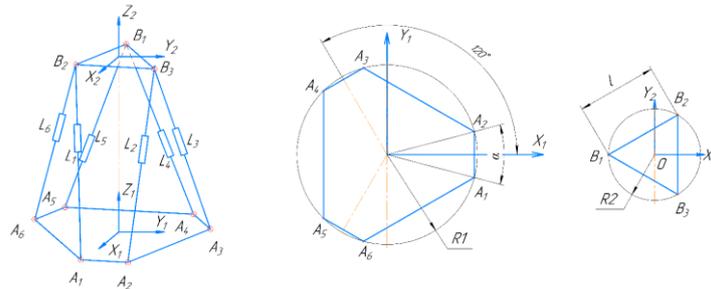


Рис. 1. Структура платформы Гофа-Стюарта

Решение обратной задачи кинематики платформы Гофа-Стюарта для входной координаты  $L_1$  запишем как

$$L_1 = \left( (A_{1x} - B_{2x})^2 + (A_{1y} - B'_{2y})^2 + (A_{1z} - B'_{2z})^2 \right)^{1/2}, \quad (1)$$

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

$$\mathbf{B}_i = (B_{ix} \ B_{iy} \ B_{iz} \ 1)^T = \mathbf{M} \cdot (B_{ix}^{(2)} \ B_{iy}^{(2)} \ B_{iz}^{(2)} \ 1)^T, \quad (2)$$

где  $B_{ix}^{(2)}, B_{iy}^{(2)}, B_{iz}^{(2)}$  – координаты точек  $B_i$  в системе координат  $X_2Y_2Z_2$  подвижной платформы,  $\mathbf{M}$  – матрица преобразования для перехода от подвижной к неподвижной системе координат. Для составления матрицы преобразования используем углы Эйлера  $(\alpha, \beta, \gamma)$ . Существует много различных систем углов Эйлера и все они описывают ориентацию твердого тела относительно некоторой заданной системы координат. Используем наиболее распространённый вариант системы вращения (рис. 2).

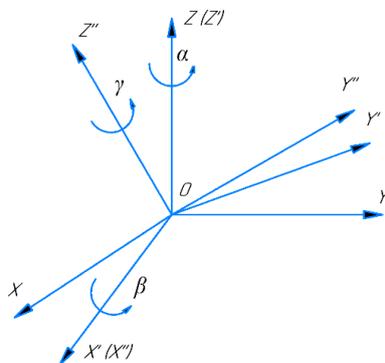


Рис. 2. Углы Эйлера:  $\alpha$  – угол прецессии,  $\beta$  – угол нутации и  $\gamma$  – и угол собственного вращения

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  $\mathbf{M}$  запишем как

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} i_x & j_x & k_x & O_x \\ i_y & j_y & k_y & O_y \\ i_z & j_z & k_z & O_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_\alpha c_\gamma - c_\beta s_\alpha s_\gamma & -c_\gamma s_\alpha - c_\alpha c_\beta s_\gamma & s_\beta s_\gamma & O_x \\ c_\beta c_\gamma s_\alpha + c_\alpha s_\gamma & c_\alpha c_\beta c_\gamma - s_\alpha s_\gamma & -c_\gamma s_\beta & O_y \\ s_\alpha s_\beta & c_\alpha s_\beta & c_\beta & O_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где  $O_x, O_y, O_z$  – координаты центра  $O$  подвижной платформы в системе координат  $X_1Y_1Z_1$ .

J.P. Merlet в своих работах [13, 14] 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

$$a = k_x, b = k_y, c = k_z, d = k_x O_x + k_y O_y + k_z O_z.$$

**Анализ влияния особых положений на решение прямой задачи кинематики.** Выполним анализ взаимосвязи особых положений и количества решений прямой задачи кинематики платформы. Решение прямой задачи кинематики состоит в определении положения и ориентации центра подвижной платформы – точки  $O$ . Её координаты  $O_x, O_y, O_z$  и углы ориентации плоскости подвижной платформы  $\alpha, \beta, \gamma$  (углы Эйлера) определим, используя координаты вершин  $B_i$  подвижной платформы, представляющей собой правильный треугольник

$$O_x = \frac{\sum B_{ix}}{3}, O_y = \frac{\sum B_{iy}}{3}, O_z = \frac{\sum B_{iz}}{3}. \quad (5)$$

Углы Эйлера, учитывая (3) можно определить, как

$$\beta = \arccos(k_z), \alpha = \arccos\left(\frac{j_z}{\sin(\beta)}\right), \gamma = \arccos\left(\frac{-k_y}{\sin(\beta)}\right) \quad (6)$$

При этом значения  $j_z, k_y, k_z$  определим, используя координаты точек  $B_i$ . Так как  $B_1$  лежит на оси абсцисс в своей локальной системе координат (рис. 1), можно найти вектор  $I$ , коллинеарный преобразованной оси  $O_1 X_1$

$$\vec{I} = (I_x, I_y, I_z) = -1 \cdot (O_x - B_{1x}, O_y - B_{1y}, O_z - B_{1z}),$$

Преобразуем вектор  $I$  в единичный вектор  $i$

$$\vec{i} = \left( I_x / (I_x^2 + I_y^2 + I_z^2)^{1/2}, I_y / (I_x^2 + I_y^2 + I_z^2)^{1/2}, I_z / (I_x^2 + I_y^2 + I_z^2)^{1/2} \right).$$

Найдем вектор оси  $O_1 Z_1$  определим как  $\vec{k} = \vec{i} \times \vec{m}$ , где  $\vec{m}$  – единичный вектор  $O_1 B_3$ .

Единичный вектор  $\vec{j}$  определим как  $\vec{j} = \vec{i} \times \vec{k}$ .

Таким образом, с учётом формул (5), (6), решение прямой задачи кинематики сводится к определению положения точек  $B_i$  для заданных длин штанг. Для этого составим систему уравнений:

$$\begin{cases} g_1(x) = 0, \\ \dots \\ g_9(x) = 0 \\ a_i \leq x_i \leq b_i, i = 1, \dots, 9. \end{cases}, \quad (7)$$

где  $g_j(x)$  – функции кинематических связей платформы между шарнирами подвижной и неподвижной платформ, а также шарниров подвижной платформы между собой, то есть  $g_1(x) = (B_{3x} - A_{1x})^2 + (B_{3y} - A_{1y})^2 + (B_{3z} - A_{1z})^2 - L_1^2, \dots, g_9(x) = (B_{3x} - B_{1x})^2 + (B_{3y} - B_{1y})^2 + (B_{3z} - B_{1z})^2 - l^2$ .

Система (7) включает 9 переменных  $x_i$ , соответствующих координатам вершин  $B$  подвижной платформы. Для аппроксимации множества решений этой системы может быть использован алгоритм на основе методов интервального анализа [17, 18], рассмотренный ранее в работе [19] для решения прямой задачи кинематики плоского механизма с тремя степенями свободы. Для ускорения его выполнения используем параллельные вычисления. Блок-схема алгоритма приведена на рис. 3.

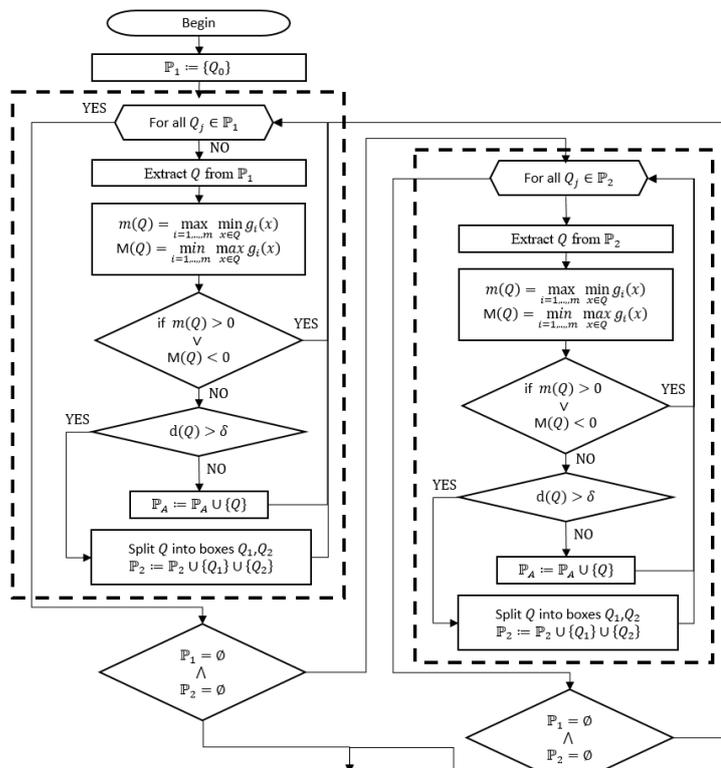


Рис. 3. Алгоритм решения прямой задачи кинематики

Интервалы переменных, соответствующих координатам точек  $B$ , заданы в виде – мерных параллелепипедов. Начальный параллелепипед  $Q_0$ , который включает в себя весь набор решений  $X$ , определяется ограничениями интервалов  $a_i \leq x_i \leq b_i, i = 1, \dots, 9$ . Он вносится в список  $\mathbb{P}_1$ . Извлечём произвольный параллелепипед  $Q$ . Пусть  $m(Q) = \max_{i=1, \dots, 9} \min_{x \in B} g_i(x)$  и  $M(Q) = \min_{i=1, \dots, 9} \max_{x \in B} g_i(x)$ . Если  $m(Q) > 0$  или  $M(Q) < 0$ , то  $Q$  не содержит решений для системы (7). Исключим такие параллелепипеды. Если параллелепипед не может быть исключён, он разделяется на два меньших параллелепипеда, если его диаметр не меньше заданной точности  $\delta$ , и вносится в список  $\mathbb{P}_2$ . Когда список  $\mathbb{P}_1$  становится пуст, процедура проверки проводится для параллелепипедов из списка  $\mathbb{P}_2$ . Те из них, что не могут быть исключены, делятся на 2 меньших параллелепипеда и вносятся в  $\mathbb{P}_1$ . Проверки параллелепипедов в списках выполняются с использованием параллельных вычислений. Эти циклы выделены на рисунке 3 пунктирными линиями. Покрытие представляет собой множество параллелепипедов  $\mathbb{P}_A$  с диаметром, меньшим или равным заданной точности аппроксимации  $\delta$ .

На основе предложенного алгоритма выполним анализ влияния особых положений на решение прямой задачи кинематики платформы. Анализ состоит из двух этапов. Первый этап заключается в решении обратной задачи кинематики, используя формулы (1), (2) для положения и ориентации платформы, при котором возникает особое положение в соответствии с условием (4). Второй этап заключается в решении прямой задачи кинематики для случая особого положения и случая вблизи особого положения.

В результате решения прямой задачи кинематики для случая особого положения было выявлено пять возможных положений. Координаты центра  $O$  подвижной платформы и углы Эйлера  $\alpha, \beta, \gamma$  для каждого из пяти решений представлены в табл. 1.

Таблица 1

Решения прямой задачи кинематики

№	$O_x$	$O_y$	$O_z$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
1	7.25	0	797.02	90	-70.05	-90
2	-38.77	101.57	727.01	135.96	110.7	43.97
3	-191.45	-1.41	730.95	94.77	172.37	95.27
4	-58.01	-0.42	694.61	89.57	37.92	90.5
5	-38.83	-101.67	727.04	44.08	110.77	136.04

Первое решение согласно табл. 1 (рис. 4,а) соответствует особому положению. Анализируя проекции положения платформы на плоскости, можно сделать вывод, что оси штанг  $L_4$  и  $L_5$  принадлежат плоскости подвижной платформы  $B_1B_2B_3$ . При изменении длин звеньев  $L_4$  и  $L_5$  в результате решения прямой задачи выявлено 2 возможных достижимых положения подвижной платформы вблизи особого положения (рис. 5). Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод что при прохождении особого положения изменяется количество решений прямой задачи кинематики, что может привести к заклиниванию и сбою в работе. Соответственно, это должно быть учтено при проектировании.

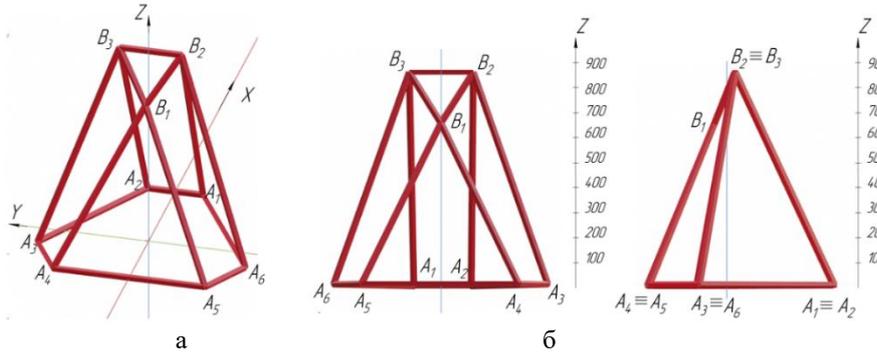


Рис. 4. Конфигурация платформы Гофа-Стюарта в особом положении: а – изометрия, б – проекции на плоскости

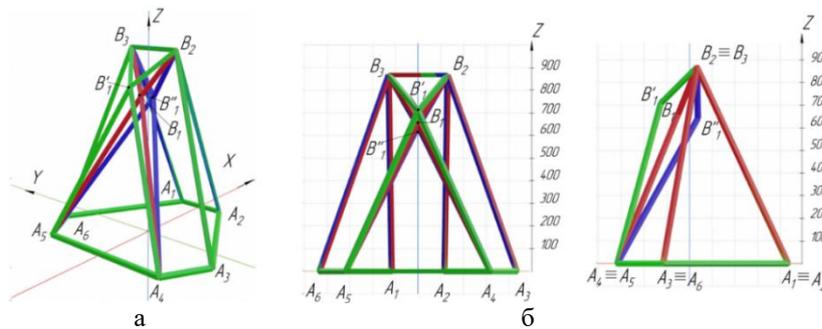


Рис. 5. Сравнение результатов решения прямой задачи кинематики вблизи особого положения: а – изометрия, б – проекции на плоскости

**Анализ влияния особых положений на геометрию рабочей области.** Рассмотрим задачу определения рабочей области, внутри которой любое положение платформы достижимо при любой ориентации платформы в пределах заданных диапазонов изменения углов Эйлера при условии отсутствия особых положений. Для этого введём следующие ограничения:

- ◆ на длины штанг  $L$ :  $L_i \in [L_{min}; L_{max}]$ ;
- ◆ на положение и ориентацию платформы для исключения особых положений. Оно может быть учтено добавлением условия положительности левой части уравнения (4).

Алгоритм определения рабочей области состоит в итерационном переборе с дискретным шагом  $\delta$  координат платформы, которые могут принадлежать рабочей области. Значения координат добавляются в покрытие рабочей области, если при любых значениях углов из диапазонов изменения углов ориентации, выполняются условия в соответствии с ограничениями на длины штанг и на положение и ориентацию платформы для исключения особых положений. Для этого вычисляются длины штанг с использованием формул (1)-(2) и значение функции левой части уравнения (4) для каждой из штанг. Добавление в покрытие рабочей области предполагает внесение в упорядоченное множество целых чисел для уменьшения объёма данных при сохранении заданной точности [20]. Рассмотренный алгоритм реализован на языке программирования C++ с использованием параллельных вычислений и реализацией экспорта в трёхмерную STL модель.

Выполним моделирование для следующих параметров:  $L_{min} = 600$  мм,  $L_{max} = 1000$  мм,  $\varphi = 30^\circ$ ,  $R_1 = 450$  мм,  $R_2 = 150$  мм,  $\delta = 10$  мм. На рис. 6 показаны результаты моделирования в изометрии и в проекциях на плоскости.

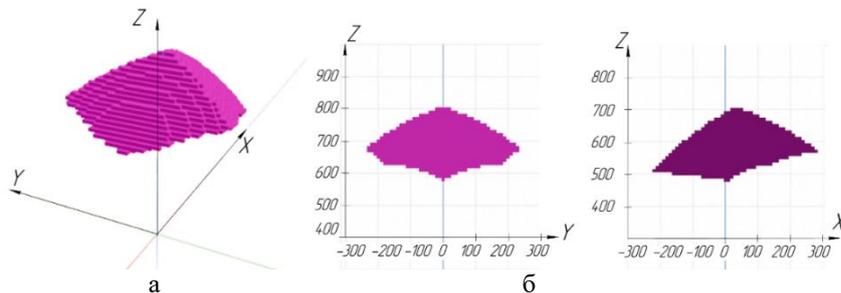


Рис. 6. Рабочая область: а – изометрия, б – проекции на плоскости

Выполним анализ зависимости объёма рабочей области от диапазона изменения углов Эйлера для следующих ограничений на длины штанг:  $L_{min} = 500$  мм,  $L_{max} = 1000$  мм. В процессе моделирования диапазон углов Эйлера последовательно увеличивался для всех углов от  $\pm 0^\circ$  до  $\pm 90^\circ$  с шагом  $1^\circ$ . График зависимости объёма рабочей области от диапазона углов представлен на рис. 7. Оранжевой линией показано изменение объёма рабочей области с ограничением только на длины штанг, пунктирной чёрной – объёма рабочей области с учётом условия возникновения особых положений.

Из графика видно, что особые положения внутри рабочей области возникают при диапазоне углов Эйлера  $\pm 15^\circ$ , однако процент рабочего пространства, достичь которого невозможно без прохождения особых положений составляет менее 5% до диапазона  $\pm 43^\circ$ . При дальнейшем увеличении диапазона углов особые положения оказывают значительное влияние на объём рабочей области. Для диапазона  $\pm 58^\circ$  не существует ни одного положения, при котором все ориентации платформы достижимы без прохождения особых положений.

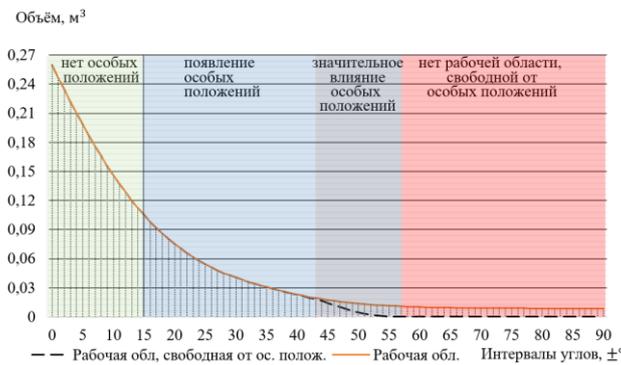


Рис. 7. Зависимость объема рабочей области от диапазона изменения углов Эйлера

**Заключение.** Выполнен анализ влияния особых положений на решение прямой задачи кинематики для платформы Гофа-Стюарта. Выявлено, что количество решений прямой задачи кинематики изменяется при попадании в зону сингулярности. При изменении значений приводных координат платформа может переместиться в одно из двух возможных положений, что может привести к заклиниванию и сбою в работе. Исследовано также влияние особых положений на геометрию рабочей области. Синтезирован алгоритм, позволяющий определить рабочее пространство, свободное от особых положений для заданных диапазонов изменения углов ориентации платформы. Выявлено, что зоны сингулярности внутри рабочей области возникают в диапазоне углов Эйлера  $\pm 15^\circ$ . При диапазонах углов свыше  $\pm 43^\circ$  особые положения оказывают значительное влияние на объем рабочей области. Для диапазона  $\pm 58^\circ$  не существует ни одного положения, при котором все ориентации платформы достижимы без прохождения особых положений. Полученные результаты могут быть использованы для рационального выбора параметров платформы с учетом наличия зон сингулярности.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю., Костюков В.А., Гайдук А.Р., Федоренко Р.В., Гуренко Б.В., Крухмалев В.А., Медведева Т.Н. Проектирование роботов и робототехнических систем. – Ростов-на-Дону, 2014. – 196 с.
2. Каляев И.А., Лохин В.М., Макаров И.М., Манько С.В., Романов М.П., Юревич Е.И. Интеллектуальные роботы. – М., 2007. – 360 с.
3. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. – М., 2009. – 280 с.
4. Глазунов В.А., Есина М.Г., Быков Р.Э. Управление механизмами параллельной структуры при переходе через особые положения // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2004. – № 2. – С. 78-84.
5. Глазунов В.А., Чунихин А.Д. Развитие исследований механизмов параллельной структуры // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2014. – № 3. – С. 37-43.
6. Merlet J.-P. Parallel Robots. – Kluwer Academic Publishers, 2000. – 355 p.
7. Kong X, Gosselin C.M. A class of 3-dof translational parallel manipulator with linear input/output equations // Workshop on Fundamental Issues and Future Research for Parallel Mechanisms and Manipulators, Québec City, Québec, Canada - 2002. – P. 25-32.
8. Craig J.J. Introduction to Robotics: Mechanics and Control. – Stanford University: Stanford, CA, USA, 2018. – P. 105-108.
9. Gosselin C.M., Angeles J. Singularity analysis of closed-loop kinematic chains // Transactions on Robotics and Automatics, IEEE. – 1990. – Vol. 6 (3). – P. 281-290.
10. Gosselin C.M., Wang J. Singularity loci of planar parallel manipulators // Ninth World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms, Milano, Italy, 1995. – P. 1982-1986.

11. *Hunt K.H.* Kinematic Geometry of Mechanisms. – Oxford, UK: Oxford University Press, 1978. – 465 p.
12. *Fichter E.F.* A stewart platform-based manipulator: General theory and practical construction // *The International Journal of Robotics Research*. – 1986. – Vol. 5 (2). – P. 157-182.
13. *Merlet J.-P.* Parallel manipulators part 2: Singular configurations and grassmann geometry // Technical report, INRIA, Sophia Antipolis, France, 1989. – Vol. 8 (5). – P. 45-56.
14. *Merlet J.-P.* Singular configurations of parallel manipulators and Grassmann geometry // *The International Journal of Robotics Research*. – 1989. – Vol. 8 (5). – P. 45-56.
15. *Dönmez D., Akçalı I.D., Avşar E., Aydın A., Mutlu H.* Determination of particular singular configurations of Stewart platform type of fixator by the stereographic projection method // *Inverse Problems in Science and Engineering*. – 2021. – Vol. 29 (13). – P. 2925-2943.
16. *Slavutin M., Sheffer A., Shai O.* A Complete Geometric Singular Characterization of the 6/6 Stewart Platform // *Journal of Mechanisms and Robotics*. – 2018. – Vol. 10 (4).
17. *Merlet J.-P.* Interval Analysis and Robotics // *Tracts in Advanced Robotics*. – 2010. – Vol. 66. – P. 147-156.
18. *Malyshev D., Posypkin M., Rybak L., Usov A.* Approaches to the determination of the working area of parallel robots and the analysis of their geometric characteristics // *Engineering Transactions*. – 2019. – Vol. 67, No. 3. – P. 333-345.
19. *Rybak L.A., Gaponenko E.V., Malyshev D.I., Virabyan L.G.* The algorithm for planning the trajectory of the 3-RPR robot, taking into account the singularity zones based on the method of non-uniform covering // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 489, No. 1. – 012060.
20. *Rybak L., Malyshev D., Gaponenko E.* Optimization Algorithm for Approximating the Solutions Set of Nonlinear Inequalities Systems in the Problem of Determining the Robot Workspace // *Communications in Computer and Information Science*. – 2020. – Vol. 1340. – P. 27-37.

#### REFERENCES

1. *Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Kostyukov V.A., Gayduk A.R., Fedorenko R.V., Gurenko B.V., Krukhmalev V.A., Medvedeva T.N.* Proektirovanie robotov i robototekhnicheskikh sistem [Design of robots and robotic systems]. Rostov-on-Don, 2014, 196 p.
2. *Kalyaev I.A., Lokhin V.M., Makarov I.M., Man'ko S.V., Romanov M.P., Yurevich E.I.* Intellektual'nye roboty [Intelligent robots]. Moscow, 2007, 360 p.
3. *Kalyaev I.A., Gayduk A.R., Kapustyan S.G.* Modeli i algoritmy kollektivnogo upravleniya v gruppakh robotov [Models and algorithms of collective control in groups of robots]. Moscow, 2009, 280 p.
4. *Glazunov V.A., Esina M.G., Bykov R.E.* Upravlenie mekhanizmami parallel'noy struktury pri perekhode cherez osobye polozheniya [Control of the mechanisms of a parallel structure when passing through special provisions], *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Journal of Machinery Manufacture and Reliability], 2004, No. 2, pp. 78-84.
5. *Glazunov V.A., Chunikhin A.D.* Razvitie issledovaniy mekhanizmov parallel'noy struktury [Development of research into the mechanisms of a parallel structure], *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Journal of Machinery Manufacture and Reliability], 2014, No. 3, pp. 37-43.
6. *Merlet J.-P.* Parallel Robots. Kluwer Academic Publishers, 2000, 355 p.
7. *Kong X, Gosselin C.M.* A class of 3-dof translational parallel manipulator with inear input/output equations, *Workshop on Fundamental Issues and Future Research for Parallel Mechanisms and Manipulators, Québec City, Québec, Canada – 2002*, pp. 25-32.
8. *Craig J.J.* Introduction to Robotics: Mechanics and Control. Stanford University: Stanford, CA, USA, 2018, pp. 105-108.
9. *Gosselin C.M., Angeles J.* Singularity analysis of closed-loop kinematic chains, *Transactions on Robotics and Automatics, IEEE*, 1990, Vol. 6 (3), pp. 281-290.
10. *Gosselin C.M., Wang J.* Singularity loci of planar parallel manipulators, Ninth World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms, Milano, Italy, 1995, pp. 1982-1986.
11. *Hunt K.H.* Kinematic Geometry of Mechanisms. Oxford, UK: Oxford University Press, 1978, 465 p.
12. *Fichter E.F.* A stewart platform-based manipulator: General theory and practical construction, *The International Journal of Robotics Research*, 1986, Vol. 5 (2), pp. 157-182.

13. Merlet J.-P. Parallel manipulators part 2: Singular configurations and grassmann geometry, *Technical report, INRIA, Sophia Antipolis, France, 1989*, Vol. 8 (5), pp. 45-56.
14. Merlet J.-P. Singular configurations of parallel manipulators and Grassmann geometry, *The International Journal of Robotics Research*, 1989, Vol. 8 (5), pp. 45-56.
15. Dönmez D., Akçalı I.D., Avşar E., Aydın A., Mutlu H. Determination of particular singular configurations of Stewart platform type of fixator by the stereographic projection method, *Inverse Problems in Science and Engineering*, 2021, Vol. 29 (13), pp. 2925-2943.
16. Slavutin M., Sheffer A., Shai O. A Complete Geometric Singular Characterization of the 6/6 Stewart Platform, *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2018, Vol. 10 (4).
17. Merlet J.-P. Interval Analysis and Robotics, *Tracts in Advanced Robotics*, 2010, Vol. 66, pp. 147-156.
18. Malyshev D., Posypkin M., Rybak L., Usov A. Approaches to the determination of the working area of parallel robots and the analysis of their geometric characteristics, *Engineering Transactions*, 2019, Vol. 67, No. 3, pp. 333-345.
19. Rybak L.A., Gaponenko E.V., Malyshev D.I., Virabyan L.G. The algorithm for planning the trajectory of the 3-RPR robot, taking into account the singularity zones based on the method of non-uniform covering, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, Vol. 489, No. 1, 012060.
20. Rybak L., Malyshev D., Gaponenko E. Optimization Algorithm for Approximating the Solutions Set of Nonlinear Inequalities Systems in the Problem of Determining the Robot Workspace, *Communications in Computer and Information Science*, 2020, Vol. 1340, pp. 27-37.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Т.А. Дуюн.

**Мальшев Дмитрий Иванович** – Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова; e-mail: malyshev.d.i@ya.ru; г. Белгород, Россия; тел.: +79507134397; м.н.с.

**Рыбак Лариса Александровна** – e-mail: rlbgtu@gmail.com; тел.: +74722230530; д.т.н.; профессор; директор НИИ Робототехники и систем управления.

**Писаренко Антон Сергеевич** – e-mail: anton42@yandex.ru; тел.: +79803205616; инженер–исследователь.

**Черкасов Владислав Витальевич** – e-mail: odaguv99@gmail.com; тел.: +79805253793; инженер–исследователь.

**Malyshev Dmitry Ivanovich** - Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; e-mail: malyshev.d.i@ya.ru; Belgorod, Russia; phone: +79507134397; junior researcher.

**Rybak Larisa Alexandrovna** - e-mail: rlbgtu@gmail.com; phone: +74722230530; dr. of eng. sc.; professor; Director of Research Institute of Robotics and Control Systems.

**Pisarenko Anton Sergeevich** - e-mail: anton42@yandex.ru; phone: +79803205616; research engineer.

**Cherkasov Vladislav Vitalevich** - e-mail: odaguv99@gmail.com; phone: +79805253793; research engineer.

УДК 62-93

DOI 10.18522/2311-3103-2022-1-162-172

**А.В. Логунов, А.Л. Береснев**

## **ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО ПОДХОДА ДЛЯ ДИАГНОСТИКА ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

*Работа посвящена проблеме диагностирования двигателя внутреннего сгорания транспортных средств эта проблема сейчас наиболее актуально из-за постоянного роста автопарка и ужесточения требований к безопасной эксплуатации. Своевременный и точный контроль состояния двигателя внутреннего сгорания способен предотвратить выход*

*из строя целых узлов транспортного средства, а также избежать таких серьезных последствий как дорожно-транспортное происшествие. С появлением современных технологий давно известный метод оценки состояния двигателя по звуку может стать самым передовым, поскольку исключается человеческий фактор, для обработки сигнала применяется вычислительная техника анализ звукового спектра в которой осуществляется с помощью искусственных нейронных сетей. Применение искусственных нейронных сетей для анализа звукового спектра нашло применение в распознавание речи и для диагностики заболеваний дыхательной системы. В статье рассмотрена неисправность одного из основных узлов двигателя внутреннего сгорания – подшипника. Представлены все возможные виды неисправностей подшипников и причины, по которым они возникают. Перечислены узлы и механизмы двигателя внутреннего сгорания в которых применяются подшипники. Описан алгоритм экспериментальной части. Выполнен эксперимент, включающий в себя преобразование полученных звуковых сигналов в спектрограммы и извлечение признаков с помощью которых выполняется классификация. Выполненная экспериментальная часть доказала возможность диагностирования двигателя внутреннего сгорания с применением искусственных нейронных сетей. Научная новизна состоит в том, что процесс диагностики становится автоматизированным, все звуки, снятые датчиками, обрабатывается в ЭВМ или в перспективе в специальном сканере, на дисплей выводится информация о состоянии тех или иных узлов, в отличие от традиционных методов где диагностика осуществляется визуально или на слух. Таким образом повышается точность диагностики и снижается общая трудоемкость за счет исключения частичной или полной разборки двигателя.*

*Двигатель внутреннего сгорания; диагностика; звук; искусственная нейронная сеть.*

**A.V. Logunov, A.L. Beresnev**

#### **APPLICATION OF THE NEURAL NETWORK APPROACH TO DIAGNOSE THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE OF VEHICLES**

*The work is devoted to the problem of diagnosing the internal combustion engine of vehicles this problem is now the most relevant due to the constant growth of the car fleet and the tightening of requirements for safe operation. Timely and accurate control of the internal combustion engine is able to prevent the failure of entire vehicle assemblies, as well as to avoid such serious consequences as a traffic accident. With the advent of modern technologies the long-known method of engine condition estimation by sound can become the most advanced, since the human factor is excluded, for signal processing the computer technique is applied, the analysis of a sound spectrum in which is carried out by means of artificial neural networks. The application of artificial neural networks for analyzing the sound spectrum has found application in speech recognition and for diagnosing diseases of the respiratory system. The article deals with the failure of one of the main parts of internal combustion engine - the bearing. All possible types of bearing faults and the reasons why they occur are presented. The nodes and mechanisms of the internal combustion engine in which bearings are used are listed. The algorithm of the experimental part is described. The experiment which includes transformation of the received sound signals into spectrograms and extraction of features with the help of which the classification is carried out, is executed. The executed experimental part has proved the possibility of diagnosing of the internal combustion engine by means of artificial neural networks. Scientific novelty lies in the fact that the diagnostic process becomes automated, all the sounds taken by sensors are processed in a computer or in the future in a special scanner, the display shows information about the state of certain nodes, unlike traditional methods where the diagnosis is carried out visually or by ear. Thus, the diagnostic accuracy increases and the overall labor intensity decreases due to the exclusion of partial or complete engine disassembly.*

*Combustion engine; diagnostics; sound; artificial neural network.*

**Введение.** Диагностика и обнаружение неисправностей современных автомобилей является не простой задачей из-за сложной конструкции [1, 2]. Самым сложно диагностируемым узлом автомобиля является двигатель внутреннего сгорания (ДВС), состоящий из множества механизмов, узлов и систем, которые взаимодействуя между собой, обеспечивают преобразование энергии, выделяемой при

сторании топлива во вращательное движение коленчатого вала. Одними из наиболее ответственных механизмов силовой установки являются подшипники, применяемые в газораспределительном механизме [3]; в качестве опоры коленчатого вала; устанавливаются в шатунах; в сцеплении; в системе охлаждения для водяного насоса; так же в различном навесном оборудовании генераторы, насосы гидросилителя руля, компрессоры кондиционера и т.д.

**Виды неисправностей подшипников.** Из-за того, что рабочие условия редко бывают идеальными, подшипники не реализуют своих потенциальных возможностей с точки зрения ресурса. Далее приведем основные виды повреждения подшипников и их причины:

- ◆ Усталостные разрушения поверхности связаны с проблемами смазки, такими как неподходящая смазка и низкая ее вязкость. При развитии дефекта поверхность дорожки отслаивается и растрескивается, подшипник начинает шуметь и излишне нагреваться;

- ◆ Выкрашивание поверхности, появляется растрескивание и сколы поверхности возникают по причине плохой посадки вала, искривлениями корпуса и неправильной установкой, т.е. условиями, вызывающими слишком высокие циклические напряжения;

- ◆ Абразивный износ, мелкая абразивная пыль является обычной причиной такого отказа. Эта пыль может попасть в подшипник при установке, через плохие уплотнения или с грязной смазкой;

- ◆ Атмосферная коррозия, вызывается влагой, которая попадает в подшипник из атмосферы;

- ◆ Бриннелирование, на поверхности колец появляются регулярно следующие друг за другом выемки, возникает по причине высоких статических или ударных нагрузок, неправильной технологии установки подшипника, сильных механических ударов;

- ◆ Натирпы появляются на торцах цилиндрических роликов могут возникать из-за нерасчетной осевой нагрузки на подшипник. Также это может быть следствием неправильной сборки подшипника или недостаточной смазки;

- ◆ Задиры на поверхности вызываются относительно большими частицами материала, которые попадают в подшипник и двигаются по дорожкам при движении;

- ◆ Выбоины поверхности частицы, попав на дорожку качения оставляют случайные насечки, в районе которых возникает концентрация напряжений и разрывы масляной пленки, что приводит к усталостному выкрашиванию металла и появлению выбоин;

- ◆ Перегрев возникает по причине недостаточной смазкой, трением наружного кольца о вращающийся вал, излишним обжимом наружного кольца при установке в корпус;

- ◆ Фреттинг-коррозия основной причиной повреждения подшипника, является несоосность колец;

- ◆ Разрушение из-за дисбаланса;

- ◆ Раскалывание, раздробление деталей причиной является большая перегрузка подшипника;

- ◆ Повреждение сепаратора, причиной выхода из строя сепаратора является его изгиб из-за неправильной сборки, загрязнения или редкой смазки [4].

Неисправный подшипник может привести к выходу из строя оборудования или ДВС в целом, поэтому своевременное определение неисправности поможет избежать дорогостоящего ремонта. Главным признаком поломки подшипника является появление постороннего звука при его вращении, а поскольку автомобиль-

ный ДВС при работе издает десятки звуков, определить источник звука, излучаемый неисправным подшипником, практически невозможно не применив частичную или полную разборку [5–11].

**Постановка задачи.** Главной задачей работы – является разработка такого способа диагностики, который позволит выделить звук работы неисправного подшипника.

Чтобы решить поставленную задачу необходимо придерживаться следующего алгоритма:

- ◆ Первым этапом необходимо записать звук;
- ◆ Следующим этапом будет преобразование полученного сигнала в спектрограммы, это преобразование необходимо для извлечения функций;
- ◆ Далее извлекаем признаки из спектрограммы: спектральный центроид, MFCC, частоту пересечения нуля, частоты цветности и спад спектра.
- ◆ Обрабатываем и разбиваем данные на наборы для обучения и тестирования;
- ◆ Далее создаем модель нейронной сети, которая поможет идентифицировать неисправность;
- ◆ Оцениваем точность модели;

**Описание эксперимента.** На поверхности ДВС закрепляется пьезоэлектрические датчики (рис. 1), которые подсоединяются к микрофонному входу звуковой карты компьютера. Звук с работающего двигателя записывается в память.

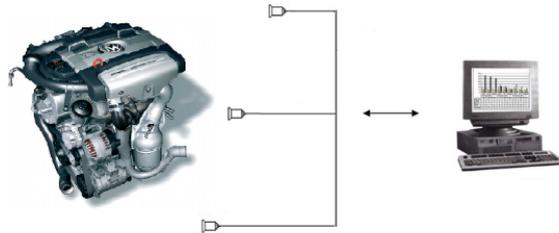


Рис. 1. Схематичное представление диагностики ДВС с помощью виброакустического анализа

Экспериментальная обработка аудиосигнала подшипника выполняется с помощью высокоуровневого языка программирования общего назначения Python. Для эксперимента получены 4 аудиосигнала (2 – неисправного подшипника, 2 – исправного), все дорожки – это монофонические аудиофайлы 22 кГц, длительностью по 10 секунд в формате .wav.

Каждый аудиосигнал состоит из множества признаков. Спектральные (частотные) признаки получают путем преобразования временного сигнала в частотную область с помощью преобразования Фурье. Анализ научных публикаций, в которых отражены результаты исследований голоса и звучащей речи, а также существующих систем распознавания звуков и музыки, помог определить ряд важных признаков аудиосигнала, которые позволят решить нашу задачу, рассмотрим эти признаки подробнее.

Частотные компоненты, представляющие собой образ функции в частотной области, которые распределены по частотному спектру и представлены в виде пиков; спектральный центроид; спектральный спад; скорость пересечения нуля мел-частотные коэффициенты; цветность.

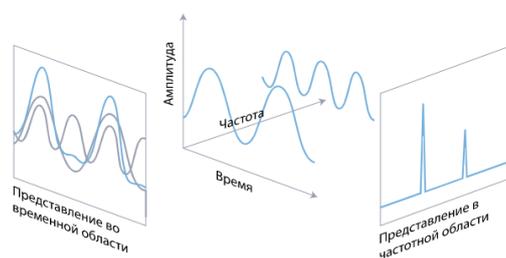


Рис. 2. График звукового сигнала

Опишем весь процесс извлечения признаков на примере одного аудиосигнала неисправного подшипника.

1. Спектральный центроид – является мерой, используемой в цифровой обработке сигналов для характеристики спектров, указывает на какой частоте сосредоточена энергия спектра или, другими словами, где расположен «центр масс» для звука. Схож со средневзвешенным значением:

$$f_c = \frac{\sum_k S(k)f(k)}{\sum_k S(k)},$$

где  $S(k)$  – спектральная величина элемента разрешения  $k$ , а  $f(k)$  – частота элемента  $k$ .

Для вычисления спектрального центроида каждого фрейма в сигнале применим библиотеку `librosa.feature.spectral_centroid`:

результат построения:

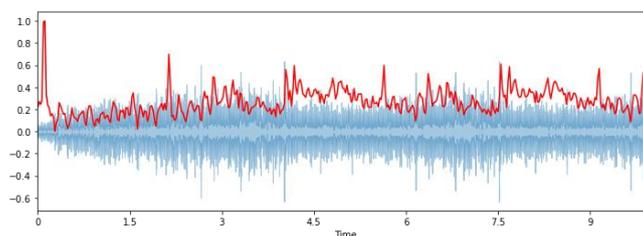


Рис. 3. Результат построения графика спектрального центроида

На графике ярко выражен рост частот в начале спектра.

2. Спектральный спад – это мера формы сигнала, представляющая собой частоту, в которой высокие частоты снижаются до 0. Чтобы получить ее, нужно рассчитать долю элементов в спектре мощности, где 85 % ее мощности находится на более низких частотах применим библиотеку `librosa.feature.spectral_rolloff` для вычисления частоты спада каждого фрейма в сигнале:

результат построения:

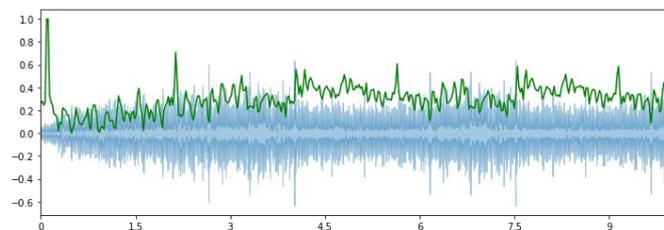


Рис. 4. Результат построения графика спектрального спада

3. Скорость пересечения нуля – скорость изменения знака вдоль сигнала, то есть скорость, с которой сигнал изменяется с положительного на отрицательный или обратно. Эта функция широко используется как для распознавания речи, так и для извлечения музыкальной информации.

Рассчитаем частоту перехода через нуль для нашего примера на Python: результат построения:

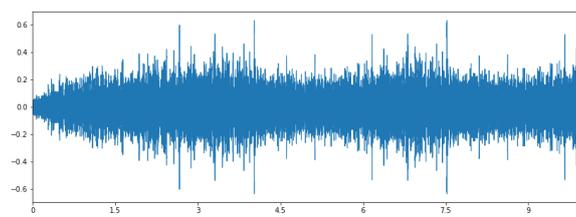


Рис. 5. График сигнала

увеличение масштаба:

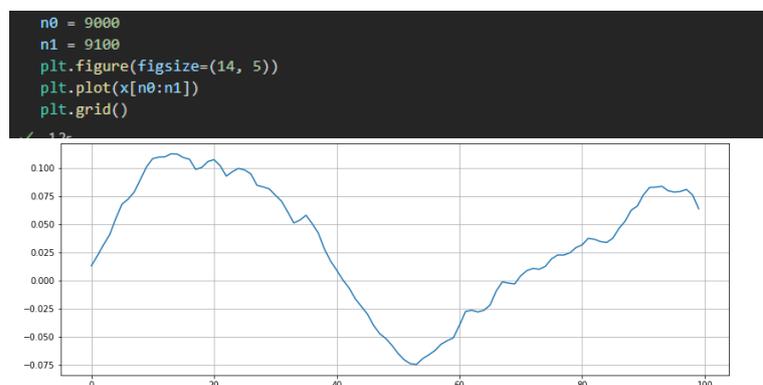


Рис. 6. Увеличенный график сигнала

Из полученного графика видно, что прохождение через нуль произошло два раза.

5. Аналогичным образом вычисляем мел-частотные кепстральные коэффициенты (MFCC) и признаки цветности. Мел-частотные коэффициенты представляют собой небольшой набор признаков (обычно около 10–20), которые кратко описывают общую форму спектральной огибающей. Результатом вычислений стали 20 MFCC из более чем 97 кадров.

Признак цветности – это мощное представление аудиосигнала, в котором весь спектр проецируется на 12 элементов разрешения, представляющих 12 различных полутонов. Признак или вектор цветности обычно представлен вектором признаков из 12 элементов, в котором указано количество энергии каждого высотного класса {C, C#, D, D#, E, ..., B} в сигнале. Используется для описания меры сходства между музыкальными произведениями [12–15].

На данном этапе извлеченных признаков достаточно для анализа, теперь необходимо заняться построением модели нейронной сети и определением какой аудиосигнал относится к неисправной детали, а какой к исправной.

**Экспериментальная часть.** Для работы с нейронными сетями используется бесплатный сервис Google Colab, предоставляющий GPU и TPU в качестве среды выполнения.

В первую очередь нужно преобразовать аудиофайлы в изображения формата PNG (спектрограммы). Затем из них нужно извлечь значимые характеристики: MFCC, спектральный центроид, скорость пересечения нуля, частоты цветности, спад спектра. После извлечения признаки можно добавить в файл CSV, чтобы ANN можно было использовать для классификации.

Ниже приведены полученные спектрограммы для всех четырех аудиосигналов:

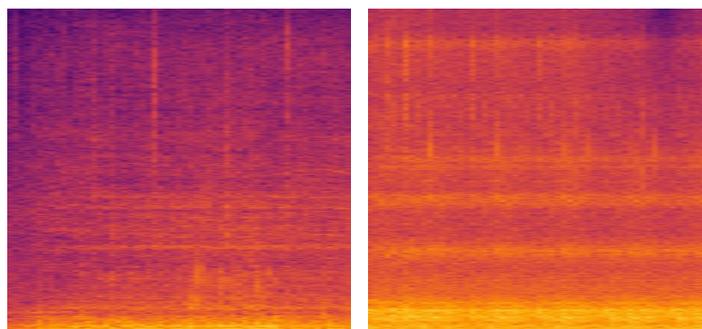


Рис. 7. Спектрограммы неисправных подшипников № 1 и № 2

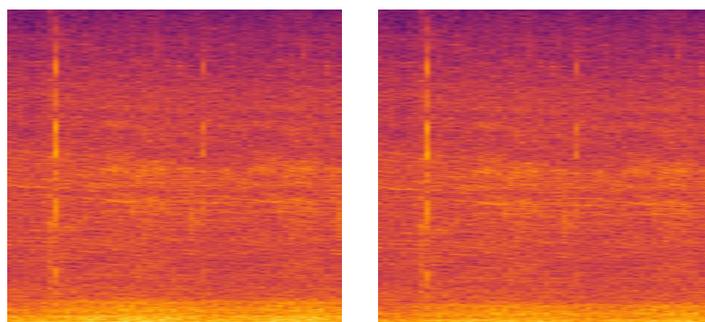


Рис. 8. Спектрограммы исправных подшипников № 3 и № 4

Извлекаем признаки из спектрограммы: MFCC, спектральный центроид, частоту пересечения нуля, частоты цветности и спад спектра.

Выполняем предварительную обработку данных, которая включает загрузку данных CSV, создание меток, масштабирование признаков и разбику данных на наборы для обучения и тестирования.

```
data = pd.read_csv('dataset.csv')
data.head()
# Удаление ненужных столбцов
data = data.drop(['filename'],axis=1)
# Создание меток
genre_list = data.iloc[:, -1]
encoder = LabelEncoder()
y = encoder.fit_transform(genre_list)
# Масштабирование столбцов признаков
scaler = StandardScaler()
X = scaler.fit_transform(np.array(data.iloc[:, :-1], dtype = float))
# Разделение данных на обучающий и тестовый набор
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2)
```

Рис. 9. Окно программы Google Colab разделение данных для обучения и тестирования

Создаем модель ANN:

```

model = Sequential()
model.add(layers.Dense(256, activation='relu', input_shape=(X_train.shape[1],)))
model.add(layers.Dense(128, activation='relu'))
model.add(layers.Dense(64, activation='relu'))
model.add(layers.Dense(10, activation='softmax'))
model.compile(optimizer='adam',
              loss='sparse_categorical_crossentropy',
              metrics=['accuracy'])
    
```

оценим точность модели нейросети:

```

Epoch 1/100
1/1 [=====] - 1s 818ms/step -
loss: 2.4139 - accuracy: 0.3333
-----
Epoch 100/100
1/1 [=====] - 0s 8ms/step -
loss: 2.4556e-05 - accuracy: 1.0000
    
```

С целью экономии места представлены 1 и 100 эпохи оценки точности, после 100 эпох точность составляет 1. Такой высокий результат объясняется малым количеством экспериментальных образцов.

В таблице представлены разбитые на наборы данные для обучения и тестирования, а также результат моделирования работы нейросети.

Таблица

filename	chroma_stft	rmse	spectral_centroid
bearing1.wav	0.4233435094356537	0.09819794446229935	1335.7908870526746
bearing2.wav	0.38575297594070435	0.1195993423461914	1004.2208908491176
bearing3.wav	0.49449190497398376	0.01362406276166439	2371.9399163994094
bearing4.wav	0.49449190497398376	0.01362406276166439	2371.9399163994094

продолжение таблицы

rolloff	zero_crossing_rate	mfcc	label
2972.8004226508374	0.04304430391166282	-162.22679138183594	badsound
1310.3923841657045	0.038296811850461895	-173.9340057373047	badsound
5541.244091007506	0.09866889795034642	-298.5201721191406	goodsound
5541.244091007506	0.09866889795034642	-298.5201721191406	goodsound

В таблице сведены значения вычисленных признаков всех аудиосигналов, в колонке *label* представлен результат классификации: bearing1.wav и bearing2.wav – **badsound**, а bearing3.wav и bearing4.wav – **goodsound**, заранее было известно, что подшипники №1 и №2 неисправны, а подшипники №3 и №4 исправны, таким образом представленная модель нейронной сети смогла верно классифицировать аудиосигналы.

**Заключение.** В результате работы удалось определить какие неисправности бывают у подшипников, где они применяются в ДВС автомобиля, разработать алгоритм, при помощи которого стало возможным классифицировать аудиосигналы

подшипников, а также выполнить эксперимент. В эксперименте выполнен анализ аудиосигналов 4х подшипников: двух исправных и двух неисправных, извлечены важные признаки, а также была реализована модель нейронной сети, позволяющая классифицировать аудиофайлы, какие относятся к неисправным подшипникам, а какие к исправным.

В перспективе представленный алгоритм позволит классифицировать различные аудиосигналы ДВС и выделять среди общего количества сигнал неисправного узла [16–20]. Также для широкого практического применения необходимо создать целую базу аудиосигналов для обучения нейросети, поскольку в данный момент количество экспериментальных образцов недостаточно для точной оценки.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шароглазов Б.А., Фарафонов М.Ф., Клементьев В.В. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчёт процессов // Теория рабочих процессов и моделирование процессов в двигателях внутреннего сгорания. – 2005.
2. Шатров М.Г. Шум автомобильных двигателей внутреннего сгорания: учеб. пособие. – М.: МАДИ, 2014.
3. Соловьев Д.В., Огороднов С.М. Газораспределительный механизм двигателя. – Н. Новгород, 2011.
4. [http://www.vibration.ru/obnar\\_defekt.shtml](http://www.vibration.ru/obnar_defekt.shtml) - вибродиагностика для начинающих.
5. Береснев А.Л., Береснев М.А. Виброакустический метод диагностики двигателя внутреннего сгорания // Теоретический и прикладной научно-технический журнал мехатроника, автоматизация, управление. – 2010. – № 6 (111). – С. 27-32.
6. Czech P., Lazarz B., Madej H., Wojnar G. Vibration diagnosis of car motor engines // Actatechnica corviniensis – bulletin of engineering. – 2010.
7. Scheffer C., Girdhar P. Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance // Newnes. – 2004.
8. Patel V.N., Tandon N., Pandey R. K. Hindawi publishing corporation advances in acoustics and vibration // Experimental study for vibration behaviors of locally defective deep groove ball bearings under dynamic radial load. – 2014.
9. Burdzik R., Doleček R. Research of vibration distribution in vehicle constructive // Perner's contacts. – 2012. – P. 16-26.
10. Wang X. Vehicle noise and vibration refinement, woodhead publishing limited. – Cambridge, 2010.
11. Deulgaonkar, V.R. Review and Diagnostics of noise and vibrations in automobiles // International journal of modern engineering research (IJMER). – Vol. 1, No. 2. – P-242-246.
12. Жеретинцев И.А., Глушков С.В., Жеретинцева Н.Н. Нейросетевая методика технической диагностики двигателей внутреннего сгорания по спектральному анализу шумовых характеристик // Вестник морского государственного университета. – 2010. – № 37.
13. Patrick Sincebaugh, William Green. A neural network based diagnostic test system for armored vehicle shock absorbers expert systems with applications // Expert Systems with Applications. – 1996. – Vol. 11, No. 2. – P. 237-244.
14. Круг П.Г. Нейронные сети и нейрокомпьютеры: учеб. пособие по курсу «Микропроцесоры». – М.: Изд-во МЭИ, 2002.
15. Бураков М.В. Нейронные сети и нейроконтроллеры: учеб. пособие. – СПб.: ГУАП, 2013.
16. Логунов А.В., Береснев А.Л. Возможности виброакустического исследования и диагностики подвески транспортных средств // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 1 (218). – С. 165-174.
17. Логунов А.В., Береснев А.Л. Возможность диагностики двигателя внутреннего сгорания подвижных объектов по виброакустическим сигналам // Управление социально-экономическими системами: направления развития, вызовы и возможности: Сб. материалов научного семинара. – 2021. – С. 163.
18. Логунов А.В., Конн В.Ю., Береснев А.Л. Диагностика автомобильного двигателя внутреннего сгорания по виброакустическим сигналам // Научные исследования и разработки последнего десятилетия взаимодействие прошлого и современного: Сб. статей. – Ростов-на-Дону, 2019. – С. 77-80.

19. *Логунов А.В., Береснев А.Л.* Виброакустическая диагностика транспортных средств // Проблемы современной системотехники: Сб. научных статей. Вып. XIV. – Таганрог, 2020. – С. 118.
20. *Логунов А.В., Конн В.Ю., Береснев А.Л.* Виброакустическая диагностика автомобилей // Прикладные информационные системы в технологиях наземного транспорта (машиностроение): Матер. II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Таганрог, 2020. – С. 65.

#### REFERENCES

1. *Sharoglazov B.A., Farafontov M.F., Klement'ev V.V.* Dvigateli vnutrennego sgoraniya: teoriya, modelirovanie i raschet protsessov [Internal combustion engines: theory, modeling and calculation of processes], *Teoriya rabochikh protsessov i modelirovanie protsessov v dvigatelyakh vnutrennego sgoraniya* [Theory of working processes and modeling of processes in internal combustion engines], 2005.
2. *Shatrov M.G.* Shum avtomobil'nykh dvigateley vnutrennego sgoraniya: ucheb. posobie [Noise of automobile internal combustion engines: textbook]. M.: MADI, 2014.
3. *Solov'ev D.V., Ogorodnov S.M.* Gazoraspredelitel'nyy mekhanizm dvigatelya [Gas distribution mechanism of an engine]. Nizhniy Novgorod, 2011.
4. Available at: [http://www.vibration.ru/obnar\\_defekt.shtml](http://www.vibration.ru/obnar_defekt.shtml) - vibrodiagnostics for beginners.
5. *Bepesnev A.L., Bepesnev M.A.* Vibroakusticheskiy metod diagnostiki dvigatelya vnutrennego sgoraniya [Vibroacoustic method of internal combustion engine diagnostics], *Teoreticheskiy i prikladnoy nauchno-tekhnicheskii zhurnal mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Theoretical and applied scientific and technical journal of mechatronics, automation, control], 2010, No. 6 (111), pp. 27-32.
6. *Czech P., Lazarz B., Madej H., Wojnar G.* Vibration diagnosis of car motor engines, *Actatechnica corviniensis – bulletin of engineering*, 2010.
7. *Scheffer C., Girdhar P.* Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance, *Newnes*, 2004.
8. *Patel V.N., Tandon N., Pandey R. K.* Hindawi publishing corporation advances in acoustics and vibration, *Experimental study for vibration behaviors of locally defective deep groove ball bearings under dynamic radial load*, 2014.
9. *Burdzik R., Doleček R.* Research of vibration distribution in vehicle constructive, *Perner's contacts*, 2012, pp. 16-26.
10. *Wang X.* Vehicle noise and vibration refinement, woodhead publishing limited. Cambridge, 2010.
11. *Deulgaonkar, V.R.* Review and Diagnostics of noise and vibrations in automobiles *International journal of modern engineering research (IJMER)*, Vol. 1, No. 2, pp. 242-246.
12. *Zherintsev I.A., Glushkov S.V., Zherintseva N.N.* Neyrosetevaya metodika tekhnicheskoy diagnostiki dvigateley vnutrennego sgoraniya po spektral'nomu analizu shumovykh kharakteristik [Neural network method of technical diagnostics of internal combustion engines by spectral analysis of noise characteristics], *Vestnik morskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Maritime State University], 2010, No. 37.
13. *Patrick Sincebaugh, William Green.* A neural network based diagnostic test system for armored vehicle shock absorbers expert systems with applications, *Expert Systems with Applications*, 1996, Vol. 11, No. 2, pp. 237-244.
14. *Krug P.G.* Neyronnye seti i neyrokomp'yutery: ucheb. posobie po kursu «Mikroprotsessory» [Neural networks and neurocomputers: tutorial on the course "Microprocessors"]. Moscow: Izd-vo MEI, 2002.
15. *Burakov M.V.* Neyronnye seti i neyrokontrollery: ucheb. posobie [Neural networks and neurocontrollers: tutorial]. Saint Petersburg: GUAP, 2013.
16. *Logunov A.V., Beresnev A.L.* Vozmozhnosti vibroakusticheskogo issledovaniya i diagnostiki podveski transportnykh sredstv [Possibilities of vibroacoustic study and diagnostics of vehicles suspension], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. 1 (218), pp. 165-174.
17. *Logunov A.V., Beresnev A.L.* Vozmozhnost' diagnostiki dvigatelya vnutrennego sgoraniya podvizhnykh ob'ektov po vibroakusticheskim signalam [Possibility of diagnostics of the internal combustion engine of moving objects by vibroacoustic signals], *Upravlenie sotsial'no-ekonomicheskimi sistemami: napravleniya razvitiya, vyzovy i vozmozhnosti: Sb. materialov nauchnogo seminara* [Management of socio-economic systems: directions of development, challenges and opportunities: Proceedings of a scientific seminar], 2021, pp. 163.

18. Logunov A.V., Konn V.Yu., Beresnev A.L. Diagnostika avtomobil'nogo dvigatelya vnutrennego sgoraniya po vibroakusticheskim signalam [Diagnosis of a car internal combustion engine by vibroacoustic signals], *Nauchnye issledovaniya i razrabotki poslednego desyatiletiya vzaimodeystvie proshlogo i sovremennogo: Sb. statey* [Scientific research and development of the past and present decade interaction: collected articles]. Rostov-on-Don, 2019, pp. 77-80.
19. Logunov A.V., Beresnev A.L. Vibroakusticheskaya diagnostika transportnykh sredstv [Vibroacoustic diagnostics of vehicles], *Problemy sovremennoy sistemotekhniki: Sb. nauchnykh statey* [Problems of modern system engineering collection of scientific papers]. Issue XIV. Taganrog, 2020, pp. 118.
20. Logunov A.V., Konn V.Yu., Beresnev A.L. Vibroakusticheskaya diagnostika avtomobiley [Vibroacoustic diagnostics of cars], *Prikladnye informatsionnye sistemy v tekhnologiyakh nazemnogo transporta (mashinostroenie): Mater. II Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Applied information systems in land transport technologies (mechanical engineering). Proceedings of the II All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation]. Taganrog, 2020, pp. 65.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. А.И. Дордопуло.

**Логунов Артём Владимирович** – Южный федеральный университет; e-mail: artem-logunov@yandex.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79054586468; аспирант.

**Береснев Алексей Леонидович** – e-mail: alex\_tr6@mail.ru; кафедра электротехники и механики; к.т.н.; доцент.

**Logunov Artem Vladimirovich** – Southern Federal University; e-mail: artem-logunov@yandex.ru; Taganrog, Russia; phone: +79054586468; postgraduate student.

**Beresnev Alexey Leonidovich** – e-mail: alex\_tr6@mail.ru; the departments electrical engineering and mechatronics; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 519:71/ 519.7

DOI 10.18522/2311-3103-2022-1-172-182

**А.А. Ткаченко, Д.Д. Девяткин**

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОНОМНОСТИ ДЛЯ МОБИЛЬНОГО ДВУХКОЛЕСНОГО РОБОТА**

*Управление с прогнозированием (Model Predictive Control) – это усовершенствованный метод управления процессами, который используется при соблюдении набора ограничений. С инженерной точки зрения MPC-метод проектирования систем управления является привлекательным, т.к. является сравнительно простым при проектировании, в том числе для решения сложных производственных задач. Данный метод схож с классическим синтезом системы управления на основе линейно-квадратичного регулятора (LQR). Ключевое различие между MPC и LQR заключается в том, что управление с прогнозированием решает задачу оптимизации в пределах скользящего временного горизонта, в то время как линейно-квадратичный метод используется для решения той же задачи фиксированное временное окно. В работе рассматривается способ построения системы управления для двухколесного мобильного робота с использованием Model Predictive Control. Приведен процесс построения математической модели механической системы робота, а также выполнена линеаризация полученной модели. Представлены основные принципы построения системы управления на основе MPC для линейных систем без внешних возмущений, а также с использованием наблюдателя для оценки состояния модели при влиянии аддитивных белых гауссовских шумов. Рассмотрен вариант синтеза системы управления с накладываемыми ограничениями на входной сигнал. Также представлен способ определения положения двухколесного робота в пространстве с помощью системы технического зрения, которая основана на использовании искусственной нейронной сети. Приведена архитектура модели, использующаяся совместно со стереокамерой, с помощью которой реализуется построение карты глубины изображения. В качестве архитектуры нейронной сети используется,*

зарекомендовавшая себя модель YOLOv3. В работе описываются модели, которые способны проводить обработку данных в режиме реального времени. Помимо вышеперечисленного в работе подробно описывается принцип работы модели глубокого обучения – YOLOv3, которая основана на нескольких блоках обработки входных данных. Представлено подробное описание реализации стереокамеры в связке с моделью искусственной нейронной сети с помощью языка программирования Python и библиотек для работы с видеоданными и стереокамерой.

*Модель управления с прогнозированием; система управления; мобильный робот; машинное зрение; нейронная сеть.*

**A.A. Tkachenko, D.D. Devyatkin**

### **CONTROL SYSTEM DESIGN AND AUTONOMY FOR TWO-WHEELED MOBILE ROBOT**

*Model Predictive Control is an advanced process control method that used while meeting a set of constraints. From an engineering point of view, the MPC method of designing control systems is attractive, because is relatively simple in design, including for solving complex production problems. This method is similar to the classical synthesis of a control system based on a linear-quadratic controller (LQR). The key difference between MPC and LQR is that predictive control solves the optimization problem within a sliding time horizon, while the linear quadratic method used to solve the same problem over a fixed time window. The paper considers a method for constructing two-wheeled mobile robot control system using Model Predictive Control. The process of building a mathematical model of the mechanical system of the robot is given, as well as the linearization of the resulting model is performed. The basic principles of constructing a control system based on MPC for linear systems without external disturbances, as well as using an observer to assess the state of the model under the influence of additive white Gaussian noises, are presented. A variant of the synthesis of a control system with imposed restrictions on the input signal is considered. Also presented is a method for determining the position of a two-wheeled robot in space using a vision system, which is based on the use of a neural network. The architecture of the used model is given, as well as a stereo camera, which used to build an image depth map. In addition to the above, the work describes in detail the principle of the deep learning model – YOLOv3, which based on several blocks of input data processing. A detailed description of the implementation of a stereo camera in conjunction with an artificial neural network model using the Python programming language and libraries for working with video data and a stereo camera is presented.*

*Model Predictive Control; control system; mobile robot; computer vision; neural network.*

**Введение.** Двухколесные мобильные роботы стали популярными проектами многих крупных компаний в наши дни. В их числе одна из самых известных, занимающаяся разработкой человекоподобных роботов – Boston Dynamics. Целью данной работы является решение задачи проектирования системы управления на основе Model Predictive Control (MPC) для линейной Multiple Input Multiple Output (MIMO) системы. Данный метод подразумевает использование в каждый момент времени информации о местоположении объекта в пространстве. Но широко известные способы позиционирования (такие как GPS, IMU или колесная одометрия) не дают достаточной точности или вовсе не пригодны для использования на мобильном роботе, который передвигается в помещении. Для решение данной проблемы, а также для осуществления возможности распознавания интересующих объектов в поле зрения робота, рассматривается вариант использования стереокамеры с технологией RealSense, которая позволяет получать 3D-изображение. Принцип действия 3D-камеры состоит в одновременном формировании двух видов изображений: обычного RGB кадра и карты глубин, получаемой с помощью инфракрасных излучателей и датчиков. Для решения проблемы детекции образов используется современная архитектура You Only Look Once (YOLO) [19, 20], которая используется для распознавания множественных объектов на изображении.

**Математическая модель.** Для описания динамики движения робота-балансира в пространстве необходимо вывести математическую модель. В качестве обобщенных координат возьмем координату положения центра колеса  $x$  и угол отклонения робота от вертикали  $\varphi$ .

На данном этапе предполагается, что робот способен совершать два типа движения: поступательное вдоль оси  $x$  и вращательное вокруг оси колеса.

Полагая, что при малых значениях  $\varphi$  имеют место равенства [1]

$$\sin \varphi \approx \varphi, \quad \cos \varphi \approx 1, \quad \dot{\varphi} \approx 0, \quad (1)$$

запишем систему следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{x} = \frac{-\frac{(m_b l)^2 g \varphi}{J_b + m_b l^2} + \left( \frac{2}{r} + \frac{2m_b l}{J_b + m_b l^2} \right) M}{m_b + 2 \left( \frac{1}{r^2} J_w + m_w \right) - \frac{(m_b l)^2}{J_b + m_b l^2}} \\ \ddot{\varphi} = \frac{m_b g l \varphi - \left( \frac{2m_b l}{m_b r + 2 \left( \frac{1}{r} J_w + m_w r \right)} + 2 \right) M}{J_b + m_b l^2 - \frac{(m_b l)^2}{m_b + 2 \left( \frac{1}{r^2} J_w + m_w \right)}} \end{array} \right. \quad (2)$$

Введем вектор состояний

$$\bar{x} = [x \quad \dot{x} \quad \varphi \quad \dot{\varphi}]^T. \quad (3)$$

Теперь, используя ряд обозначений для более компактной записи, получим систему в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \dot{\varphi} \\ \ddot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -C_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & C_3 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \varphi \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ C_2 \\ 0 \\ -C_4 \end{bmatrix} M. \quad (4)$$

Далее полученную модель можно уточнить с учетом использованной силовой установки, а именно двигателей постоянного тока с редуктором [2]. Учитывая специфику и конструктивные постоянные двигателей, запишем уточненную математическую модель [3–6]:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \dot{\varphi} \\ \ddot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -C_2 \alpha & -C_1 & C_2 r \alpha \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & C_4 \alpha & C_3 & -C_4 r \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \varphi \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ C_2 \beta \\ 0 \\ -C_4 \beta \end{bmatrix} U. \quad (5)$$

Здесь  $\alpha$  и  $\beta$  выражаются следующим образом

$$\alpha = \frac{N_G k_m k_e}{rR}, \quad \beta = \frac{N_G k_m}{R}, \quad (6)$$

где  $N_G$  – передаточное отношение,  $R$  – сопротивление обмоток ротора,  $k_e$ ,  $k_m$  – конструктивные постоянные двигателя,  $r$  – радиус.

Далее будет приводиться описание построения системы управления на основе МРС непосредственно для выведенной ранее математической модели робота с соответствующими матрицами. При использовании модели пространства состояний текущая информация, необходимая для прогнозирования, представлена переменной состояния в текущий момент времени.

**Формирование расширенной модели.** Принцип построения системы управления на основе МРС базируется на формировании новой расширенной модели исходной системы.

Преобразуя исходную систему к системе дискретного времени, получим общий вид расширенной модели будет иметь вид

$$\begin{bmatrix} \Delta x_m[k+1] \\ y[k+1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_m & o_m^T \\ C_m A_m & I_{q \times q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_m[k] \\ y[k] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_m \\ C_m B_m \end{bmatrix} \Delta u[k], \quad (7)$$

$$y[k] = \begin{bmatrix} o_m & I_{q \times q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_m[k] \\ y[k] \end{bmatrix},$$

где  $I_{q \times q}$  – единичная матрица размерности  $q \times q$ , а  $o_m$  – нулевая матрица размерности  $q \times n$ .

Перепишем систему в более удобном и привычном виде:

$$\begin{aligned} x[k+1] &= Ax[k] + B\Delta u[k], \\ y[k] &= Cx[k], \end{aligned} \quad (8)$$

где  $A, B, C$  – матрицы, соответствующие новой расширенной системе.

Принимая во внимание то, что в нашем случае матрицы дискретного аналога системы (5) таковы, что

$$A_m = \begin{bmatrix} 1 & 0,0212 & 0,0007 & 0,0031 \\ 0 & 0,1695 & 0,0637 & 0,0339 \\ 0 & 0,4193 & 1,1833 & 0,0896 \\ 0 & 4,8881 & 3,5254 & 0,9878 \end{bmatrix}, B_m = \begin{bmatrix} 0,0183 \\ 0,1928 \\ -0,0973 \\ -1,1348 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$C_m = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

то искомые матрицы  $A, B, C$  соответствующие расширенной модели, имеют вид

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0,0212 & 0,0007 & 0,0031 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1695 & 0,0637 & 0,0339 & 0 & 0 \\ 0 & 0,4193 & 1,1833 & 0,0896 & 0 & 0 \\ 0 & 4,8881 & 3,5254 & 0,9878 & 0 & 0 \\ 1 & 0,0212 & 0,0007 & 0,0031 & 1 & 0 \\ 0 & 0,4193 & 1,1833 & 0,0896 & 0 & 1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0,0183 \\ 0,1928 \\ -0,0973 \\ -1,1348 \\ 0,0183 \\ -0,0973 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

**Построение прогнозирующего управления.** После формулировки расширенной модели, следующим шагом в проектировании системы прогнозирующего управления является расчет будущего выхода системы. Этот процесс описывается в окне оптимизации [7, 8]. Далее будет подробно рассмотрена оптимизация, выполняемая в этом окне. Будем полагать, что текущий момент  $k_i$ , а  $N_p$  – длина оптимизационного окна (горизонт прогнозирования), определяющая количество будущих состояний.

Пусть вектор состояний  $x[k_i]$  полностью известен из измерений. Прогнозируемую траекторию управления можно представить следующим образом

$$\Delta u[k_i], \Delta u[k_i + 1], \dots, \Delta u[k_i + N_c - 1], \quad (11)$$

где  $N_c$  – горизонт управления, определяющий количество параметров, используемых для построения траектории управления. Важно отметить, что  $N_c \leq N_p$ .

На основе расширенной модели выражения для вычисления набора будущих состояний системы имеют вид

$$\begin{aligned} x[k_i + 1 | k_i] &= Ax[k_i] + B\Delta u[k_i] \\ x[k_i + 2 | k_i] &= A^2x[k_i] + AB\Delta u[k_i] + B\Delta u[k_i + 1] \\ &\vdots \\ x[k_i + N_p | k_i] &= A^{N_p}x[k_i] + A^{N_p-1}B\Delta u[k_i] + \\ &\quad + \dots + A^{N_p-N_c}B\Delta u[k_i + N_c - 1]. \end{aligned} \quad (12)$$

С помощью набора (9) можно спрогнозировать выходы для системы:

$$\begin{aligned} y[k_i + 1 | k_i] &= CAx[k_i] + CB\Delta u[k_i] \\ y[k_i + 2 | k_i] &= CA^2x[k_i] + CAB\Delta u[k_i] + CB\Delta u[k_i + 1] \\ &\vdots \\ y[k_i + N_p | k_i] &= CA^{N_p}x[k_i] + CA^{N_p-1}B\Delta u[k_i] + \\ &\quad + \dots + CA^{N_p-N_c}B\Delta u[k_i + N_c - 1]. \end{aligned} \quad (13)$$

Определим векторы

$$Y = [y[k_i + 1 | k_i] \quad y[k_i + 2 | k_i] \quad \dots \quad y[k_i + N_p | k_i]]^T \quad (14)$$

и

$$\Delta U = [\Delta u[k_i]^T \quad \Delta u[k_i + 1]^T \quad \dots \quad \Delta u[k_i + N_c - 1]^T]^T, \quad (15)$$

где  $N_p$  и  $N_c$  – размерности  $Y$  и  $\Delta U$  соответственно.

Таким образом, имеем

$$Y = Fx[k_i] + \Phi\Delta U, \quad (16)$$

где

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{N_p} \end{bmatrix}, \Phi = \begin{bmatrix} CB & 0 & \dots & 0 \\ CAB & CB & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ CA^{N_p-1}B & CA^{N_p-2}B & \dots & CA^{N_p-N_c}B \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Оптимальный вектор управления в оптимизационном окне задается следующим образом [7]:

$$\Delta U = (\Phi^T\Phi + R)^{-1}(\Phi^TR_s r[k_i] - \Phi^TFx[k_i]), \quad (18)$$

где  $R$  – диагональная матрица, содержащая весовой параметр  $r_w$  и определяемая как  $R = r_w I$ , где матрица  $I$ , как и  $\Phi^T\Phi$  имеет размерность  $mN_c \times mN_c$ ,  $\Phi^TF$  имеет размерность  $mN_c \times n$ , а  $\Phi^TR_s$  соответствует последним  $q$  столбцам  $\Phi^TF$ . Матрица  $R_s$  определяется как  $R_s = [I_{q \times q} \ I_{q \times q} \ \dots \ I_{q \times q}]^T$  и имеет размер  $1 \times N_p$ . Желаемый сигнал уставки имеет вид:  $r[k_i] = [r_1[k_i] \ r_2[k_i] \ \dots \ r_q[k_i]]^T$ .

Так как принцип управления со скользящим горизонтом подразумевает использование только первого элемента вектора  $\Delta U$  в момент времени  $k_i$  в качестве управляющего воздействия, то получим

$$\begin{aligned} \Delta u[k_i] = & [I_m \quad o_m \quad \dots \quad o_m](\Phi^T \Phi + R)^{-1} \times \\ & \times (\Phi^T R_s r[k_i] - \Phi^T Fx[k_i]) = K_y r[k_i] - K_{mpc} x[k_i]. \end{aligned} \quad (19)$$

**Ограничения как часть оптимального решения.** Поскольку необходимо наложить ограничения на входящее воздействие, которым является источник питания, необходимо выразить ограничения в виде системы неравенств на основе вектора параметров  $\Delta U$ , а затем объединить их с исходной функцией стоимости  $J$ . Рассматривая нижний и верхний пределы, запишем неравенства в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} -I \\ I \end{bmatrix} \Delta U \leq \begin{bmatrix} -\Delta U^{\min} \\ \Delta U^{\max} \end{bmatrix}. \quad (20)$$

Ограничения накладываются на все будущие элементы выборки, поэтому для регулируемого параметра будем иметь следующие неравенства

$$\begin{aligned} -(C_1 u(k_i - 1) + C_2 \Delta U) & \leq -U^{\min}, \\ (C_1 u(k_i - 1) + C_2 \Delta U) & \leq U^{\max}, \end{aligned} \quad (21)$$

где  $U^{\min}$  и  $U^{\max}$  являются столбцами, содержащими  $N_c$  элементов  $u^{\min}$  и  $u^{\max}$  соответственно.

Ограничения на выходной сигнал, в таком случае, примут вид

$$Y^{\min} \leq Fx(k_i) + \Phi \Delta U \leq Y^{\max}. \quad (22)$$

Модель прогнозирующего управления при наличии ограничений будет строиться путем нахождения вектора параметров  $\Delta U$ , который минимизирует следующий функционал [9]

$$\begin{aligned} J = & (R_s - Fx(k_i))^T (R_s - Fx(k_i)) - \\ & - 2\Delta U^T \Phi^T (R_s - Fx(k_i)) + \Delta U^T (\Phi^T \Phi + R) \Delta U, \end{aligned} \quad (23)$$

с учетом ограничений. Поскольку данный функционал является квадратичным, а ограничения представляют собой линейные неравенства, проблема нахождения оптимального управления становится проблемой нахождения оптимального решения стандартной задачи квадратичного программирования.

**Моделирование системы управления.** Для проектирования системы управления воспользуемся полученными ранее выкладками. Положим  $N_c = 10$ ,  $N_p = 20$ , значение уставки на всем временном отрезке равно  $r = [1 \ 0]^T$ , т.е. наша цель добиться нулевого отклонения тела робота от вертикали и сместить его на 1 м. Вектор состояний исходной системы, а также вектор состояний расширенной модели примем в начальный момент нулевыми. Определим оптимальное решение  $\Delta U$  при  $r_w = 0,5$ .

Из приведенных на рис. 1. графиков следует, что выходной сигнал  $u$  достигает и принимает значение заданной величины параметра уставки.

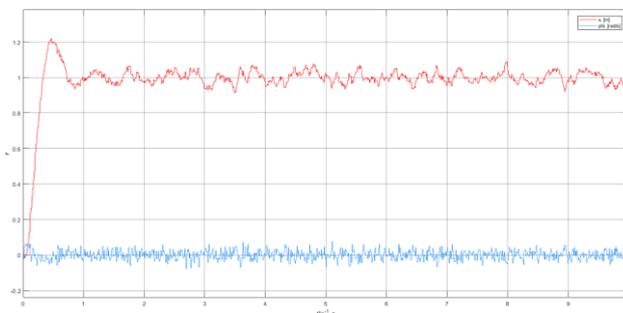


Рис. 1. Изменение выходного сигнала

**Распознавание образов.** На сегодняшний день существует несколько архитектур искусственных нейронных сетей, созданных для распознавания объектов [10, 11]. Эти архитектуры в основном делятся на «двухуровневые» и «одноуровневые». «Двухуровневые» нейронные сети, такие как RCNN, fast-RCNN и faster-RCNN, используют регионы на изображении, чтобы определить присутствие определенного объекта в нем. В таких моделях есть две ключевые проблемы: они не смотрят на изображение «полностью», а только на отдельные регионы, и скорость обработки изображений мала, так как обрабатывает одно изображение несколько тысяч раз. «Одноуровневые» модели, такие как YOLO, SSD и FPN, имеют другой принцип работы по сравнению с предыдущими, они не используют регионы вообще, обрабатывает изображение целиком и очень быстрые, потенциально пригодные для работы в реальном времени. Для детекции объектов используется архитектура YOLOv3. Главная особенность этой архитектуры состоит в том, что операция дискретной свертки часть архитектуры применяется один раз ко всему изображению сразу [12]. Нейронная сеть разделяет изображение на сетку и предсказывает ограничивающие рамки и вероятности того, что там присутствует некоторый объект для каждого участка.

В качестве входного сигнала в модели используется RGB изображение - признаковое описание входа, на выходе нейронной сети получается метка класса, которая соответствует объекту на изображении, если он там присутствует, и координаты обрамляющих рамок этого объекта.

Перед обработкой изображения нейронной сетью оно приводится к размеру  $416 \times 416$ . Далее изображение разбивается на  $S \times S$  ячеек. Изображение делится на 3 разных сетки:  $8 \times 8$ ,  $16 \times 16$  и  $32 \times 32$ , для лучшего распознавания объектов разного размера, т.е. обнаружение объектов выполняется на 3-х масштабах. Для извлечения признаков используется уникальная архитектура сверточной топологии, которая состоит из 53 слоев, с названием Darknet53. Данная архитектура содержит сверточные слои с фильтрами  $3 \times 3$  и  $1 \times 1$ , в качестве активации LeakyReLU, а также присутствуют слои BN и residual [13, 14]. Эта подсеть уменьшает разрешение изображения в 8 раз, 16 раз и 32 раза. Следующий шаг – агрегация информации от отдельных слоев с предыдущих блоков с помощью Path Aggregation Network или др.

Далее модель прогнозирует ограничивающие рамки, используя кластеры измерений в качестве якорных рамок. Поля якорных рамок выбираются на основе размеров объекта в обучающих наборах данных, для подбора их параметров использовался алгоритм k-means и метрика IoU. После этого для каждой ячейки модель получает:

1. Позицию каждой якорной рамки относительно ячейки.
2. Вероятностное распределение для каждого класса.
3. Оценку уверенности в якорной рамке по метрике IoU.

$$\begin{aligned}
 b_x &= \sigma(t_x) + c_x, \\
 b_y &= \sigma(t_y) + c_y, \\
 b_w &= p_w e^{t_w}, \\
 b_h &= p_h e^{t_h}, \\
 \sigma(t_0) &= P(obj) \cdot IoU(b, obj),
 \end{aligned} \tag{24}$$

где  $(t_x, t_y)$  – координаты левого верхнего угла,  $(t_w, t_h)$  – ширина и высота, спрогнозированные моделью,  $c_x, c_y$  – координаты верхней левой точки ячейки, с которой происходит работа,  $p_w, p_h$  – ширина и высота якорной рамки,  $b_x, b_y, b_w, b_h$  – значения, определяющие ограничивающую рамку (смещение),  $\sigma(t_0)$  – качество якорной рамки,  $P(obj)$  – вероятность конкретного объекта в рамке. На рис. 2 изображен пример ограничивающей рамки.

Далее происходит фильтрация рамок по вероятности нахождения в них объектов с помощью алгоритма подавления ложных максимумов, который заключается в следующем:

- 1) рассматривается ограничивающая рамка с наибольшей вероятностью принадлежности к объекту;
- 2) рассматриваются все ограничивающие рамки, которые тоже относятся к этому объекту;
- 3) если метрика IoU с первой ограничивающей рамкой больше заданного порога, то рамка удаляется.

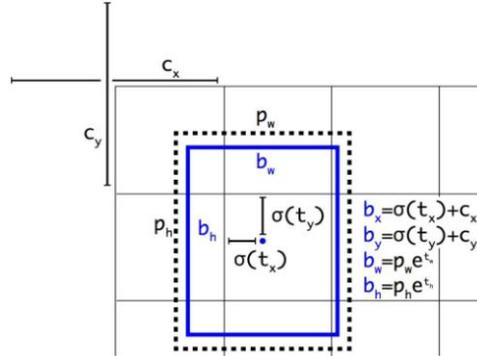


Рис. 2. Визуализация ограничивающей рамки

В архитектуре YOLOv3 классическая функция активации softmax заменяется на независимые логистические классификаторы [15], т.к. выходные метки не являются взаимоисключающими. Потери классификации вычисляются на основе бинарной кросс-энтропии.

Функция потерь в архитектуре YOLOv3 состоит из:

- 1) ошибок классификации:

$$-\sum_{i=0}^{S^2} \mathbf{1}_i^{obj} \sum_{c \in \text{classes}} y_i \log \hat{y}_i + (1 - y_i) \log(1 - \hat{y}_i), \tag{25}$$

где  $S^2$  – количество ячеек в сетке,  $\mathbf{1}_i^{obj} = 1$ , если объект  $obj$  появляется в ячейке  $i$ , иначе 0,  $\hat{y}_i$  – спрогнозированная метка класса в ячейке  $i$ ,  $y_i$  – истинная метка класса;

2) ошибок локализации объекта на изображении:

$$\lambda \sum_{i=0}^{s^2} \sum_{j=0}^B 1_{ij}^{obj} \left[ (x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2 \right] + \lambda \sum_{i=0}^{s^2} \sum_{j=0}^B 1_{ij}^{obj} \left[ (\sqrt{w_i} - \sqrt{\hat{w}_i})^2 + (\sqrt{h_i} - \sqrt{\hat{h}_i})^2 \right], \quad (26)$$

где  $1_{ij}^{obj} = 1$ , если ограничивающая рамка  $j$  в ячейке  $i$  отвечает за обнаружение объекта, иначе 0,  $B$  – количество рамок,  $(x_i, y_i)$  и  $\hat{x}_i, \hat{y}_i$  – координаты левого верхнего угла для истинной и предсказанной рамки,  $(w_i, h_i)$  и  $\hat{w}_i, \hat{h}_i$  – ширина и высота истинной и предсказанной рамки;

3) ошибок уверенности в объекте:

$$\sum_{i=0}^{s^2} \sum_{j=0}^B 1_{ij}^{obj} (C_i - \hat{C}_i)^2, \quad (27)$$

если объект обнаружен, и

$$\alpha \sum_{i=0}^{s^2} \sum_{j=0}^B 1_{ij}^{noobj} (C_i - \hat{C}_i)^2, \quad (28)$$

если объект не обнаружен. Здесь  $\hat{C}_i$  – показатель достоверности рамки  $j$  в ячейке  $i$ ,  $1_{ij}^{obj} = 1$ , – если  $j$ -й ограничивающий прямоугольник в ячейке  $i$  отвечает за обнаружение объекта, иначе 0,  $1_{ij}^{noobj} = \bar{1}_{ij}^{obj}$ ,  $\alpha$  – коэффициент уменьшения ошибки.

В силу того, что данная архитектура способна обрабатывать кадры в режиме реального времени, это дает огромный потенциал, в совокупности с камерой Intel RealSense D435i, для навигации мобильных роботов в относительно небольших пространствах, таких как офисы, квартиры и др. Использование этих инструментов позволяет распознавать необходимый объект и вычислять дистанцию до него, чтобы корректно подавать сигнал на регулятор управления.

**Реализация.** Для моделирования использовался язык программирования Python [16] и 2 библиотеки: opencv и pyrealsense2 [17, 18]. Первая предназначена для обработки видеоданных, вторая позволяет использовать функционал камеры. При использовании этих библиотек получается видеопотока с камеры, который представляется в виде 2-х матриц: матрица RGB изображения и матрица расстояний до каждого пикселя изображения. Далее происходит детекции объекта на матрице RGB изображения, вычисляется центр ограничивающей рамки и до этой точки считается расстояние.

**Заключение.** В данной работе была получена математическая модель, описывающая динамику движения двухколесного робота. Затем был реализован синтез оптимального управления для стабилизации робота на основе Model Predictive Control (MPC) при влиянии аддитивных белых гауссовских шумов, а также с учетом накладываемых ограничений на входное воздействие. Реализация архитектуры YOLOv3 в синтезе с камерой Intel RealSense D435i.

Важной особенностью данной работы, подчеркивающей ее актуальность, является применение рассматриваемого подхода к проектированию автономного робота на физической модели, которая была сконструирована и в данный момент отлаживается.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дронг В.И., Дубинин В.В., Ильин М.М. и др. Курс теоретической механики: Учебник для вузов / под общ. ред. Колесникова К.С. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 736 с.
2. Иродов И.Е. Электромагнетизм. Основные законы. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. – 319 с.
3. Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л. Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке Matlab. – СПб.: Наука, 2000. – 475 с.
4. Воронов А.А. Устойчивость, управляемость, наблюдаемость. – М.: Главная редакция физико-математической литературы: Изд-во «Наука», 1979. – 336 с.
5. Заде Л., Дезоер Ч. Теория линейных систем. Метод пространства состояний. – М.: Наука, 1970. – 704 с.
6. Ройтенберг Я.Н. Автоматическое управление. – М.: Наука, 1971. – 396 с.
7. Liuping Wang. Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB. – Springer-Verlag London Limited, 2009. – 403 p.
8. Ridong zhang, Anke Xue, Furong Gao. Model Predictive Control. Approaches Based on the Extended State Space Model and Extended Non-minimal State Space Model. – Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2019. – 143 p.
9. James B. Rawlings, David Q. Mayne, Moritz M. Diehl. Model Predictive Control: Theory, Computation, and Design. – 2nd ed. Copyright 2017 by Nob Hill Publishing, LLC. Nob Hill Publishing, LLC Cheryl M. Rawlings, publisher Madison, WI 53705.
10. Девяткин Д.Д., Порцев Р.Ю., Макаренко А.В. Сравнение 3D-сверточных нейронных сетей с полносвязными и GAP слоями в задаче распознавания действий на видео // Тр. 17-й Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами» (УБС'2021, Москва). – М.: ИПУ РАН, 2021. – С. 190-201.
11. Лепский А.Е., Броневич А.Г. Математические методы распознавания образов: Курс лекций. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – 155 с.
12. Гудфеллоу Я., Бенджио И., Курвилль А. Глубокое обучение: пер. с англ. А.А. Слинкина. – 2-е изд., испр. – М.: ДМК Пресс, 2018. – 652 с.
13. Szegedy Christian, Liu Wei, Jia Yangqing, Sermanet Pierre, Reed Scott, Anguelov Dragomir, Erhan Dumitru, Vanhoucke Vincent, Rabinovich Andrew Going deeper with convolutions. ArXiv:1409.4842, 2014.
14. Smonyan Karen, Zisserman Andrew Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. ArXiv: 1409.1556, 2014.
15. Рашка С. Python и машинное обучение: пер. с англ. А.В. Голунова. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 418 с.
16. Любанович Б. Простой Python. Современный стиль программирования. – СПб.: Питер, 2016. – 480 с.
17. Жерон Орельен. Прикладное машинное обучение с помощью Scikit-Learn и TensorFlow: концепции, инструменты и техники для создания интеллектуальных систем: пер. с англ.
18. Гадушкин А. Синтез многослойных систем распознавания образов. – М.: Энергия, 1974. – 368 с.
19. Joseph Redmon, Ali Farhadi. Yolo9000: Better, faster, stronger. In Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) // 2017 IEEE Conference on. – IEEE, 2017. – P. 6517-6525.
20. Redmon Joseph, Farhadi Ali. Yolov3: An incremental improvement, 2018.

## REFERENCES

1. Drong V.I., Dubinin V.V., Il'in M.M. i dr. Kurs teoreticheskoy mekhaniki: Uchebnik dlya vuzov [Course of theoretical mechanics: textbook for universities], under the general ed. Kolesnikova K.S. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2005, 736 p.
2. Irodov I.E. Elektromagnetizm. Osnovnye zakony [Electromagnetism. Basic laws]. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2014, 319 p.
3. Andrievskiy B.R., Fradkov A.L. Izbrannye glavy teorii avtomaticheskogo upravleniya s primerami na yazyke Matlab [Selected chapters of the theory of automatic control with examples in Matlab]. Saint Petersburg: Nauka, 2000, 475 p.
4. Voronov A.A. Ustoychivost', upravlyaemost', nablyudaemost' [Stability, controllability, observability]. Moscow: Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury: Izd-vo «Nauka», 1979, 336 p.

5. *Zade L., Dezoer Ch.* Teoriya lineynykh sistem. Metod prostranstva sostoyaniy [Theory of linear systems. The method of the space of states]. Moscow: Nauka, 1970, 704 p.
6. *Roytenberg Ya.N.* Avtomaticheskoe upravlenie [Automatic control]. Moscow: Nauka, 1971, 396 p.
7. *Liuping Wang.* Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB. Springer-Verlag London Limited, 2009, 403 p.
8. *Ridong zhang, Anke Xue, Furong Gao.* Model Predictive Control. Approaches Based on the Extended State Space Model and Extended Non-minimal State Space Model. Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2019, 143 p.
9. *James B. Rawlings, David Q. Mayne, Moritz M. Diehl.* Model Predictive Control: Theory, Computation, and Design. 2nd ed. Copyright 2017 by Nob Hill Publishing, LLC. Nob Hill Publishing, LLC Cheryl M. Rawlings, publisher Madison, WI 53705.
10. *Devyatkin D.D., Portsev R.Yu., Makarenko A.V.* Sravnenie 3D-svertochnykh neyronnykh setey s polnosvyaznymi i GAP sloyami v zadache raspoznavaniya deystviy na video [Comparison of 3D convolutional neural networks with fully connected and GAP layers in the task of recognizing actions on video], *Tr. 17-y Vserossiyskoy shkoly-konferentsii molodykh uchenykh «Upravlenie bol'shimi sistemami» (UBS'2021, Moskva)* [Proceedings of the 17th All-Russian School-Conference of Young Scientists "Management of Large Systems" (UBS'2021, Moscow)]. Moscow: IPU RAN, 2021, pp. 190-201.
11. *Lepskiy A.E., Bronevich A.G.* Matematicheskie metody raspoznavaniya obrazov: Kurs lektsiy [Mathematical methods of pattern recognition: A course of lectures]. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2009, 155 p.
12. *Gudfellow Ya., Bendzhio I., Kurvill' A.* Glubokoe obuchenie [Deep learning]: transl. from the engl. by A.A. Slinkina. 2 ed. Moscow: DMK Press, 2018, 652 p.
13. *Szegedy Christian, Liu Wei, Jia Yangqing, Sermanet Pierre, Reed Scott, Anguelov Dragomir, Erhan Dumitru, Vanhoucke Vincent, Rabinovich Andrew* Going deeper with convolutions. ArXiv:1409.4842, 2014.
14. *Simonyan Karen, Zisserman Andrew* Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. ArXiv: 1409.1556, 2014.
15. *Rashka S.* Python i mashinnoe obuchenie [Python and machine learning]: transl. from the engl. by A.V. Golunova. Moscow: DMK Press, 2017, 418 p.
16. *Lyubanovich B.* Prostoy Python. Sovremennyy stil' programmirovaniya [Simple Python. Modern programming style]. Saint Petersburg: Piter, 2016, 480 p.
17. *Zheron Orel'en.* Prikladnoe mashinnoe obuchenie s pomoshch'yu Scikit-Learn i TensorFlow: konseptsii, instrumenty i tekhniki dlya sozdaniya intellektual'nykh system [Applied machine learning using Scikit-Learn and TensorFlow: concepts, tools and techniques for creating intelligent systems]: transl. from the engl.
18. *Galushkin A.* Sintez mnogosloynnykh sistem raspoznavaniya obrazov [Synthesis of multilayer image recognition systems]. Moscow: Energiya, 1974, 368 p.
19. *Joseph Redmon, Ali Farhadi.* Yolo9000: Better, faster, stronger. In Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2017 IEEE Conference on. IEEE, 2017, pp. 6517-6525.
20. *Redmon Joseph, Farhadi Ali.* YoloV3: An incremental improvement, 2018.

Статью рекомендовал к опубликованию к.ф.-м.н. А.Ю. Кустов.

**Ткаченко Андрей Александрович** – Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова; e-mail: tkachenko\_aa10@mail.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79255817122; математик.

**Девяткин Даниил Дмитриевич** – e-mail: danya.devyatkin@mail.ru; тел.: +79035883027; математик.

**Tkachenko Andrew Alexandrovich** – Institute of Control Sciences V.A. Trapeznikov RAS; e-mail: tkachenko\_aa10@mail.ru; Moscow, Russia; phone: +79255817122; mathematician.

**Devyatkin Daniil Dmitrievich** – e-mail: danya.devyatkin@mail.ru; phone: +79035883027; mathematician.

## Раздел III. Системы энергетики, приводная и датчиковая аппаратура

УДК 614.8

DOI 10.18522/2311-3103-2022-1-183-192

**А.Ю. Баранник, Е.А. Дудоров, А.В. Лагутина**

### **ОБОСНОВАНИЕ КОМПЛЕКТА СПЕЦИАЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ ВЕДЕНИЯ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ РАБОТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ АВТОНОМНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ ПЛАТФОРМ**

*Целью исследования является обоснование эффективности применения различных видов навесного и съёмного рабочего оборудования робототехнических комплексов на базе автономных платформ для выполнения аварийно-спасательных работ в зоне ЧС. Исследования, проведенные в рамках создания экспериментальной робототехнической платформы «Маркер», позволили приступить к разработке аварийно-спасательных мобильных робототехнических комплексов, способных выполнять задачи в зоне ЧС в автономном режиме. Предложено, на основе анализа задач, выполняемых в зоне ЧС, а также перечня специального оборудования машин, имеющих массогабаритные показатели близкие к аналогичным показателям платформы «Маркер», оценить оптимальный набор навесного и съёмного рабочего оборудования, обеспечивающего выполнение задач с минимальными временными затратами. В ходе проведения исследований был предложен подход, позволяющий решать подобные задачи для любых роботизированных платформ, независимо от используемого базового шасси. Также предложенный подход позволил определить основные направления доработки автономной робототехнической платформы «Маркер» с целью обеспечения возможности выполнения аварийно-спасательных работ в зоне ЧС. К таким направлениям относятся разработка гидросистемы, позволяющей осуществлять управление навесным и съёмным оборудованием, как при выполнении технологических операций, так и при перемещении по зоне ЧС, и выполнении манипуляций, связанных с их заменой, в том числе в автоматическом режиме. В качестве второго направления была определена необходимость доработки конструкции путем усиления точек крепления навесного и рабочего оборудования, а также основных несущих элементов, которые будут задействованы при выполнении технологических операций с использованием расчетного комплекта навесного и съёмного оборудования. Третьим направлением авторы считают необходимость разработки алгоритмов и программного обеспечения управления автономной робототехнической платформой при выполнении технологических операций в зоне ЧС, включая землеройные операции, погрузочно-разгрузочные операции, поисково-спасательные операции, а также действия, связанные с мониторингом обстановки в районе ведения аварийно-спасательных работ.*

*Робототехнический комплекс; специальное оборудование; автономная робототехническая платформа; аварийно-спасательные работы.*

**A.Yu. Barannik, E.A. Dudorov, A.V. Lagutina**

### **JUSTIFICATION OF THE SET OF SPECIAL EQUIPMENT INTENDED FOR RESCUE OPERATIONS USING MULTIFUNCTIONAL AUTONOMOUS ROBOT PLATFORM**

*The purpose of the study is to substantiate the effectiveness of the use of various types of mounted and removable working equipment of robotic complexes based on autonomous platforms for emergency rescue operations in the emergency zone. The research carried out within the framework of the creation of the experimental robotic platform "Marker" allowed us to begin the development of emergency rescue mobile robotic complexes capable of performing tasks in an emergency zone in*

*autonomous mode. It is proposed, based on the analysis of tasks performed in the emergency zone, as well as a list of special equipment of machines with weight and size indicators close to those of the Marker platform, to evaluate the optimal set of mounted and removable working equipment that ensures the performance of tasks with minimal time costs. During the research, an approach was proposed that allows solving similar tasks for any robotic platforms, regardless of the base chassis used. Also, the proposed approach made it possible to determine the main areas of improvement of the autonomous robotic platform "Marker" in order to ensure the possibility of performing emergency rescue operations in the emergency zone. These areas include the development of a hydraulic system that allows you to control mounted and removable equipment, both when performing technological operations and when moving around the emergency zone, and performing manipulations related to their replacement, including in automatic mode. As a second direction, the need to refine the design by strengthening the attachment points of attachments and working equipment, as well as the main load-bearing elements that will be involved in performing technological operations using a calculated set of attachments and removable equipment was determined. The authors consider the third direction to be the need to develop algorithms and software for controlling an autonomous robotic platform when performing technological operations in an emergency zone, including earthmoving operations, loading and unloading operations, search and rescue operations, as well as actions related to monitoring the situation in the area of emergency rescue operations.*

*Robotics complex; special equipment; autonomous robotic platform; emergency rescue operations.*

**Введение.** Эволюция современных мобильных наземных робототехнических комплексов (далее – РТК) идет по пути наращивания возможностей выполнения задач в автономном режиме с постепенным снижением задействования оператора в процессе управления РТК [1–4]. Определенный прогресс в создании мобильных наземных автономных РТК сделал актуальным исследование проблем применения таких комплексов при проведении аварийно-спасательных и других неотложных работ в ходе ликвидации чрезвычайных ситуаций техногенного характера [5].

Для повышения уровня автономности таких РТК требуется развитие ряда ключевых технологий, которые в совокупности определяют облик перспективных РТК. Поэтому актуальным является разработка технологий робототехники и доведение их до уровня готовности, позволяющего применять создаваемые технологии на перспективных автономных РТК в реальных условиях [6–9].

При этом, прежде чем приступить к проведению экспериментов по использованию таких автономных РТК, например, экспериментальной робототехнической платформы «Маркер» [10], созданной в ходе реализации проекта Национального центра развития технологий и базовых элементов робототехники Фонда перспективных исследований и Научно-производственное объединение «Андроидная техника», необходимо определиться какое специальное оборудование будет использоваться при их адаптации под задачи МЧС России [11].

**Описание проблемы.** Основными задачами, которые будут решаться РТК, состоящими на оснащении формирований МЧС России являются: мониторинг и обследование аварийных зон средствами визуального, приборного и радиационно-химического контроля; определение местоположения объектов и состояния технологического оборудования в зоне аварии; выявление мест и характера поврежденных аварийного оборудования; проведение погрузочно-разгрузочных и транспортных работ с целью доставки технических средств и материалов в аварийную зону; проведение инженерных работ по расчистке завалов и разборке аварийных конструкций; сбор и транспортировка опасных объектов в район их утилизации; расширение спектра манипуляционных технологических работ по монтажу и демонтажу оборудования, нанесению и удалению покрытий, контейнеризованию опасных отходов и веществ; сварку и резку металлоконструкций, сверление, бурение, разборка строительных конструкций, вскрытие дверей и люков; выполнение задач по дезактивации местности, строений и оборудования; пожаротушение; поиск людей в зоне чрезвычайной ситуации и их последующая эвакуация [12–14].

Уже сам данный перечень задач показывает, необходимость проведения исследований связанных, с оптимизацией перечня оборудования, которое должно быть интегрировано с автономными платформами [15, 16].

Необходимо отметить, что похожая задача решается при создании многофункциональных дорожно-строительных машин. При этом, рабочие органы различаются не только по видам выполняемых работ и сложности устройства, но и по способам установки и навески, дополнительным приводным устройствам, времени замены. Одинаковые по назначению сменные рабочие органы устанавливаются и навешиваются на машины разными способами, что по-разному проявляется в условиях работы. Классификация такого рабочего оборудования представлена на рис. 1 [17].



Рис. 1. Классификация рабочего оборудования многофункциональных РТК для ведения аварийно-спасательных работ, по способам установки (крепления)

**Методический подход к оптимизации комплекта оборудования.** Для выявления эффективности, сопоставления и выбора мобильных наземных автономных РТК для проведения аварийно-спасательных работ с различными типами рабочего оборудования при работе в зоне ЧС воспользуемся известным критерием оценки эффективности – временем для выполнения аварийно-спасательных работ [18, 19].

$$T_e = \frac{S_{зчс}}{v_{тр}} + \frac{V_{зчс}}{П}, \quad (1)$$

где  $S_{зчс}$  – дальность перемещения РТК в зоне ЧС, км;  $v_{тр}$  – средняя скорость перемещения РТК, км/ч;  $П$  – эксплуатационная производительность, м<sup>3</sup>/ч;  $V_{зчс}$  – объем работ в зоне ЧС, м<sup>3</sup> или т.

При этом эффективность многофункциональных РТК, использующих для выполнения аварийно-спасательных работ с разнородными технологическими операциями, необходимо рассчитывать исходя из перечня основных технологических операций, выполняемых в зоне ЧС [20]. В ходе выполнения каждой технологической операции  $j$  (объемом  $V_j$ ) и с каждым типом сменного оборудования производительность РТК будет разной. Для учета этой специфики в формуле (1) воспользуемся так называемой приведенной производительностью.

В случае, когда объемы разных видов работ можно выразить в одинаковых измерителях, например, в м<sup>3</sup> (или тоннах – для грузоподъемного оборудования), и, следовательно, общий объем в зоне ЧС можно подсчитать, суммируя объемы отдельных технологических операций  $V_{зчс} = \sum V_j$ , эксплуатационная производительность может быть приведена к суммарному объему работ:

$$\sum V_j = \frac{П_{зчс}}{T_{зчс}}, \quad (2)$$

где  $T_{зчс}$  – общее время выполнения всех разнородных технологических операций в зоне ЧС;

$$T_{зчс} = \sum T_{ij} = \sum \frac{V_i}{П_{ij}}, \quad (3)$$

где  $T_{ij}$  – время выполнения  $j$ -й работы многофункционального РТК с  $i$ -м типом сменного оборудования;

$\Pi_{ij}$  – эксплуатационная производительность многофункциональной машины с  $i$ -м типом съемного рабочего оборудования на  $j$ -м виде технологических операций. Этот показатель необходимо определять для всех технологических операций (рассчитывается обычным образом или принимается по производственным нормам выработки).

Приведенная производительность, таким образом, это средневзвешенная эксплуатационная производительность, при которой суммарный объем разнородных технологических операций выполняется за суммарное время работы.

Для уменьшения расчетов по формуле (1) при выявлении эффективности можно считать, что сопоставление многофункциональных РТК с разными типами съемного рабочего оборудования всегда производится при выполнении одних и тех же работ и их объемов в зоне ЧС. Поэтому сопоставление и оценку можно провести по общим временным затратам на выполнение механизированных работ:

$$T_{зчс} = \sum T_e = \sum \left( \frac{S_{зчс}}{v_{тр}} + \frac{V_{зчс}}{\Pi} \right),$$

$$T_j = T_{раб.сум.} + T_{зам} = T_{раб.сум.} + \lambda t_{зам}, \quad (4)$$

где  $T_j$  – время выполнения технологической операции;

$T_{зам}$  – продолжительность одной замены сменного оборудования (при переходе от одной работы к другой), ч;

$\lambda$  – число замен сменного оборудования на объекте при выполнении всего объема работ  $\sum V_j$ .

Причем число замен  $\lambda$  не всегда совпадает с числом видов работ, так как часто по технологии или организации работы сменное оборудование несколько раз меняют при выполнении одной и той же технологической операции, т. е.  $\lambda \geq \sum_j$ .

Графики областей рационального применения обычно представляют в зависимости от объема работы, для этого время работы  $T_{раб.сум.}$  подставим из формулы (2):

$$T_{раб.сум.} = \sum \frac{V_j}{\Pi_{зчс}}$$

Конечное выражение для  $T_{зчс}$  получим в виде:

$$T_{зчс} = \sum \frac{V_j}{\Pi_{зчс}} + \lambda t_{зам} + \frac{S_{зчс}}{v_{тр}}, \quad (5)$$

Таким образом, суммарное время выполнение задачи, выражено через работы на объекте, время, затраченное на перемещение между объектами, продолжительность одной замены сменного оборудования, а также через параметры, определяющие условия работы машины на объекте:  $\sum V_j$ ;  $\lambda$ .

На основе показателя  $T_{зчс}$  определим области рационального применения многофункциональных РТК с разными типами сменного оборудования. В соответствии с методикой определения этих областей из выражений критерия  $T_{зчс}$  попарно сравним РТК с различным оборудованием, т.е. составим уравнение границы их областей рационального применения, где суммарные показатели времени равны. Обозначая одну из машин индексом  $k$ , а вторую машину индексом  $(k+1)$ , по условию  $T_{зчс k} = T_{зчс(k+1)}$  на основании формулы (5) приравниваем правые части, составленные для двух РТК:

$$\sum \frac{V_j}{\Pi_{зчс k}} + \lambda t_{зам k} + \frac{S_{зчс}}{v_{тр k}} = \sum \frac{V_j}{\Pi_{зчс(k+1)}} + \lambda t_{зам(k+1)} = \frac{S_{зчс}}{v_{тр(k+1)}}$$

Отсюда находим уравнение границы областей рационального применения:

$$\lambda_{\text{Гр}} = \frac{(\Pi_{\text{Зчс}k} - \Pi_{\text{Зчс}(k+1)}) \cdot \Sigma V_j \cdot \frac{S_{\text{Зчс}}}{v_{\text{Гр}k}} \cdot \frac{S_{\text{Зчс}}}{v_{\text{Гр}(k+1)}}}{t_{k+1} - t_k} \quad (6)$$

Уравнение (6) определяет граничное сочетание значений независимых параметров  $\lambda$  и  $\Sigma V_j$ , при котором затраты  $T_{\text{Зчс}}$  сопоставляемых машин  $k$  и  $(k+1)$  равны.

**Пример применения методического подхода через анализ графика расчетных данных.** В ходе исследования были проведены расчеты в которых сравнивались возможности по выполнению работ по снятию и контейнеризованию загрязненных грунтов с выполнением штатного и двухчелюстного ковшей. Полученные данные представлены на графике (рис. 2). Анализ данного графика показывает что, при сопоставлении областей рационального применения РТК с набором быстросменного рабочего оборудования (1) и многоцелевого оборудования в виде двухчелюстного ковша (2) видно, что область рационального применения оборудования (2) находится в зоне малых объемов работ, когда продолжительность замены сменного рабочего оборудования имеет существенное значение. Быстросменное рабочее оборудование (1) с немного большими затратами времени на одну замену по сравнению с оборудованием (2) выгодно на повышенных объемах работ, когда эти затраты времени становятся менее влияющими. С увеличением числа замен области рационального применения (1) и (2) расширяются. Значительные потери времени на каждой замене обычного сменного рабочего оборудования с шарнирно-пальцевым креплением отодвигают его области рационального применения (3) в зону еще больших объемов, хотя оно и дешевле по сравнению с быстросменным рабочим оборудованием. При этом с увеличением числа замен существенно увеличиваются и общие потери времени на замены, поэтому области рационального применения (3) сужаются вверху. Если на объекте производится всего одна замена, то сменное рабочее оборудование с шарнирно-пальцевым креплением всегда выгоднее всех других типов рабочего оборудования (область 3 на рис. 2).

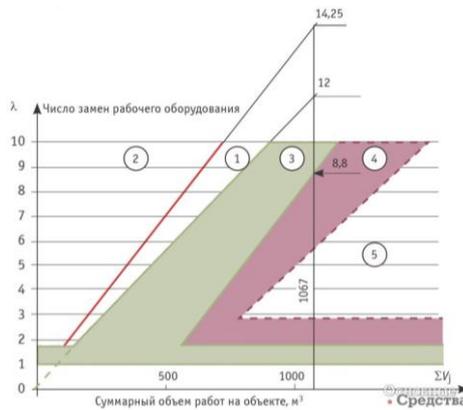


Рис. 2. Графики областей рационального применения многофункциональных дорожно-строительных машин с разными типами сменного рабочего оборудования

Двойное независимое рабочее оборудование на многофункциональных машинах выгодно на повышенных объемах работ, так как эти РТК более дорогие и дороже обходится их перебазирование. Граница 3/4 зависит также от типа навески сменного рабочего оборудования на каждом из рабочих органов.

В зоне еще больших объемов работ находится область рационального применения (5) РТК с комплектом независимо установленных рабочих органов.

Если в зоне ЧС используют только два рабочих органа, то двойное независимое рабочее оборудование выгоднее комплекта независимо установленных рабочих органов (область 4, см. рис. 2).

Графики областей рационального применения, таким образом, наглядно представляют возможности многофункциональных РТК и сменного рабочего оборудования и позволяют оперативно подобрать многофункциональную машину и сменное оборудование к ней из имеющихся в наличии машин по двум параметрам – суммарному объему работ  $\sum V_j$  и числу замен рабочего оборудования  $\lambda$ , необходимому для выполнения разнотипных работ на объекте.

По графикам областей рационального применения, построенным для типичных или часто повторяющихся технологических операций, можно судить об оптимальном составе оборудования РТК.

Границы областей рационального применения на графиках, зависят от стоимостных показателей РТК и рабочего оборудования, от набора технологических операций и их доли в общем объеме при ликвидации ЧС. При изменении этих параметров графики надо перестраивать заново.

При разовом сопоставлении и выборе многофункциональных РТК и сменного оборудования для конкретной ЧС можно без построения графиков областей рационального применения определить время на ликвидацию ЧС по формуле (5) или (7).

**Алгоритм расчетов.** Последовательность процедур и расчетов по подбору сменного оборудования для РТК представлена в виде блок-схемы алгоритма на рис. 3.

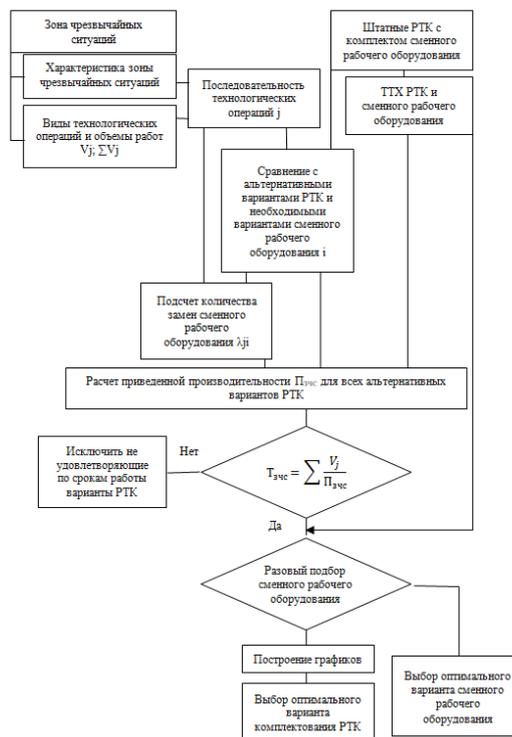


Рис. 3. Блок-схема алгоритма подбора оптимального варианта сменного рабочего оборудования для РТК, предназначенного для ведения аварийно-спасательных работ в зоне ЧС

Предварительный анализ показывает, что массогабаритные показатели экспериментальной робототехнической платформы «Маркер» в значительной мере соответствуют аналогичным показателям малогабаритных универсальных погрузчиков типа Bobcat S590 Bobcat S630 [21]. Исходя из этого можно предположить, что комплект навесного и съемного рабочего оборудования можно рассматривать в качестве основы для адаптации экспериментальной робототехнической платформы «Маркер» для решения задач выполняемых в ходе ликвидации ЧС.

Типовой комплект такого оборудования включает: молот гидравлический; захват промышленный; захват штыковой; устройство наклона ковша Tilt Tatch; бункер самосвальный; культиватор роторный; ковш общего назначения; дисковая фреза; ковш каркасный; бетонолом; вилы палетные с гидравлическим сдвигом; бур шнековый; кирковщик; фреза для вырезания люков; ковш низкопрофильный; ковш двухчелюстной; отвал бульдозерный; захват для бревен; стальные гусеницы; обратная лопата; ковш строительный/промышленный; отвал снегоуборочный V-образный; траншекопатель.

**Заключение.** В настоящее время существует большой набор специализированных рабочих органов, навесного и съемного специализированного оборудования, которое позволяет достаточно эффективно выполнять технологические операции в ходе ведения аварийно-спасательных работ в зоне ЧС. Однако массогабаритные показатели полного комплекта такого оборудования кратно превышают аналогичные показатели самого РТК. И поэтому использование всего комплекта практически невозможно, в первую очередь в связи с проблемами, возникающими при транспортировке. Предлагаемый метод позволяет рассчитать и сформировать оптимальные комплекты оборудования для РТК увязанные с их массогабаритными показателями.

При этом в целом применение мобильных наземных автономных РТК для ликвидации чрезвычайных ситуаций техногенного и природного характера приобретает все большую актуальность [1]. И решение задачи по оптимизации рабочих органов, навесного и съемного специализированного оборудования позволит определить требования связанные с адаптацией экспериментальных автономных платформ, их доработку путем обеспечения возможности навески типового оборудования, применяемого в аварийно-спасательных машинах, разработку гидропривода управления этим оборудованием, усиление корпуса в местах крепления навесного и съемного оборудования, создание специального программного обеспечения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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. Переяслов А.Н. Основные цели и задачи развития робототехнических средств для решения задач МЧС России // I Международная научно-практическая конференция по развитию робототехники в области обеспечения безопасности жизнедеятельности «RoboEmercom»: Сб. материалов конференции. МЧС России. – М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2021. – С. 196-175.
3. Rekleitis I., New A.P., Rankin E.S., Choset H. Efficient Boustrophedon Multi-Robot Coverage: an algorithmic approach // Ann Math Artif Intell. – 2008. – 52: 109. – <https://doi.org/10.1007/s10472-009-9120-2>.
4. Hazon N. Robust and Efficient Multi-Robot Coverage. – Gal A. Kaminka's Publications, 2005. – <http://u.cs.biu.ac.il/~galk/Publications/Papers/noam-msc.pdf>.
5. Тодосейчук С.П., Самойлов К.И., Климачева Н.Г. и др. Научно-методические основы создания и применения робототехнических средств для решения задач МЧС России. МЧС России. – М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2011. – 192 с.

6. Charles M.C., Zurawski C.W., Dobeck G.J., Weilert D.R. Real-Time Performance of Fusion Algorithms for Computer Aided Detection and Classification of Bottom Mines in the Littoral Environment // Proceedings of the OCEANS'03 Conference. – San-Diego, USA: MTS/IEEE, 2003. – P. 1119-1125.
7. Пилюхов В.Х., Медведев М.Ю. Децентрализованное управление группой однородных подвижных объектов в двумерной среде с препятствиями // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – Т. 17, № 5. – С. 346-353.
8. Galceran E., Carreras M. A survey on coverage path planning for robotics // Robotics and Autonomous Systems. – December 2013. – Vol. 61, Issue 12. – P. 1258-1276. – <https://doi.org/10.1016/j.robot.2013.09.004>.
9. Atkar P.N., Conner D.C., Greenfield A., Choset H., Rizzi A.A. Hierarchical Segmentation of Piecewise Pseudoextruded Surfaces for Uniform Coverage // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. – March 2008. – Vol. 6. – P. 107-120.
10. <https://fpi.gov.ru/projects/fiziko-tekhnicheskie-issledovaniya/marker/>.
11. 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.
12. Справочник спасателя: Кн. 2: Спасательные работы при ликвидации последствий землетрясений, взрывов, бурь, смерчей и тайфунов. ВНИИ ГОЧС. – М., 1995. – 195 с.
13. Using robots in hazardous environments. Ed. by Y. Baudion and Maki K. Habib. – Woodhead Publishing Limited, 2011.
14. Acar E.U., Choset H., Rizzi A., Atkar P.N., Hull D. Morse Decompositions for Coverage Tasks // I. J. Robotics Res. – 2002. – Vol. 21. – P. 331-344.
15. Исследование операций: учебник / под ред. д-ра техн. наук профессора Юркова Б.Н. – М.: Издание ВИА. – 1990.
16. Казанцев А.К., Киселев В.Н., Рубвальтер Д.А., Рудневский О.В. NBIC-технологии: Инновационная цивилизация XXI века / под ред. д.э.н. А.К. Казанцева и д.э.н. Д.А. Рубвальтера. – М.: ИНФРА-М, 2012. – 384 с. – (Научная мысль).
17. Дворковой В., Дворковой Д. Многофункциональные дорожно-строительные машины (Ч. 2). Рациональное применение. – <https://os1.ru/article/4482-ratsionalnoe-primeneniemnogofunktsionalnye-dorojno-stroitelnye-mashiny-ch-2>.
18. Дворковой В., Дворковой Д. Многофункциональные дорожно-строительные машины (Ч. 1). Обзор типов сменного рабочего оборудования. – <https://os1.ru/article/4477-obzor-tipov-smennogo-rabochego-oborudovaniya-mnogofunktsionalnye-dorojno-stroitelnye-mashiny-ch-1>.
19. Choset H. Coverage for robotics – A survey of recent results // Annals of Mathematics and Artificial Intelligence. – October 2001. – Vol. 31. – P. 113-126. – <https://doi.org/10.1023/A:1016639210559>.
20. Одинцов Л.Г., Парамонов В.В. Технология и технические средства ведения поисково-спасательных и аварийно-спасательных работ: Справочное пособие. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004, – 232 с.
21. <https://www.bobcat.com/cis/ru/index>.

## REFERENCES

1. Moshkov V.B., Barannik A.Yu. Perspektivy razvitiya sistemy robototekhniki MChS Rossii v interesakh povysheniya effektivnosti vedeniya avariyno-spatatel'nykh работ [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. Pereyaslov A.N. Osnovnye tseli i zadachi razvitiya robototekhnicheskikh sredstv dlya resheniya zadach mchs Rossii [The main goals and objectives of the development of robotic means to solve the problems of the Russian Emergencies Ministry], *I Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya po razvitiyu robototekhniki v oblasti obespecheniya bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti «RoboEmercom»: Sb. materialov konferentsii. MChS Rossii* [I International Scientific and Practical Conference on the Development of Robotics in the Field of Life Safety "RoboEmercom": Collection of materials of the conference]. EMERCOM of Russia. Moscow: FGBU VNII GOChS (FTs), 2021, pp. 196-175.

3. *Rekleitis I., New A.P., Rankin E.S., Choset H.* Efficient Boustrophedon Multi-Robot Coverage: an algorithmic approach, *Ann Math Artif Intell.*, 2008, 52: 109. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10472-009-9120-2>.
4. *Hazon N.* Robust and Efficient Multi-Robot Coverage. Gal A. Kaminka's Publications, 2005. Available at: <http://u.cs.biu.ac.il/~galk/Publications/Papers/noam-msc.pdf>.
5. *Todoseychuk S.P., Samoylov K.I., Klimacheva N.G.* i dr. Nauchno-metodicheskie osnovy sozdaniya i primeneniya robototekhnicheskikh sredstv dlya resheniya zadach MChS Rossii. MChS Rossii [Scientific and methodological foundations for the creation and use of robotic tools for solving the problems of the Ministry of Emergency Situations of Russia]. EMERCOM of Russia. Moscow: FGBU VNII GOChS (FTs), 2011, 192 p.
6. *Charles M.C., Zurawski C.W., Dobeck G.J., Weilert D.R.* Real-Time Performance of Fusion Algorithms for Computer Aided Detection and Classification of Bottom Mines in the Littoral Environment, *Proceedings of the OCEANS'03 Conference*. San-Diego, USA: MTS/IEEE, 2003, pp. 1119-1125.
7. *Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu.* Detsentralizovannoe upravlenie gruppy odnorodnykh podvizhnykh ob"ektov v dvumernoy srede s prepyatstviyami [Decentralized control of a group of homogeneous moving objects in a two-dimensional environment with obstacles], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2016, Vol. 17, No. 5, pp. 346-353.
8. *Galceran E., Carreras M.* A survey on coverage path planning for robotics, *Robotics and Autonomous Systems*, December 2013, Vol. 61, Issue 12, pp. 1258-1276. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2013.09.004>.
9. *Atkar P.N., Conner D.C., Greenfield A., Choset H., Rizzi A.A.* Hierarchical Segmentation of Piecewise Pseudoextruded Surfaces for Uniform Coverage, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, March 2008, Vol. 6, pp. 107-120.
10. Available at: <https://fpi.gov.ru/projects/fiziko-tekhnicheskie-issledovaniya/marker/>.
11. *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 sektsii № 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.
12. *Spravochnik spasatelya: Kn. 2: Spasatel'nye raboty pri likvidatsii posledstviy zemletryaseniy, vzyrovov, bur', smerchey i tayfunov* [Rescuer's Handbook: Book 2: Rescue work in the aftermath of earthquakes, explosions, storms, tornadoes and typhoons]. VNII GOChS. Moscow, 1995, 195 p.
13. Using robots in hazardous environments. Ed. by Y. Baudion and Maki K. Habib. Woodhead Publishing Limited, 2011.
14. *Acar E.U., Choset H., Rizzi A., Atkar P.N., Hull D.* Morse Decompositions for Coverage Tasks, *I. J. Robotics Res.*, 2002, Vol. 21, pp. 331-344.
15. *Issledovanie operatsiy: uchebnik* [Operations research. Textbook], ed. by dr. of eng. sc., professor Yurkov B.N. Moscow: Izdanie VIA, 1990.
16. *Kazantsev A.K., Kiselev V.N., Rubval'ter D.A., Rudnevskiy O.V.* NBIC-tehnologii: Innovatsionnaya tsivilizatsiya XXI veka [NBIC Technologies: Innovative Civilization of the 21st Century], ed. by dr. of econ. sc. A.K. Kazantseva and dr. of econ. sc. D.A. Rubwalter. Moscow: INFRA-M, 2012, 384 p. (Scientific thought).
17. *Dvorkovoy V., Dvorkovoy D.* Mnogofunktsional'nye dorozhno-stroitel'nye mashiny (Ch. 2). Ratsional'noe primeneniye [Multifunctional road construction machines (Part 2). Rational application]. Available at: <https://os1.ru/article/4482-ratsionalnoe-primeneniye-mnogofunktsionalnyeh-dorozhno-stroitelnyeh-mashin-ch-2>.
18. *Dvorkovoy V., Dvorkovoy D.* Mnogofunktsional'nye dorozhno-stroitel'nye mashiny (Ch. 1). Obzor tipov smennogo rabocheho oborudovaniya [Multifunctional road construction machines (Part 1). An overview of the types of interchangeable working equipment]. Available at: <https://os1.ru/article/4477-obzor-tipov-smennogo-rabocheho-oborudovaniya-mnogofunktsionalnyeh-dorozhno-stroitelnyeh-mashin-ch-1>.

19. Choset H. Coverage for robotics – A survey of recent results, *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, October 2001, Vol. 31, pp. 113-126. Available at: <https://doi.org/10.1023/A:1016639210559>.
20. Odintsov L.G., Paramonov V.V. *Tekhnologiya i tekhnicheskie sredstva vedeniya poiskovo-spasatel'nykh i avariyno-spasatel'nykh robot: Spravochnoe posobie [Technology and technical means of conducting search and rescue and rescue operations: a reference guide]*. Moscow: Izd-vo NTS ENAS, 2004, 232 p.
21. Available at: <https://www.bobcat.com/cis/ru/index>.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Овчинников.

**Баранник Александр Юрьевич** – Федеральное государственное бюджетное учреждение Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, федеральный центр науки и высоких технологий (ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ)); e-mail: [auba@yandex.ru](mailto:auba@yandex.ru); г. Москва, Россия; тел.: 89166951214; к.т.н., с.н.с.; ведущий научный сотрудник 6 научно-исследовательского центра.

**Лагутина Анна Викторовна** – e-mail: [anya-lagutina@yandex.ru](mailto:anya-lagutina@yandex.ru); тел.: 89057118834; старший научный сотрудник 6 научно-исследовательского центра.

**Дудоров Евгений Александрович** – Научно-производственное объединение «Андроидная техника»; e-mail: [dudorov@npo-at.com](mailto:dudorov@npo-at.com); г. Москва, Россия; тел. 8904974-7199; к.т.н.; доцент; исполнительный директор.

**Barannik Alexander Yuryevich** – Federal State Budgetary Establishment «All-Russian Scientific Research Institute for Civil Defense and Emergency of the EMERCOM of Russia» (Federal Science and High Technologies Center) (VNI GOChS (FC)); e-mail: [auba@yandex.ru](mailto:auba@yandex.ru); Moscow, Russia; phone: +79166951214; cand. of eng. sc.; senior researcher; leading researcher of the 6th Research Center.

**Lagutina Anna Viktorovna** – e-mail: [anya-lagutina@yandex.ru](mailto:anya-lagutina@yandex.ru); phone: +79057118834; senior researcher of the 6th Research Center.

**Dudorov Evgeny Alexandrovich** – Scientific and Production Association "Android technology"; e-mail: [dudorov@npo-at.com](mailto:dudorov@npo-at.com); Moscow, Russia; phone: +79049747199; cand. of eng. sc.; associate professor; Executive Director.

УДК 007:52

DOI 10.18522/2311-3103-2022-1-192-204

**А.А. Кабанов, А.В. Зуев, А.Н. Жирабок, В.Ф. Филаретов, В.А. Крамарь**

## **ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДЕФЕКТОВ В ПРИВОДАХ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ**

*В работе рассматривается задача идентификации дефектов в приводах робототехнических систем, модель динамики которых описывается линейными дифференциальными уравнениями. Решение задачи идентификации дефектов предложено искать на основе решения вспомогательной задачи оптимального управления для динамической системы, в которой роль неизвестной вектор-функции, описывающей возникающие дефекты, выполняет некоторое вспомогательное управление, которое должно обеспечить минимум функционалу невязки. На основе полученного решения вспомогательной задачи оптимального управления предложен диагностический наблюдатель дефектов. При этом сам дефект находится через решение соответствующего алгебраического уравнения Риккати и дифференциального уравнения для вспомогательной переменной. В отличие от популярных подходов к решению задачи идентификации дефектов, основанных на наблюдателях, работающих в скользящем режиме, предлагаемый метод позволяет расширить класс систем, для которых может быть решена задача идентификации. Известно, что методы проектирования наблюдателей скользящего режима накладывают определенные ограниче-*

ния на рассматриваемые системы. Предложенный подход на основе оптимального управления может дать результаты и для систем с нелинейной динамикой. В этом случае, вероятно, эффективными будут методы приближенного решения задач оптимального управления, основанные на представлении системы в линейной форме с коэффициентами, зависящими от состояния (так называемый метод *State-dependent Riccati Equation, SDRE*). Совершенствование предложенного метода в этом направлении будет являться предметом последующих исследований. Изложенная теория показана на примере идентификации дефектов в приводе постоянного тока. Рассмотрены разные случаи для системы с полными наблюдениями (известен весь вектор состояния) и с неполными наблюдениями. На моделировании было показано, что качество идентификации дефектов можно повысить за счет выбора соответствующих значений матриц штрафов в функционале невязки, при этом можно добиться хорошего диагностирования отдельно по различным каналам входа дефектов. В работе представлены рекомендации по выбору матриц штрафов. Результаты моделирования подтвердили работоспособность синтезированных с помощью предложенного метода диагностических наблюдателей.

*Линейные системы; дефекты; идентификация; наблюдатели; оптимальное управление; привод.*

**A.A. Kabanov, A.V. Zuev, A.N. Zhirabok, V.F. Filaretov, V.A. Kramar**

#### **IDENTIFICATION OF FAULTS IN DRIVES BASED ON OPTIMAL CONTROL METHODS**

*The paper exams the problem of identifying faults in the drives of robotic systems, the dynamics model of which is described by linear differential equations. It is proposed to search for a solution to the fault identification problem based on the solution of an auxiliary optimal control problem for a dynamical system in which the role of an unknown vector function describing emerging faults is performed by some auxiliary control, which should provide a minimum for the residual functional. Based on the solution of the auxiliary optimal control problem, a fault diagnostic observer is proposed. In this case, the fault itself is found through the solution of the corresponding algebraic Riccati equation and the differential equation for the auxiliary variable. Unlike popular approaches to solving the problem of fault identification based on observers operating in a sliding mode, the proposed method allows us to expand the class of systems for which the identification problem can be solved. It is known that the methods of sliding mode observers design impose certain restrictions on the systems under consideration. The proposed approach based on optimal control can also give results for systems with nonlinear dynamics. In this case, methods of approximate solution of optimal control problems based on the representation of the system in linear form with state-dependent coefficients (the so-called *State-dependent Riccati Equation, SDRE*) are likely to be effective. The improvement of the proposed method in this direction will be the subject of further research. The stated theory is shown on the example of fault identification in a DC drive. Different cases are considered for a system with complete observations (the entire state vector is known) and with incomplete observations. It was shown during the simulation that the quality of faults identification can be improved by selecting the appropriate values of the penalty matrices in the residual functional, while it is possible to achieve good diagnostics separately through various channels of faults occurrence. The paper presents recommendations on the choice of penalty matrices. The simulation results confirmed the operability of the diagnostic observers synthesized using the proposed method.*

*Linear systems; defects; identification; observers; optimal control; drive.*

**Введение.** Различные промышленные предприятия в повседневной деятельности используют множество сложных устройств и установок. На этих установках могут возникать различные неисправности и дефекты, вызванные специфическими условиями окружающей среды и внутренними условиями. Из-за таких дефектов поведение объекта может существенно отличаться от заданного. Сами эти дефекты могут возникать в различных компонентах систем, в частности, в исполнитель-

ных механизмах и датчиках, инициируя неожиданные изменения параметров системы. Для предотвращения критических повреждений систем следует использовать методы обнаружения и идентификации этих дефектов.

Сегодня разработано множество методов идентификации; один из них основан на наблюдателях, работающих в скользящем режиме, и использует особенности скользящего движения [1]. Эти наблюдатели используются для оценки состояния и неизвестных входных данных, идентификации неисправностей и управления отказоустойчивостью в различных системах [2–10]. Чтобы гарантировать существование скользящего движения, система должна быть минимально-фазовой, то есть инвариантные нули системы должны быть устойчивыми; кроме того, должно выполняться условие соответствия [11]. Эти требования накладывают ограничения на класс систем, для которых могут быть разработаны такие наблюдатели, работающие в скользящем режиме.

Чтобы ослабить условие соответствия, были разработаны различные методы [5, 12–15]. Эти методы позволяют решить проблему за счет сложной структуры схемы идентификации неисправностей. Кроме того, система все же должна быть минимально-фазовой, и при этом могут возникнуть большие ошибки идентификации. Условие минимально-фазовости смягчено в [16] и [17] до требования только сильной обнаруживаемости и обнаруживаемости соответственно.

В данной работе для решения задачи идентификации дефектов предлагается новый подход, основанный на методах оптимального управления. При этом идентификация дефектов выполняется на основе решения вспомогательной задачи оптимального управления для динамической системы, в которой роль неизвестной вектор-функции, описывающей возникающие дефекты, выполняет некоторое вспомогательное управление, которое должно обеспечить минимум функционалу невязки. На основе полученного решения вспомогательной задачи оптимального управления в работе предложен диагностический наблюдатель дефектов. При этом сам дефект находится через решение соответствующего уравнения Риккати и дифференциального уравнения для вспомогательной переменной.

Предложенный метод позволяет расширить класс систем, для которых может быть решена задача идентификации дефектов.

**Постановка задачи.** Рассмотрим класс технических систем, описываемых линейной моделью вида

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Dd(t), \quad x(t_0) = x_0, \\ y(t) &= Cx(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $x(t) \in R^n$ ,  $u(t) \in R^m$  и  $y(t) \in R^l$  – векторы состояния, управления и выхода, соответственно;  $A \in R^{n \times n}$ ,  $B \in R^{n \times m}$ ,  $D \in R^{n \times q}$  и  $C \in R^{l \times n}$  – известные постоянные матрицы;  $d(t) \in R^q$  – вектор-функция, описывающая дефекты: при их отсутствии  $d(t) = 0$ , при появлении дефекта  $d(t)$  становится неизвестной функцией времени. Предполагается, что матрица  $D$  и функция  $d(t)$  описывают дефекты, которые возможны в системе, причем заранее неизвестно, какой из них может возникнуть.

Пусть известна история измерений  $y(t)$  фазовых переменных  $x(t)$  системы (1) на интервале  $t \in [t_0, t_f]$ , на котором система управляется некоторым законом, который, не умаляя общности, можно представить в виде  $u(t) = G(y, t)$ .

В работе ставится задача разработки метода построения наблюдателей для идентификации элементов вектора  $d(t)$ . Задача состоит в нахождении по измерениям  $y(t)$  такой аппроксимации  $d_*(t, t_f)$  неизвестной функции дефекта  $d(t)$ , что

$$\lim_{t_f \rightarrow \infty} d_*(t, t_f) = d(t).$$

**Вспомогательная задача оптимального управления.** Для решения задачи идентификации дефектов в системе (1) рассмотрим вспомогательную задачу оптимального управления для системы

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= Az + B_v v(t) + Bu(t), \quad z(t_0) = x_0, \\ y_z(t) &= Cz(t), \end{aligned} \quad (2)$$

где функция  $v(t)$  рассматривается как вспомогательное управление; матрица  $B_v \in R^{n \times w}$  определяет в каких уравнениях предполагается выявлять дефект. В случае если известна матрица  $D \in R^{n \times q}$ , то следует принять  $B_v = D$  (далее будем считать, что  $B_v = D$ ). В противном случае  $B_v$  заполняется так, что элемент  $[B_v]_{i,j} = 1$ , если предполагаем что дефект  $j$  возникает в уравнении  $i$ , остальные элементы заполняются нулями.

Роль неизвестной вектор-функции  $d(t)$ , описывающей дефекты в (1), в системе (2) выполняет вспомогательное управление  $v(t)$ , которое выбирается так, чтобы перевести систему (2) из произвольного состояния  $z(t_0) = x_0$  в состояние  $y_z(t_f) = y(t_f)$  при  $t_f \rightarrow \infty$  и при этом минимизировать функционал невязки

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} (e^T Q e + v^T R v) dt \rightarrow \min_v, \quad (3)$$

где  $e(t) = y_z(t) - y(t) \in R^l$  – вектор невязки,  $Q \in R^{n \times n}$  – положительно-полуопределённая матрица;  $R \in R^{m \times m}$  – положительно определенная матрица;  $T$  – символ транспонирования.

Связь возмущенной дефектами динамической системы (1) с соответствующей вспомогательной задачей оптимального управления (2), (3) означает, что траектории вспомогательной системы оптимального управления могут рассматриваться как отклонения от невозмущенного состояния системы (1) под влиянием дефектов. Таким образом, система со вспомогательным законом оптимального управления позволяет оценивать дефекты. В определенном смысле аналогичный подход используется в задачах анализа больших отклонений [18, 19].

Задача идентификации дефектов состоит в том, чтобы как можно более точно восстановить по измерениям  $y(t)$  движение  $z(t)$  вспомогательной системы (2), т.е. нужно построить оптимальное в смысле (3) управление  $v(t)$  и порождаемую им траекторию системы (2) такие, что  $\|y_z(t) - y(t)\| \rightarrow 0$ ,  $\|v(t) - d(t)\| \rightarrow 0$  при  $t_f \rightarrow \infty$ .

**Решение вспомогательной задачи оптимального управления.** По сути задача (2), (3) является задачей построения линейно-квадратичного управления для следящей системы с возмущениями. Приведем ее решение.

Для задачи (2), (3) запишем Гамильтониан

$$H = \frac{1}{2} (z - x)^T C^T Q C (z - x) + \frac{1}{2} v^T R v + \lambda^T (Az + Dv + Bu),$$

определим оптимальное управление

$$\frac{\partial H}{\partial v} = 0 \Rightarrow Rv + D^T \lambda = 0 \Rightarrow v = -R^{-1} D^T \lambda, \quad (4)$$

а также составим уравнения для сопряженной переменной и переменной состояния:

$$\begin{aligned}\dot{z}(t) &= \frac{\partial H}{\partial \lambda} \Rightarrow Az + Dv + Bu = Az - DR^{-1}D^T \lambda + Bu, \quad z(t_0) = x_0, \\ \dot{\lambda}(t) &= -\frac{\partial H}{\partial z} \Rightarrow \dot{\lambda}(t) = -A^T \lambda - C^T Q C z + C^T Q C x.\end{aligned}$$

Последнее соотношение можно записать в векторно-матричном виде

$$\begin{bmatrix} \dot{z}(t) \\ \dot{\lambda}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & -DR^{-1}D^T \\ -C^T Q C & -A^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z(t) \\ \lambda(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ C^T Q \end{bmatrix} y. \quad (5)$$

**Общий случай задания граничных условий.** Рассмотрим общий случай ненулевых граничных условий  $z(t_0) \neq 0$ ,  $z(t_f) \neq 0$ . С учетом линейности системы (5) предположим, что состояние и сопряженная переменная линейно связаны зависимостью вида

$$z(t) = M(t)\lambda(t) + g(t), \quad (6)$$

где  $M(t)$  – невырожденная матрица,  $g(t)$  – некоторая вектор-функция. Отметим, преобразование (6) называют преобразованием Риккати, оно эффективно при вычислении плохо обусловленных двухточечных краевых задач [20]. Аналогичный подход используется в [21, 22] для специфических задач терминального управления.

Подставим (6) в (5) и получим

$$\begin{aligned}v(t) &= -R^{-1}D^T M(t)^{-1}(z(t) - g(t)), \\ (-\dot{M}(t) + AM(t) + M(t)A^T - DR^{-1}D^T + M(t)C^T Q C M(t))\lambda(t) &= \\ &= \dot{g}(t) - Ag(t) - Bu(t) - M(t)C^T Q C g(t) + M(t)C^T Q y(t).\end{aligned}$$

Перенеся члены второго уравнения в левую часть, имеем

$$\begin{aligned}(-\dot{M}(t) + AM(t) + M(t)A^T - DR^{-1}D^T + M(t)C^T Q C M(t))\lambda(t) - \\ \dot{g}(t) - Ag(t) - Bu(t) - M(t)C^T Q C g(t) + M(t)C^T Q y(t) = 0.\end{aligned}$$

Последнее соотношения должно быть справедливо для любого значения  $\lambda(t)$ , что приводит к системе уравнений:

$$\begin{aligned}\dot{M}(t) &= AM(t) + M(t)A^T - DR^{-1}D^T + M(t)C^T Q C M(t), \\ \dot{g}(t) &= Ag(t) + Bu(t) + M(t)C^T Q C g(t) - M(t)C^T Q y(t).\end{aligned} \quad (7)$$

При  $t = t_0$  из (6) имеем  $z(t_0) = M(t_0)\lambda(t_0) + g(t_0)$ , а поскольку  $\lambda(t_0)$  не известна, то для удовлетворения начальных условий нужно принять  $M(t_0) = 0$ ,  $z(t_0) = g(t_0)$ .

При  $t = t_f$  из (6) имеем  $z(t_f) = M(t_f)\lambda(t_f) + g(t_f)$ , а поскольку  $\lambda(t_f)$  также является неизвестным, то для удовлетворения граничных условий также следует принять  $M(t_f) = 0$ ,  $z(t_f) = g(t_f)$ .

Подставляя (7) в (4), окончательно для управления  $v(t)$  имеем:

$$v(t) = -R^{-1}D^T M(t)^{-1}(z(t) - g(t)). \quad (8)$$

Подставляя (8) в (2), получаем следующее выражение для диагностического наблюдателя

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= Az(t) - DR^{-1}D^T M(t)^{-1}(z(t) - g(t)) + Bu(t), \quad z(t_0) = x_0, \\ y_z(t) &= Cz(t), \end{aligned} \quad (9)$$

где  $M(t)$  и  $g(t)$  определяются как решение уравнений (7) с начальными условиями  $M(t_0) = 0$ ,  $z(t_0) = g(t_0)$ . Устойчивость наблюдателя (9) может быть обеспечена за счет введения обратной связи по сигналу  $e(t) = y_z(t) - y(t)$ ; этот вопрос требует самостоятельного рассмотрения.

Чтобы получить решение задачи (2), (3) при  $t_f \rightarrow \infty$  в соотношениях (7), (8) нужно принять  $t_f \rightarrow \infty$ . Решение матричного уравнения (7) для  $M(t)$  при условии управляемости и наблюдаемости системы (2) стремится к установившемуся значению  $\bar{M}$ , которое является решением алгебраического уравнения [21, 22]

$$0 = A\bar{M} + \bar{M}A^T - DR^{-1}D^T + \bar{M}C^T Q C \bar{M}, \quad (11)$$

а функция  $g(t)$  – это решение дифференциального уравнения

$$\dot{\bar{g}} = A\bar{g} + Bu + \bar{M}C^T Q C \bar{g} - \bar{M}C^T Q y, \quad \bar{g}(t_0) = z(t_0). \quad (12)$$

Диагностический наблюдатель на бесконечном интервале времени будет иметь вид (9), в котором  $g$  и  $M$  заменены на  $\bar{g}$  и  $\bar{M}$  соответственно.

**Пример применения для идентификации дефектов в электроприводе.** Предложенный метод демонстрируется на решении задачи идентификации дефектов в электроприводе постоянного тока. Ниже дано описание электропривода на основе двигателя постоянного тока независимого возбуждения.

Уравнение электрической цепи:

$$L_d \frac{dI(t)}{dt} + R_d(t) + k_\omega \omega(t) = k_y U(t).$$

Уравнение механической цепи:

$$M_d(t) = k_m I(t) = J_d \dot{\omega}(t),$$

где  $\omega(t)$ ,  $\dot{\omega}(t)$  – соответственно, скорость и ускорение вращения ротора электродвигателя;  $I_y$  – ток якоря электродвигателя;  $R_d$  – активное сопротивление цепи якоря;  $L_d$  – индуктивность цепи якоря;  $k_\omega$  – коэффициент противо-э.д.с.;  $k_y$  – коэффициент усиления усилителя мощности;  $M_d$  – общий момент, развиваемый электродвигателем;  $k_m$  – коэффициент крутящего момента;  $J_d$  – момент инерции ротора электродвигателя и вращающихся частей редуктора, приведенный в этому ротору;  $U(t)$  – входное напряжение электропривода;

После введения фазовых координат  $x_1(t) = \alpha_n(t)$ ,  $x_2(t) = \omega(t)$  и  $x_3(t) = I(t)$ , модель можно представить в нормальной форме

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= \frac{1}{i_p} x_2(t), \quad \dot{x}_2(t) = \frac{k_m}{J_d} x_3(t), \\ \dot{x}_3(t) &= -\frac{k_\omega}{L_d} x_2(t) - \frac{R_d}{L_d} x_3(t) + \frac{k_y}{L_d} u(t). \end{aligned}$$

Далее модель можно переписать в матричной форме

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t), \\ y(t) &= Cx(t), \end{aligned} \quad (14)$$

где  $A \in R^{3 \times 3}$  – матрица динамических свойств электропривода;  $x(t) \in R^{3 \times 1}$  – вектор фазовых координат;  $B \in R^{3 \times 1}$  – матрица-столбец коэффициентов усиления при управляющих воздействиях;  $y(t) \in R^{1 \times 1}$  – измеряемые датчиками фазовые коор-

динаты;  $C \in R^{l \times 1}$  – матрица выхода, связывающая вектор фазовых координат с вектором измерений;  $v$  – количество фазовых координат (порядок);  $l$  – количество датчиков, измеряющих фазовые координаты

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1/i_p & 0 \\ 0 & 0 & k_M/J_\partial \\ 0 & -k_\omega/L_\partial & -R_\partial/L_\partial \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ k_y/L_\partial \end{bmatrix}, \quad x = \begin{bmatrix} \alpha_H \\ \dot{\alpha} \\ I \end{bmatrix}, \quad u = U,$$

**Эксперимент 1 (полные измерения состояния системы).** Предполагаем, что в системе наблюдаемы все переменные состояния, т.е.  $y = x$ . Система управляется некоторым регулятором по первой переменной состояния, заданное значение равно единице. При этом предполагаем, что возмущение, инициированное дефектом, может возникнуть в любом из трех уравнений состояния, в такой ситуации выберем  $B_v = E$ , где  $E$  – единичная  $3 \times 3$  матрица.

Общий вид вектор-функции  $d(t)$ , описывающей дефекты, приведен на рис. 1, при этом матрица распределения сигналов дефектов в системе (1) сгенерирована случайным образом и равна

$$D = \begin{bmatrix} 0.965 & 0.957 & 0.142 \\ 0.158 & 0.485 & 0.422 \\ 0.971 & 0.8 & 0.916 \end{bmatrix}.$$

Для исследования влияния матриц штрафов  $Q$ ,  $R$  в критерии качества наблюдения (2) примем матрицы равными единичным соответствующих размерностей, результат моделирования показан на рис. 2, откуда видно, что качество оценки дефектов неудовлетворительное.

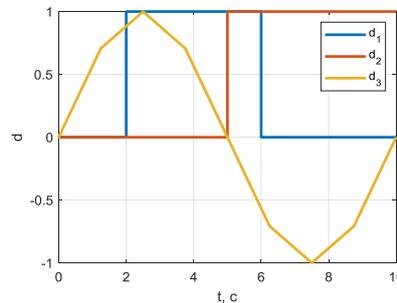


Рис. 1. Вид вектор-функции  $d(t)$

Увеличим коэффициенты штрафа на отклонение между выходом реальной системы и диагностического наблюдателя –  $Q = \text{diag}(1,1,1) \cdot 10^2$ ,  $R = \text{diag}(1,1,1) \cdot 10^5$ , и проведем моделирование повторно. Из результатов (рис. 3) видно, что качество оценки влияния дефекта в первом и втором уравнениях существенно улучшилось, т.е. можно сделать вывод, что добиться нужной точности оценки диагностического наблюдателя для системы (14) можно путем увеличения коэффициентов штрафа в матрице  $Q$ . При этом видно, что оценка влияния дефекта в третьем уравнении практически не изменилась.

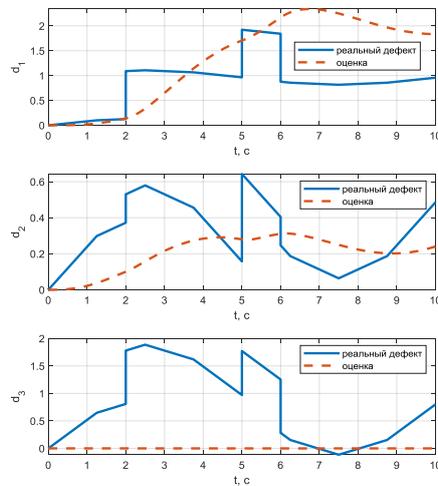


Рис. 2. Результат работы наблюдателя при единичных  $Q, R$

Для повышения качества этой оценки увеличим отдельно третий диагональный коэффициент штрафа в матрице  $Q$  (), и также выполним дополнительную настройку параметров штрафа в матрице  $R$ , соответствующих третьему элементу вектор-функции дефекта. Применив наблюдатель (13) с настроенными таким образом параметрами, получим оценку вектор-функции дефекта (рис. 4). Видно, что функция дефекта в третьем уравнении оценивается с небольшим перерегулированием (около 10 %), качество оценки приемлемое.

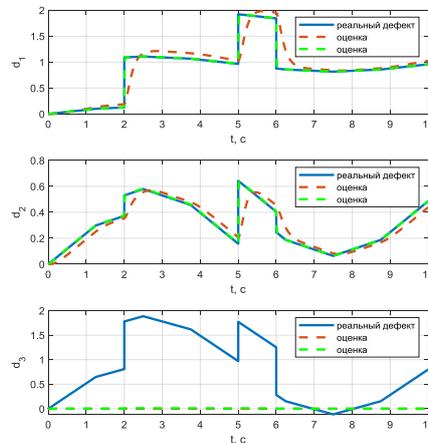


Рис. 3. Результат работы наблюдателя при разных значениях  $Q = \text{diag}(1,1,1)10^2$ ,  $Q = \text{diag}(1,1,1)10^5$ .

**Эксперимент 2 (неполные измерения состояния системы).** Предполагаем, что в системе наблюдаемы только первая и вторая переменные состояния, т.е.  $y=Cx$ . Как и в первом эксперименте предполагаем, что возмущение, инициированное дефектом, может возникнуть в любом из трех уравнений состояния, в такой ситуации выберем  $B_v = E$ , где  $E$  – единичная  $3 \times 3$  матрица, общий вид вектор-функции  $d(t)$ , описывающей дефекты, приведен на рис. 1.

Настройку коэффициентов штрафов возьмем из эксперимента 1. Результат моделирования показан на рис. 5, откуда видно, что оценка дефекта в первом и втором уравнениях по-прежнему хорошего качества, а в уравнении 3 – неудовлетворительного. При этом если сравнить состояния системы и диагностического наблюдателя при влиянии указанных дефектов (рис. 6), видно, что они практически совпадают, т.е. вероятно дефект в третьем уравнении практически не влияет на состояние системы, потому что при неполных измерениях не идентифицируется.

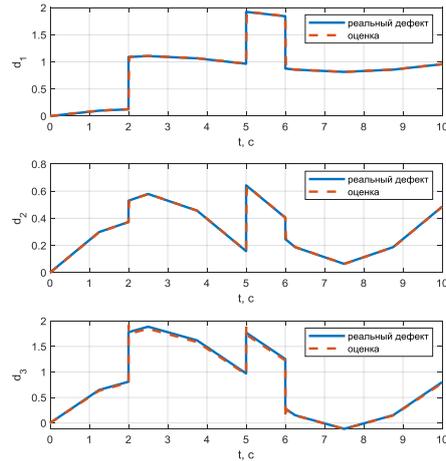


Рис. 4. Результат работы наблюдателя при разных значениях,  $Q = \text{diag}(1,1,1)10^5$ .  $Q = \text{diag}(1,1,1)10^5$ ,  $R$

Предполагаем, что в системе наблюдаемы только первая и третья переменные состояния, т.е.  $y = Cx$ . Как и в первом эксперименте предполагаем, что возмущение, инициированное дефектом, может возникнуть в любом из трех уравнений состояния, в такой ситуации выберем  $B_v = E$ , где  $E$  – единичная  $3 \times 3$  матрица, общий вид вектор-функции  $d(t)$ , описывающей дефекты, приведен на рис. 1.

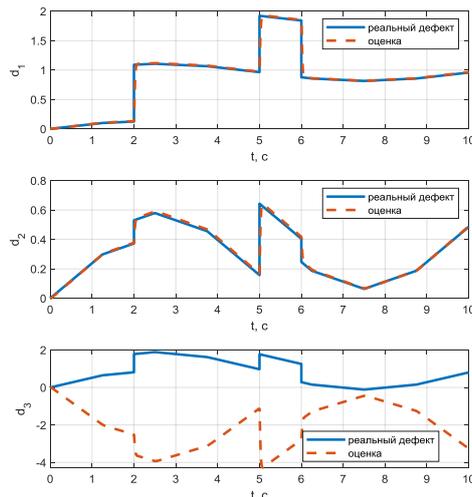


Рис. 5. Результат работы наблюдателя при разных значениях при измерениях первой и второй переменных состояния

Результат показан на рис. 7, видно, что качество идентификации дефекта в первом и во втором уравнениях неудовлетворительное, а в третьем уравнении приемлемое. Здесь специальной настройкой параметров наблюдателя можно добиться приемлемого качества по некоторым из каналов. Требуется дополнительные исследования.

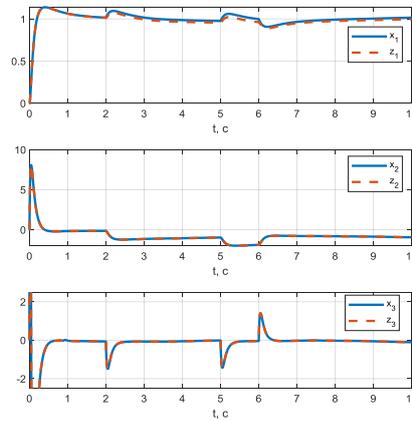


Рис. 6. Графики состояния системы и диагностического наблюдателя

Качество идентификации с использованием оптимального диагностического наблюдателя (9), (11), (12) зависит от выбора матриц штрафов  $Q$  и  $R$ . При их выборе можно руководствоваться следующими рекомендациями. Недиagonальные элементы в этих матрицах отражают перекрестные связи между соответствующими переменными вектора выхода и дефектов. При отсутствии информации о перекрестных связях между дефектами матрицу  $R$  рекомендуется выбирать диагональной, эта рекомендация также относится и к матрице  $Q$  при отсутствии перекрестных связей наблюдаемых выходов. Если восстановленный сигнал, идентифицирующий дефект, имеет большую амплитуду, то соответствующие диагональные элементы  $R$  требуется уменьшить. При больших амплитудах невязки  $e(t) = x(t) - z(t)$  следует увеличить соответствующие элементы  $Q$ .

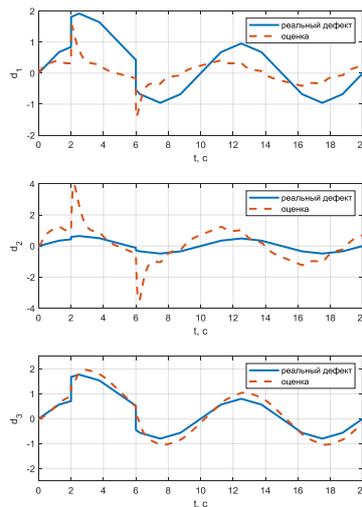


Рис. 7. Результат работы наблюдателя при разных значениях при измерениях первой и третьей переменных состояния

**Заключение.** В работе решена задача идентификации дефектов в системах, описываемых линейными динамическими моделями. Показан пример идентификации дефектов для электропривода на базе двигателя постоянного тока с независимым возбуждением. На основе полученного решения вспомогательной задачи оптимального управления предложен диагностический наблюдатель дефектов. Будущие исследования будут направлены на поиск условий, гарантирующих сходимость вспомогательного оптимального управления к функции дефекта при неполных измерениях системы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение Минобрнауки РФ № 075-03-2021-092/5 от 29.09.2021, FEFM-2021-0014 № 121111600136-3, а также Программа «Приоритет2030».

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Utkin V.* Sliding modes in control optimization. – Berlin: Springer, 1992. – 264 p.
2. *Chan J., Tan C., Trinh H.* Robust fault reconstruction for a class of infinitely unobservable descriptor systems // *Int. J. Systems Science.* – 2017. – Vol. 48 (8). – P. 1646-1655.
3. *Edwards C., Spurgeon S., Patton R.* Sliding mode observers for fault detection and isolation // *Automatica.* – 2000. – Vol. 36. – P. 541-553.
4. *Tan E., Edwards C.* Sliding mode observers for robust detection and reconstruction of actuator and sensor fault // *Int. J. Robust and Nonlinear Control.* – 2003. – Vol. 13 (5). – P.443-463.
5. *Tan C.P., Edwards C.* Robust fault reconstruction using multiple sliding mode observers in cascade: development and design // *Proc. American Contr. Conf., St. Louis, USA, 2009.* – P. 3411-3416.
6. *Yan X., Edwards C.* Nonlinear robust fault reconstruction and estimation using a sliding modes observer // *Automatica.* – 2007. – Vol. 43. – P. 1605-1614.
7. *Alwi H., Edwards C.* Fault tolerant control using sliding modes with on-line control allocation // *Automatica.* – 2008. – Vol. 44. – P. 1859-1866.
8. *Edwards C., Alwi H., and Tan C.* Sliding mode methods for fault detection and fault tolerant control with application to aerospace systems // *Int. J. Applied Mathematics and Computer Sciences.* – 2012. – Vol. 22. – P. 109-124.
9. *Zhirabok A., Zuev A., Shumsky A.* Fault diagnosis in linear systems via sliding mode observers // *Int. J. Control.* – 2021. – Vol. 94. – P. 327-335.
10. *Жирабок А.Н., Зюев А.В., Филаретов В.Ф., Шумский А.Е.* Идентификация дефектов на основе скользящих наблюдателей с ослабленными условиями существования // *Известия вузов. Приборостроение.* – 2021. – Т. 64, № 4. – С. 167-172.
11. *Defoort M., Veluvolu K., Rath J., Djemai M.* Adaptive sensor and actuator fault estimation for a class of uncertain Lipschitz nonlinear systems // *Int. J. Adaptive Control and Signal Processing.* – 2016. – Vol. 30. – P. 271-283.
12. *Bejarano F., Fridman L.* High-order sliding mode observer for linear systems with unbounded unknown inputs // *Int. J. Control.* – 2010. – Vol. 83. – P. 1920-1929.
13. *Floquet T., Edwards C., Spurgeon S.* On sliding mode observers for systems with unknown inputs // *Int. J. Adaptive Control and Signal Processing.* – 2007. – Vol. 21. – P. 638-656.
14. *Fridman L., Levant A., Davila J.* Observation of linear systems with unknown inputs via high-order sliding modes // *Int. J. Systems Science.* – 2007. – Vol. 38. – P. 773-791.
15. *Yang J., Zhu F., Sun X.* State estimation and simultaneous unknown input and measurement noise reconstruction based on associated observers // *Int. J. Adapt Control and Signal Processing.* – 2013. – Vol. 27. – P. 846-858.
16. *Bejarano F., Fridman L., Pozhyak A.* Unknown input and state estimation for unobservable systems // *SIAM J. Control Opt.* – 2009. – Vol. 48. – P. 1155-1178.
17. *Wang X., Tan C., Zhou D.* A novel sliding mode observer for state and fault estimation in systems not satisfying matching and minimum phase conditions // *Automatica.* – 2017. – Vol. 79. – P. 290-295.
18. *Дубовик С.А., Кабанов А.А.* Функционально устойчивые системы управления: асимптотические методы синтеза: монография. – М.: ИНФРА-М, 2019. – 249 с.

19. *Кабанов А.А., Дубовик С.А.* Численные методы контроля редких событий в нелинейных стохастических системах // *Мехатроника, автоматизация, управление.* – 2021. – Т. 22, № 6. – С. 291-297.
20. *Mufti I.H., Chow C.K., Stock F.T.* Solution of ill-conditioned linear two-point boundary value problems by the Riccati transformation // *SIAM Rev.* – 1969. – Vol. 11 (4). – P. 616-619.
21. *Брайсон А., Хо Ю-шун.* Прикладная теория оптимального управления. – М.: Мир, 1972. – 544 с.
22. *Naidu D.S.* Optimal control systems. *Electrical Engineering Handbook.* – Florida, Boca Raton: CRC Press, 2003. – 275 p.

#### REFERENCES

1. *Utkin V.* Sliding modes in control optimization. Berlin: Springer, 1992, 264 p.
2. *Chan J., Tan C., Trinh H.* Robust fault reconstruction for a class of infinitely unobservable descriptor systems, *Int. J. Systems Science*, 2017, Vol. 48 (8), pp. 1646-1655.
3. *Edwards C., Spurgeon S., Patton R.* Sliding mode observers for fault detection and isolation, *Automatica*, 2000, Vol. 36, pp. 541-553.
4. *Tan E., Edwards C.* Sliding mode observers for robust detection and reconstruction of actuator and sensor fault, *Int. J. Robust and Nonlinear Control*, 2003, Vol. 13 (5), pp.443-463.
5. *Tan C.P., Edwards C.* Robust fault reconstruction using multiple sliding mode observers in cascade: development and design, *Proc. American Contr. Conf., St. Louis, USA, 2009*, pp. 3411-3416.
6. *Yan X., Edwards C.* Nonlinear robust fault reconstruction and estimation using a sliding modes observer, *Automatica*, 2007, Vol. 43, pp. 1605-1614.
7. *Alwi H., Edwards C.* Fault tolerant control using sliding modes with on-line control allocation, *Automatica*, 2008, Vol. 44, pp. 1859-1866.
8. *Edwards C., Alwi H., and Tan C.* Sliding mode methods for fault detection and fault tolerant control with application to aerospace systems, *Int. J. Applied Mathematics and Computer Sciences*, 2012, Vol. 22, pp. 109-124,
9. *Zhirabok A., Zuev A., Shumsky A.* Fault diagnosis in linear systems via sliding mode observers, *Int. J. Control*, 2021, Vol. 94, pp. 327-335.
10. *Zhirabok A., Zuev A., Filaretov V.F., Shumsky A.* Identifikaciya defektov na osnove skol'zyashchikh nablyudateley s oslablennymi usloviyami sushchestvovaniya [Identification of defects based on sliding observers with weakened existence conditions], *Izvestiya vuzov. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2021, Vol. 64 (4), pp. 167-172.
11. *Defoort M., Veluvolu K., Rath J., Djemai M.* Adaptive sensor and actuator fault estimation for a class of uncertain Lipschitz nonlinear systems, *Int. J. Adaptive Control and Signal Processing*, 2016, Vol. 30, pp. 271-283.
12. *Bejarano F., Fridman L.* High-order sliding mode observer for linear systems with unbounded unknown inputs, *Int. J. Control*, 2010, Vol. 83, pp. 1920-1929.
13. *Floquet T., Edwards C., Spurgeon S.* On sliding mode observers for systems with unknown inputs, *Int. J. Adaptive Control and Signal Processing*, 2007, Vol. 21, pp. 638-656.
14. *Fridman L., Levant A., Davila J.* Observation of linear systems with unknown inputs via high-order sliding modes, *Int. J. Systems Science*, 2007, Vol. 38, pp. 773-791.
15. *Yang J., Zhu F., Sun X.* State estimation and simultaneous unknown input and measurement noise reconstruction based on associated observers, *Int. J. Adapt Control and Signal Processing*, 2013, Vol. 27, pp. 846-858.
16. *Bejarano F., Fridman L., Pozhyak A.* Unknown input and state estimation for unobservable systems, *SIAM J. Control Opt.*, 2009, Vol. 48, pp. 1155-1178.
17. *Wang X., Tan C., Zhou D.* A novel sliding mode observer for state and fault estimation in systems not satisfying matching and minimum phase conditions, *Automatica*, 2017, Vol. 79, pp. 290-295.
18. *Dubovik S.A., Kabanov A.A.* Funktsional'no ustoychivye sistemy upravleniya: asimptoticheskie metody sinteza [Functionally stable control systems: asymptotic methods of synthesis]. М.: INFRA-M, 2019, 249 p.
19. *Kabanov A.A., Dubovik S.A.* Chislennyye metody kontrolya redkikh sobytiy v nelineynykh stokhasticheskikh sistemakh [Numerical methods for monitoring rare events in nonlinear stochastic systems], *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2021, Vol. 22 (6), pp. 291-297.

20. *Mufiti I.H., Chow C.K., Stock F.T.* Solution of ill-conditioned linear two-point boundary value problems by the Riccati transformation, *SIAM Rev.*, 1969, Vol. 11 (4), pp. 616-619.
21. *Bryson A., Ho Yu-shih.* *Prikladnaya teoriya optimal'nogo upravleniya* [Applied theory of universal control]. Moscow: MIR, 1972, 544 p.
22. *Naidu D.S.* Optimal control systems. Electrical Engineering Handbook. Florida, Boca Raton: CRC Press, 2003, 275 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н. А.В. Малолетов.

**Кабанов Алексей Александрович** – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет»; e-mail: kabanovaleksey@gmail.com; г. Севастополь, Россия; тел.: +79787622582; зав. кафедрой; к.т.н.; доцент.

**Крамарь Вадим Александрович** – e-mail: kramarv@mail.com.com; тел: +79787927340; г.н.с.; д.т.н. профессор.

**Зуев Александр Валерьевич** – Институт проблем морских технологий ДВО РАН»; e-mail: zuev@dvo.ru; г. Владивосток, Россия; тел.: +79149617735; зав. лабораторией; к.т.н.; доцент.

**Филаретов Владимир Федорович** – e-mail: filaretov@inbox.ru; тел. +79146890082; зав. лабораторией; д.т.н.; профессор.

**Жиравок Алексей Нилович** – Дальневосточный федеральный университет; e-mail: zhirabok@mail.ru; г. Владивосток, Россия; д.т.н.; профессор.

**Kabanov Aleksei Alexandrovich** – Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Sevastopol State University"; e-mail: kabanovaleksey@gmail.com; Sevastopol, Russia; phone: +79787622582; head of the department; cand. of eng. sc.; associate hrofessor.

**Kramar Vadim Alexandrovich** – e-mail: kramarv@mail.com.com; phone: +79787927340; Chief researcher; dr. of eng. sc; professor.

**Zuev Aleksandr Valerievich** – Institute of Marine Technology Problems, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; e-mail: zuev@dvo.ru; Vladivostok, Russia; phone: +79149617735; head of the laboratory; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Filaretov Vladimir Fedorovich** – e-mail: filaretov@inbox.ru; phone: +79146890082; head of the laboratory; dr. of eng. sc; professor.

**Zhirabok Aleksei Nilovich** – Far Eastern Federal University; e-mail: zhirabok@mail.ru; Vladivostok, Russia; dr. of eng. sc; professor.

УДК 621.317.39.084.2

DOI 10.18522/2311-3103-2022-1-204-217

**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 немало примеров использования в современной технике 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 дешевой конструкцией чувствительного элемента, гибкостью в применении, эксплуатацией в низкотемпературных и высокотемпературных средах. Одним из датчиков подобного типа является феррозондовый преобразователь маг-*

нитного 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, реализующих датчик положения с использованием феррозондового метода контроля для усовершенствования разрабатываемой конструкции. Далее, разрабатывается первоначальная конструкция чувствительного элемента феррозондового преобразователя, согласно начальной конструкции, создается геометрическая 3D-модель чувствительного элемента, выбирается предполагаемый материал составляющих элементов датчика. С помощью численных методов компьютерного моделирования моделируется работа датчика и определяется его выходная характеристика 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.

*Бесконтактный датчик; Феррозондовый датчик; 3D-модель; COMSOL; чувствительный элемент; Пермаллой; моделирование; датчик положения; магнитооптический датчик.*

**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 measurement 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 that implement the position sensor using the fluxgate control method is carried out to improve the design being developed. Next, the initial design of the sensitive element of the fluxgate transducer is developed, according to the initial design, a geometric 3D model of the sensitive element is created, and the proposed material of the constituent elements of the sensor is selected. With the help of numerical methods of computer simulation, the operation of the sensor is simulated and its output characteristic is 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.*

*Contactless sensor; Ferrosonde sensor; 3D model; COMSOL; sensing element; Permalloy; simulation; position sensor; magneto-optical sensor.*

**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.

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 задачи.** Требуется разработать бесконтактный датчик положения для контроля состояния клапана. На рис. 1. изображена модельная схема пологого клапана.

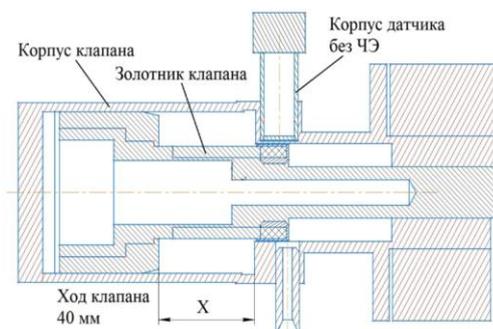


Рис. 1. Схема модели клапана

Основные элементы схемы – это корпус, золотник клапана и корпус размещаемого датчика (чувствительный элемент (ЧЭ) не изображен). 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 на основе феррозондового метода.

Преимущества датчика на данном эффекте 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.

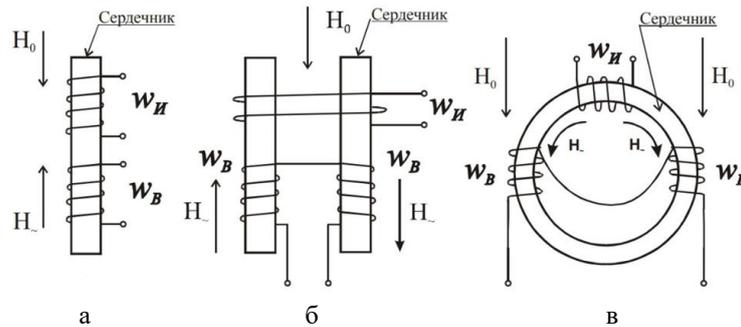


Рис. 2. Варианты конструкции феррозондов: а – одноэлементный стержневой; б – дифференциальный с разомкнутым сердечником; в – дифференциальный с замкнутым сердечником

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 ( $\omega_B$ ), питаемой переменным током, и измерительной (сигнальной) катушки ( $\omega_I$ ).

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  $1 \text{ см}^3$ , а для магнитометра Г74 трехкомпонентный феррозонд вписывается в куб со стороной 15 мм.

На рис. 3 приведена конструкция и габариты миниатюрного стержневого феррозонда.

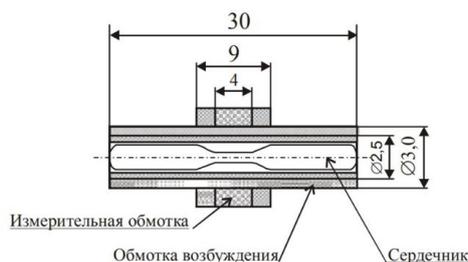


Рис. 3. Конструкция и габариты стержневого феррозонда

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  $\pm 50$  А/м до  $\pm 100$  А/м (от  $\pm 0,06$  до  $\pm 0,126$  мТл). Плотность магнитного шума в полосе частот до 0,1 Гц для феррозондов со стержневыми сердечниками составляет от 30 до 40 мкА/м ( $\text{м} \times \text{Гц}^{1/2}$ ) в зависимости от поля возбуждения, уменьшаясь с увеличением последнего. В полосе частот до 0,5 Гц плотность шума оказывается в 3–3,5 раза выше. При экспериментальном исследовании кольцевых феррозондов установлено, что уровень шума у них на порядок ниже, чем у феррозондов со стержневыми сердечниками.

При проведении патентного поиска наиболее близкими к разрабатываемому устройству по принципу действия и применению являются следующие патенты [3–12]. Рассмотрим некоторые из них.

Известен патент RU0002457476 опубликован 27.07.2012., в котором раскрыт феррозондовый датчик для слежения за стыком свариваемых деталей [3]. На рис. 4 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.

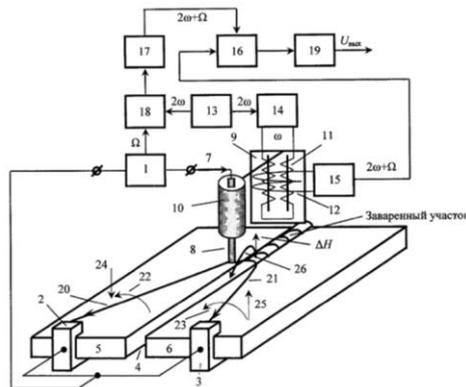


Рис. 4. Конструкция феррозондового датчика слежения за стыком свариваемых деталей

Усилительного-преобразовательный тракт содержит последовательно соединенные: избирательный усилитель 15, настроенный в резонанс на частоту  $2\omega + \Omega$  ( $\omega$  – частота возбуждения феррозонда,  $\Omega$  - 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  $2\omega$ ; 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  $\Delta H$  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 ( $\Delta H$ ) 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 ( $2\omega + \Omega$ ).

Известен патент RU0000197484 опубликован 30.04.2020., в котором раскрыт феррозондовый датчик в магнитном экране [4]. На рис. 5 приведена конструкция и схема устройства.

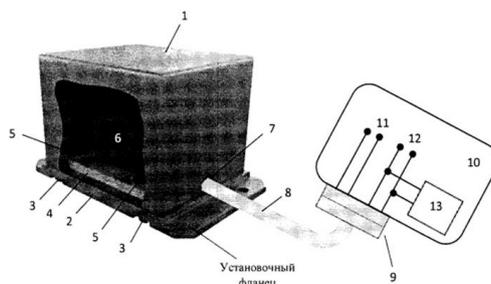


Рис. 5. Феррозондовый датчик в магнитном экране

Феррозондовый датчик в магнитном экране содержит ферромагнитный корпус 1 прямоугольной формы, одна грань у которого отсутствует, съемное ферромагнитное основание 2, которое крепится винтами 3 к торцам граней ферромагнитного корпуса 1. Диамагнитное основание 4 крепится винтами 5 к съемному ферромагнитному основанию 2 с внутренней стороны ферромагнитного корпуса 1. Магниточувствительный элемент (МЧЭ) 6 крепится на диамагнитное основание 4 крепежными элементами. На одной грани ферромагнитного корпуса 1 со стороны торца прорезан паз 7. Выводы гибкого кабеля 8, проходящего через паз 7 соединяются с одной стороны с выводами МЧЭ 6 (посредством пайки или через диамагнитный соединитель). Электрические цепи МЧЭ 6, проходящие через гибкий кабель 8 и внешний соединитель 9, выводятся в электронный блок 10, в котором обозначены как выводы обмотки возбуждения 11 и выводы сигнальной обмотки 12. К выводам 12 сигнальной обмотки МЧЭ подключен генератор постоянного тока 13. Частным случаем прямоугольной формы ферромагнитного корпуса 1 является куб.

Устройство работает следующим образом. На выводы обмотки возбуждения 12 подают напряжение возбуждения МЧЭ 6. В сердечнике МЧЭ 6 создают магнитное поле (МП) постоянным током, поступающим в обмотку МЧЭ 6 от источника постоянного тока 13. Это эталонное МП является эквивалентом МП в этом же сердечнике при воздействии внешнего МП стандартного эталона или колец Гельмгольца в отсутствии ферромагнитного корпуса 1. При этом на выводах сигнальной обмотки 12 формируется сигнал равноценный сигналу, получаемому от воздействия внешнего МП на стандартный МЧЭ 6, предназначенного для комплектования магнитометра.

Установка МЧЭ 6 на диамагнитном основании 4 обеспечивает унификацию дорогостоящих ферромагнитного корпуса 1 и съемного ферромагнитного основания 2. При смене конструктивного типа МЧЭ 6 соответственно меняется диамагнитное основание 4, изготавливаемое из не дорогих не дефицитных и не требующих специальной обработки материалов, например, алюминий, латунь. В случае использования устройства для контроля параметров элементов магнитометра без температурного воздействия диамагнитное основание 4 может быть изготовлено с применением пластмасс, например, текстолита. Введение паза 7 с использованием гибкого кабеля 8 позволяет повысить оперативность замены МЧЭ 6.

Введенные конструктивные изменения датчика феррозондового в магнитном экране повышают оперативность (производительность труда) как в случае его использования для контроля характеристик серийно изготавливаемых МЧЭ б, например, температурных испытаниях, так и для контроля параметров элементов магнитометров с МЧЭ различного конструктивного исполнения.

Также были найдены статьи, посвященные изучению феррозондовых преобразователей [13–17].

В статье Баранова П.Ф. Моделирование феррозондового датчика для описывается процесс создания модели датчика измерения остаточной намагниченности в программном среде численного моделирования COMSOL Multiphysics [13].

COMSOL Multiphysics – это программная среда для конечно-элементного анализа и мультифизического моделирования, она позволяет решать электрические, механические, гидродинамические, акустические и магнитные задачи [18–20].

В статье приводится создание и моделирование дифференциального феррозондового датчика, схема его конструкции приведена на рис. 6.

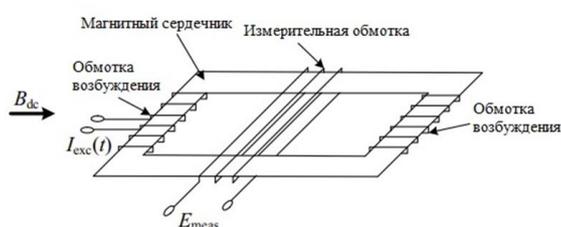


Рис. 6. Геометрия дифференциального феррозонда

На рис. 6 изображена геометрическая модель датчика и сформированная расчетная сетка, созданные в среде COMSOL.

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. В заключении статьи приводится график выходного сигнала измерительной обмотки смоделированного феррозондового датчика (рис. 6). Как изображено на рис. 6 слева можно увидеть геометрическую 3D-модель датчика и сформированная расчетная сетка, созданные в среде COMSOL, а справа – выходную характеристику датчика.

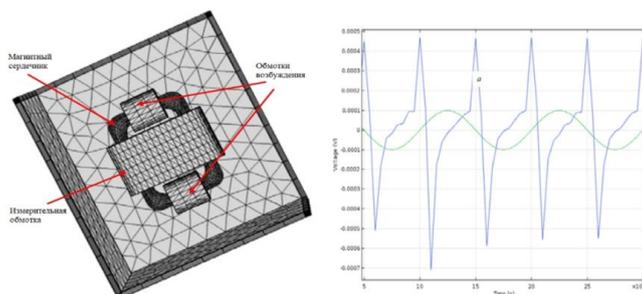


Рис. 7. 3D-модель датчика и его выходная характеристика

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].

В качестве среды для моделирования предполагается использование среды COMSOL Multiphysics, поскольку данное программное обеспечение удовлетворяет требованиям к используемому функционалу программной среды.

**Разработка и моделирование конструкции датчика.** Была разработана первоначальная конструкция датчика, сборочный чертеж катушки, чертеж корпуса чувствительного элемента, каркаса катушки и магнитопроводящей ленты.

Сначала предполагается провести моделирование магниточувствительного элемента без корпуса датчика, то есть самого феррозонда. Для этого была построена геометрическая модель каркаса катушки и ее обмоток в программном комплексе САПР SolidWorks.

На рис. 8 изображена модель феррозонда, построенная в SolidWorks, а на рис. 9 – модель в разрезе с обозначением ее составляющих элементов.

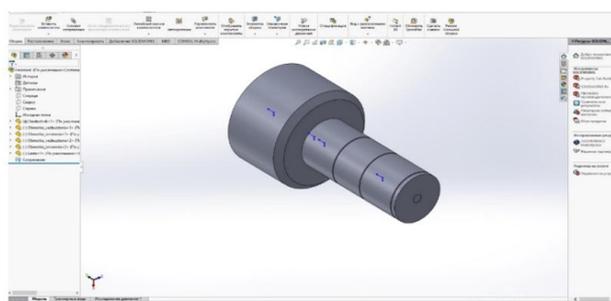


Рис. 8. Геометрическая модель феррозонда

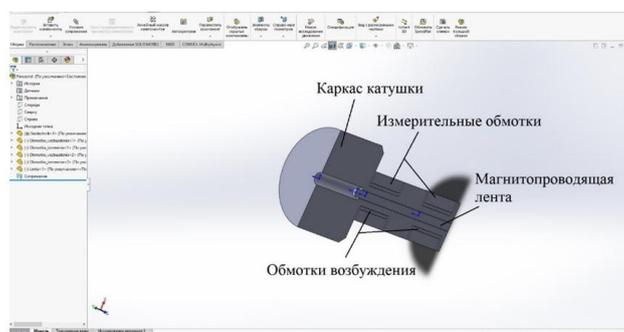


Рис. 9. Модель феррозонда в разрезе

Как видно из рисунка 9 феррозонд состоит из каркаса, двух обмоток возбуждения, двух измерительных обмоток и магнитопроводящей ленты.

Принцип работы феррозонда следующий, обмотки возбуждения запитываются переменным напряжением, возникает переменное магнитное поле, воздействующее на магнитопроводящую ленту, лента под действием переменного магнитного поля, создаваемого током в обмотках возбуждения, перемагничивается по симметричному циклу. Изменение магнитного поля, вызванное перемагничиванием ленты по симметричной кривой, индуцирует в обмотках измерения ЭДС, изменяющуюся по гармоническому закону.

При приближении постоянного магнита к магнитопроводу магнитопроводящая лента входит в насыщение, и кривая перемагничивания меняет свои размеры и форму, становясь несимметричной. При этом изменяется величина и гармонический состав ЭДС в измерительных обмотках.

Таким образом, в основе датчика положения клапана лежит контроль изменения магнитного поля.

В качестве среды моделирования феррозонда предполагается выбрать COMSOL Multiphysics. COMSOL Multiphysics – это интегрированная среда для численного моделирования на основе метода конечных элементов и граничных элементов. COMSOL Multiphysics имеет многомодульную структуру, в данной среде возможно моделировать электротехнические, механические, гидродинамические, акустические и другие процессы, помимо этого имеется возможность производить мультифизические расчеты с учетом взаимного влияния различных процессов [18].

На рис. 10, 11, 12 изображается процесс работы в среде COMSOL. На рис. 10 показана импортированная модель из SolidWorks в среду COMSOL, на рис. 11 – осуществляется настройка электрических компонентов модели, в данном случае настройка и выделение граней обмоток катушек, а на рис. 12 – изображены сформированные расчетные сетки.

На данном этапе была произведена первичная настройка расчетной модели, далее планируется ее отладка, доработка и получение выходных характеристик моделируемого датчика.

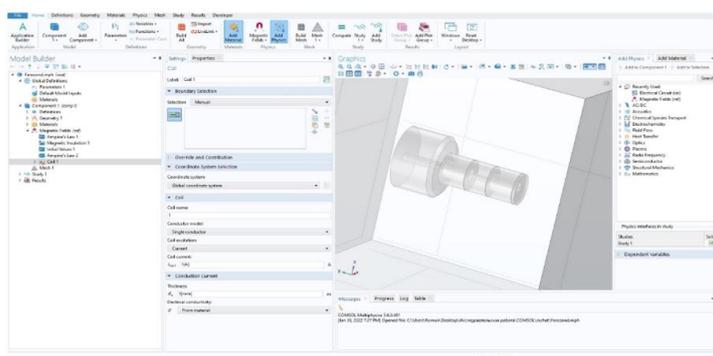


Рис. 10. Импортированная модель феррозонда в среде COMSOL

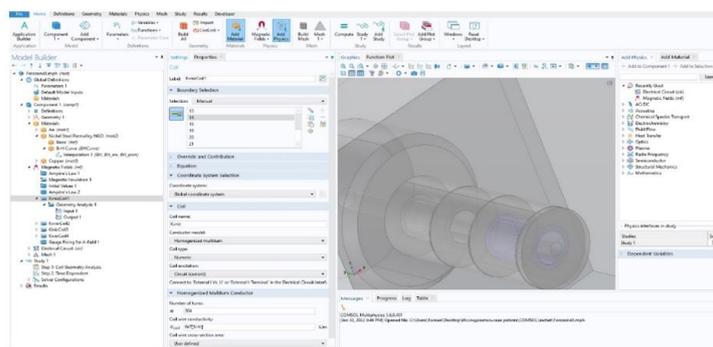


Рис. 11. Настройка свойств обмоток в среде COMSOL

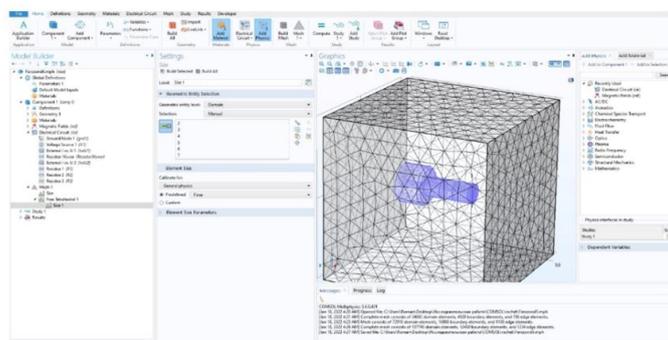


Рис. 12. Внешняя и внутренняя расчета сетка модели феррозонда

**Заключение.** Проведенный литературно-патентный поиск и анализ уже существующих решений подтверждает актуальность использования феррозондового метода для решения поставленной задачи.

Планируется отладка, доработка и совершенствование расчетной модели в среде COMSOL. Дальнейшим этапом является получение выходных характеристик чувствительного элемента при различных режимах работы датчика.

#### 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. Пат. 0002457476 Российская Федерация МПК<sup>7</sup> 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.
4. Пат. 0000197484 Российская Федерация МПК<sup>7</sup> 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.
5. Пат. 02123303 Российская Федерация МПК<sup>7</sup> 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.
6. Пат. 02315991 Российская Федерация МПК<sup>7</sup> 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.
7. Пат. 108983124 Китай МПК<sup>7</sup> 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.
8. Пат. 210605010 Китай МПК<sup>7</sup> G 01 V 3/08. Ферромагнитное устройство обнаружения для контроля ферромагнитных веществ в режиме пространственного позиционирования / Liu Dongliang, Li Zhiming; заявитель и патентообладатель SHENZHEN NIMAGE TECHNOLOGY CO., LTD. – №201921468161.8; заявл. 05.09.2019; опубл. 22.05.20.
9. Пат. 210775814 Китай МПК<sup>7</sup> 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.
10. Пат. 210981760 Китай МПК<sup>7</sup> G 01 M 13/00. Устройство измерения механических характеристик автоматического выключателя на основе феррозондового датчика / Li Zhiguang; заявитель и патентообладатель SHIJIAZHUANG HANDY ELECTRICAL INSTRUMENTS CO., LTD. – №201922172017.6; заявл. 06.12.2019; опубл. 10.07.2020.

11. Пат. 206270508 Китай МПК<sup>7</sup> G 01 V 3/08. Устройство обнаружения металла / Yu Runqiao, Cheng Dongfang, Hu Bo, Xia Guisuo, Cheng Qiangqiang; заявитель и патенто-обладатель NINGBO YINZHOU CITAI ELECTRONIC SCIENCE & TECHNOLOGY CO., LTD. – №201621459612.8; заявл. 28.12.2016; опубл. 20.06.2017.
12. Пат. 6456069 США МПК<sup>7</sup> 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.
13. Баранов П. Коломейцев А., Затонов И. Моделирование феррозондового датчика // Materials Science and Engineering. – Томск, 2018.
14. Баранова В.Е. Измерение слабого магнитного поля на основе феррозондового датчика: дис. ... канд. техн. наук: защищена 12.01.16 / Муравьев Сергей Васильевич. – Томск, 2015. – 134 с.
15. 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.
16. Санков О.В., Легкий В.Н. Исследование феррозондовых магнитных объектов для систем ближней локации // Вестник Московского государственного технического ун-та им. Н.Э. Баумана. – 2009. – № 2 (75). – С. 90-101.
17. Волков А.В., Реутов В.Я. Феррозондовый компьютерный магнитометр. – Екатеринбург: Институт физики металлов Уро РАН, 2015. – С. 322-327.
18. Янкин С. Интеграция пакетов COMSOL и SOLIDWORKS // COMSOL Co. – Свободный режим доступа: <https://www.comsol.ru/video/18-minutes-intro-to-liveliink-for-solidworks-webinar-ru> (дата обращения: 01.02.2022).
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).

#### REFERENCES

1. Baranochnikov M.L. Mikromagnitoelektronika [Micromagneto-electronics]. Vol. 1. DMK PRESS, 2001, 544 p.
2. Baranochnikov M.L. Mikromagnitoelektronika [Micromagneto-electronics]. Vol. 2. DMK PRESS, 2002, 691 p.
3. Braverman V.Ya., Belozertsev V.S., Lelekov A.T. Patent 0002457476 Russian Federation MPK7 G 01 N 27/82. Ferrozondovyy datchik dlya slezheniya za stykom svariyaemykh detaley [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.
4. Tsybin Yu.N., Brezinskiy A.A., Nikolaenko O.S. Patent 0000197484 Russian Federation MPK7 G 01 R 33/00. Datchik ferrozondovyy v magnitnom ekrane [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.
5. Pudov V.I., Reutov Yu.Ya., Korotkikh S.A. Patent 02123303 Russian Federation MPK7 A 61 B 17/50, A 61 B 5/06. Ferrozondovyy polyusoiskatel' [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.
6. Gordeliy V.I. Patent 02315991 Russian Federation MPK7 G 01 N 27/83. Modul'nyy datchik dlya sistem avtomatizirovannogo magnitnogo kontrolya rel'sov [Modular sensor for systems of automated magnetic control of rails], No. 2006125395/28; dec. 07/17/06; publ. 01/27/2008.
7. Van Yan'chzhan, Li Tszjintzi, Shi Tszyakin. Patent 108983124 China MPK7 G 01 R 33/04. Magnitnyy datchik s obratnoy svyaz'yu po sostoyaniyu nasyshcheniya [Saturation Feedback Magnetic Sensor]; applicant and Patent Holder of JILIN UNIVERSITY. No. 201811118866.7; dec. 09/25/18; publ. 12/11/18.

8. *Lyu Dongliang, Li Zhiming*. Patent 210605010 China IPC7 G 01 V 3/08. Ferromagnitnoe ustroystvo obnaruzheniya dlya kontrolya ferromagnitnykh veshchestv v rezhime prostranstvennogo pozitsionirovaniya [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.
9. *Luo Yubiao, Yang Lei, Xia Yuechun, Huang Xinglong, Liu Feibiao, Xiang Biao, Zeng Jiheng*. Patent 210775814 China MPK7 G 01 R 33/04. Ferrozondovyy massiv datchikov s vozmozhnost'yu obnaruzheniya orientatsii korabel'nykh грузов [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.
10. *Li Zhiguang*. Patent 210981760 China MPK7 G 01 M 13/00. Ustroystvo izmereniya mekhanicheskikh kharakteristik avtomaticheskogo vyklyuchatelya na osnove ferrozondovogo datchika [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.
11. *Yu Runqiao, Cheng Dongfang, Hu Bo, Xia Guisuo, Cheng Qiangqiang*. Patent 206270508 China IPC7 G 01 V 3/08. Ustroystvo obnaruzheniya metalla [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.
12. *Scarzello. John F., Holmes. John J., O'Keefe. Edward C.* Patent US 6456069 MPK7 G 01 33/04. Ferrozondovyy datchik magnitnogo polya, sodержashchiy ferromagnitnyy issleduemyy material, v ego magnitnyuyu tsep' [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.
13. *Baranov P. Kolomeytssev A., Zatonov I.* Modelirovanie ferrozondovogo datchika [Modeling a fluxgate sensor], *Materials Science and Engineering* [Materials Science and Engineering]. Tomsk, 2018.
14. *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. Tomsk, 2015, 134 p.
15. *Tang S.K.* Skhema vzbuzhdeniya ferrozondovogo datchika s ispol'zovaniem nasyschayushchegosya induktora [Excitation circuit for a fluxgate sensor using a saturable inductor], *Sensors and Actuators A: Physical* [Sensors and Actuators A: Physical]. Department of Electronics, Power Electronics Research Center, National University of Ireland, Galway, Ireland, 2004, pp. 156-165.
16. *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] *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo un-ta im. N.E. Baumana* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University], 2009, No. 2 (75), pp. 90-101.
17. *Volkov A.V., Reutov V.Ya.* Ferrozondovyy komp'yuternyy magnitometr [Ferrosonde computer magnetometer]. Ekaterinburg: Institut fiziki metallov Uro RAN, 2015, pp. 322-327.
18. *Yankin S.* Integratsiya paketov COMSOL i SOLIDWORKS [Integration of COMSOL and SOLIDWORKS packages], *COMSOL Co.* Free access mode: <https://www.comsol.ru/video/18-minutes-intro-to-livelink-for-solidworks-webinar-ru> (accessed 01 February 2022).
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).

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.

**Жигалов Роман Александрович** – e-mail: zhigalovroman9@mail.ru; тел.: +79171516449.

**Иголкин Александр Алексеевич** – e-mail: igolkin97@gmail.com; тел.: + 79171620062;  
д.т.н.; профессор; в.н.с.

**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.

**Zhigalov Roman Aleksandrovich** – e-mail: zhigalovroman9@mail.ru; phone: +79171516449.

**Igolkin Alexander Alekseevich** – e-mail: igolkin97@gmail.com; phone: + 79171620062; dr. of eng. sc.; professor; leading researcher.

## Раздел IV. Связь, навигация и наведение

УДК 629.3.051

DOI 10.18522/2311-3103-2022-1-218-225

**И.А. Шипов**

### **РЕАЛИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ НА ОТЕЧЕСТВЕННЫХ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ УСТРОЙСТВАХ**

*Целью работы – это создание производительного вычислительного устройства для бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) наземного робототехнического комплекса (РТК) на отечественной элементной базе. Дано формальное описание типовых достаточных функций, выполняемых БИНС и описаны основные принципы алгоритмов с точки зрения требования к вычислительным ресурсам. Приведено описание имеющихся на рынке отечественных микроконтроллеров и сравнение с ближайшим зарубежным аналогом. Результаты проведенного макетирования показали принципиальную возможность, но невысокую перспективность создания вычислительных устройств на одном микроконтроллере. В связи с этим были выработаны и реализованы технические предложения по увеличению вычислительной мощности по средствам построения архитектуры многопроцессорного вычислителя. Как следствие потребовалась выработка особых подходов к проектированию алгоритмов и программного обеспечения. Организация распределенных вычислений является одним из наиболее оптимальных методов обеспечения расчета алгоритмов функционирования. Введение в контур вычислителя дополнительных микропроцессоров позволило не только увеличить вычислительную мощность, но и ввести дополнительные интерфейсы взаимодействия как с потребителем, так и с датчиками первичной информации. Предложенный вариант распределения алгоритмов функционирования БИНС позволил обеспечить создание задела на перспективы развития и масштабируемость системы. Наиболее ресурсоемким алгоритмом является расчет инерциальных координат, реализованный в виде итеративного расчета определения широтной составляющей местоположения. Также запас производительности может позволить реализовать дополнительные адаптивные алгоритмы фильтрации и обработки данных по результатам испытаний и эксплуатации наземного подвижного объекта. Обоснован выбор интерфейса внутриплатного обмена между контроллерами и описано его практическое применение. Создание замкнутого контура обмена информацией позволило реализовать дополнительные параллельные вычисления вторичной информации и выполнить расчет автономного счисления координат местоположения объекта. Описанные технические решения могут быть использованы при проектировании встраиваемых вычислителей для объектов различного назначения функционирующих на базе жесткой логики. В качестве основного недостатка представленного подхода к проектированию вычислителя можно обозначить ограниченный функционал при работе с постоянно запоминающимися устройствами.*

*Блок обработки; распределённые вычисления; микропроцессор; навигационная система; отечественные микроконтроллеры.*

**I.A. Shipov**

### **THE METHOD OF SOLVING THE PROBLEM OF THE DISTRIBUTION OF GOALS IN THE GROUP OF UAVS BY NETWORK-CENTRIC CONTROL SYSTEM**

*The aim of the work is to create a productive computing device for a strapdown inertial navigation system (SINS) of a ground-based robotic complex (RTC) on a domestic element base. A formal description of the typical sufficient functions performed by SINS is given and the basic*

*principles of the algorithms are described from the point of view of the requirements for computing resources. A description of domestic microcontrollers available on the market and a comparison with the closest foreign analogue are given. The results of the prototyping carried out showed the fundamental possibility, but the low prospects of creating computing devices on a single microcontroller. In this regard, technical proposals were developed and implemented to increase the computing power by means of building the architecture of a multiprocessor computer. As a result, it was necessary to develop special approaches to the design of algorithms and software. The organization of distributed computing is one of the most optimal methods for ensuring the calculation of functioning algorithms. The introduction of additional microprocessors into the calculator circuit made it possible not only to increase the computing power, but also to introduce additional interfaces for interaction with both the consumer and primary information sensors. The proposed variant of the distribution of SINS operation algorithms made it possible to create a reserve for the development prospects and system scalability. The most resource-intensive algorithm is the calculation of inertial coordinates, implemented as an iterative calculation for determining the latitude component of the location. Also, the performance margin may allow the implementation of additional adaptive algorithms for filtering and processing data based on the results of testing and operation of a ground moving object. The choice of on-board exchange interface between controllers is substantiated and its practical application is described. The creation of a closed loop of information exchange made it possible to implement additional parallel calculations of secondary information and to calculate an autonomous reckoning of the object's location coordinates. The described technical solutions can be used in the design of embedded calculators for objects for various purposes operating on the basis of hard logic. As the main drawback of the presented approach to designing a calculator, one can designate a limited functionality when working with ROMs.*

*Processing unit; distributed computing; microprocessor; navigation system; domestic microcontrollers.*

**Введение.** Степень интеллектуальности современных цифровых систем автоматики, во многом, определяется сложностью и объемом алгоритмов их функционирования. Для обеспечения выработки стабильного навигационного решения, отвечающего требованиям потребителя, системы навигации и ориентирования (СНО) должны осуществлять комплексирование нескольких источников информации, оценивать достоверность каждого из них, а также решать целый ряд дополнительных задач [1]. Стоит отметить, что реализация алгоритма комплексированного режима счисления координат и углов ориентации имеет множество вариантов. Разработчик ограничен только рамками поставленной задачи и неформальными требованиями к возможной оптимальности. Наиболее широкое применение в настоящее время получил фильтр Калмана [2, 3], позволяющий учитывать всю возможную исходную информацию, имеющуюся в составе подвижного объекта. С точки зрения программной реализации и требований к вычислительным устройствам отдельно стоит отметить алгоритмы с постобработкой, требующие накопления больших массивов данных. Применение подобных методов предполагает особую организацию вычислительных устройств.

В современной отечественной практике опытно-конструкторские работы выполняются в максимально короткие сроки на базе имеющегося на предприятии задела и, как правило, без предварительно проведенной научно-исследовательской подготовки. В таких условиях разработка алгоритмов функционирования и проектирование вычислительных устройств зачастую выполняется параллельно. Это означает, что у разработчика отсутствуют точные исходные данные о требованиях к таким параметрам как, объем памяти запоминающих устройств и вычислительная мощность. Как правило в техническом задании предъявляются требования к перечню каналов информационного взаимодействия. Учитывая указанные факторы, разработчик вычислительных устройств как правило выбирает наиболее перспективные компоненты, зачастую отдавая ценовой составляющей наименьший приоритет.

**Сравнительный анализ зарубежного опыта.** Технологическое отставание отечественной промышленности в области электронных компонентов широко известная проблема [4]. Во всех основных позициях, к которым можно отнести микропроцессоры, флэш-память, индикаторные устройства разработчик вынужден выбирать из компонентов зачастую значительно уступающим своим зарубежным аналогам. При этом зачастую по некоторым позициям отечественные аналоги просто отсутствуют.

При текущем уровне развития микропроцессорной техники в России у разработчиков появляется возможность создавать высокопроизводительные вычислительные устройства, обладающие современными интерфейсами взаимодействия. АО «ПКК Миландр» представлено на рынке линейкой микропроцессоров отечественного производства, разрешенных к применению при разработке оборонной техники, способных удовлетворить современные потребности разработчика вычислительных средств.

Прямым аналогом линейки процессоров 1986BE9x является микроконтроллер STM32F10x европейской фирмы ST Microelectronics [6–8]. Оба микроконтроллера выполнены на базе одного и того же ядра Cortex M3 ARM архитектуры с сокращенным набором команд. Процессоры имеют схожий набор периферийных блоков, обеспечивающих решение функциональных задач и возможность адаптации конечного устройства под специфику применения [9, 10].

При этом стоит отметить, что одним из определяющих факторов востребованности на рынке микроконтроллеров является удобство программных средств разработки, доступность документации и библиотек готовых решений. В этой части можно отметить факт, что на всю серию микроконтроллеров отечественного производства доступна полная документация, которая находится на разной стадии отработки.

**Разработка вычислителя на отечественной элементной базе.** В табл. 1 приведены характеристики микропроцессоров серии 1986BE отечественного производства [5], они обладают устойчивостью к воздействию спецфакторов, широким диапазоном рабочих температур, развитой периферией. Все представленные контроллеры обладают аппаратной поддержкой широкого набора интерфейсов в том числе UART, CAN, MCIO, Ethernet. Также в них реализованы режимы таймеров и прямого доступа к памяти. Операционная система реального времени с исходным кодом FreeRTOS поддерживает большинство процессоров доступных к применению и обеспечивает возможность реализации приоритетной многозадачности по средствам встроенных программных инструментов.

Таблица 1

**Микропроцессоры серии 1986BE**

Название	Частота [МГц]	SPI	Tmax [°C]	Tmin [°C]	ОЗУ [КБайт]	ПЗУ [КБайт]	Ядро
1986BE1T	144	3	125	-60	48	128	RISC-ядро
1986BE3T	80	4	125	-60	48	128	RISC-ядро
1986BE8T	100	1	125	-60	32	128	ARM Cortex-M4F
1986BE92Y	80	2	125	-60	32	128	Cortex-M3
1986BE93Y	80	1	125	-60	32	128	Cortex-M3
1986BE94T	80	2	125	-60	32	128	Cortex-M3

Все представленные микроконтроллеры обладают ПЗУ объемом 128 Кбайт, ОЗУ не менее 32 Кбайт и тактовой частотой не менее 80 МГц.

В рамках опытно-конструкторской работы по разработке высокоточной бес-  
платформенной инерциальной навигационной системы необходимо было разрабо-  
тать блок обработки навигационных параметров. Данное устройство должно было  
обеспечивать выполнение всех алгоритмов функционирования изделия в целом.

Типовое программное обеспечение функционирования навигационной сис-  
темы условно состоит из следующих основных составных частей:

- ◆ подпрограммы взаимодействия с сопряженными устройствами;
- ◆ подпрограммы первичной обработки поступающей информации;
- ◆ блока решения навигационных задач;
- ◆ подпрограммы мониторинга технического состояния и самодиагностики;
- ◆ подпрограммы взаимодействия с FLASH памятью.

Проведенный этап макетирования показал, что на базе одного микроконтроллера  
серии 1986BE9х, с учетом оптимизации исходного кода, может быть реализовано вы-  
полнение алгоритмов функционирования с частотой не более 100 Гц при обновлении  
первичной информации 1600Гц. Также ключевым моментом являлся выбор сочетания  
производительности и количества периферийных интерфейсов.

В связи с этим оптимальным техническим решением является создание вы-  
числительного блока на базе нескольких микроконтроллеров. Это позволит орга-  
низовать распределённые вычисления алгоритмов работы, существенно расширить  
количество каналов обмена с потребителем и датчиками первичной информации.

Одним из вариантов повышения вычислительной мощности системы являет-  
ся организация распределенных или параллельных вычислений на базе нескольких  
процессорных устройств [11–13]. Однако организация параллельных алгоритмов в  
подавляющем большинстве случаев функционирования системы навигации и ори-  
ентирования невозможна в виду того, что в выработке навигационного решения  
участвуют все исходные данные одновременно.

Учитывая возможную сложность и специфику каждой из указанных задач  
при организации распределённых вычислений [14] на базе нескольких процессор-  
ных устройств возможно привлечение нескольких независимых разработчиков.  
При этом возможно заимствование и создание библиотечных решений в части:

- ◆ драйверов работы с периферийными устройствами микроконтроллера;
- ◆ алгоритмов первичной и вторичной обработки информационных каналов  
взаимодействия;
- ◆ локальная стандартизация названий переменных.

Рассмотрим вариант построения системы, внутренняя архитектура которой  
позволяет обеспечивать возможность организации распределенных вычислений.  
Пример построения блока обработки навигационных параметров (БОНП) для  
реализации алгоритмов функционирования навигационной системы изображен на  
рис. 1. Использование трех микропроцессоров позволит распределить нагрузку и  
обеспечить функционирование изделия в целом. В совокупности блок обработки  
навигационных параметров обладает вычислительными мощностями сразу трех  
процессоров, совокупным объемом их оперативной памяти. Возникает две  
основные подзадачи организации функционирования:

- ◆ алгоритмическое распределение вычислений;
- ◆ организация взаимодействия между процессорными модулями.

В рамках вычислительных ресурсов первого микропроцессора выполняется  
программный модуль, обеспечивающий выработку готового решения по углам  
пространственного ориентирования объекта и обеспечивающий информационное  
взаимодействие с блоком чувствительных элементов. Программный модуль для  
второго микропроцессора реализует в себе алгоритмы комплексирования с одо-  
метрами, данными от аппаратуры спутниковой навигации и инерциального нави-

гационного решения. Третий модуль обеспечивает формирование навигационного решения и передачу его потребителю. Наличие замкнутого канала обмена внутри вычислителя позволяет создать единое информационное пространство, содержащее весь набор полученных данных, которое доступно всем алгоритмам системы.

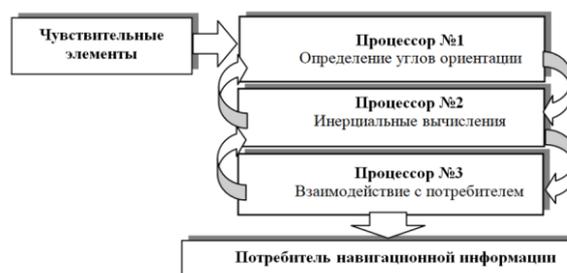


Рис. 1. Структурная схема вычислительного устройства

Для решения второй подзадачи необходимо определиться с аппаратной реализацией. Одним из возможных вариантов решения посредством которого можно организовать взаимодействие между процессорными устройствами является Serial Peripheral Interface (последовательный периферийный интерфейс, шина SPI) [15] – это последовательный синхронный стандарт передачи данных в режиме полного дуплекса, предназначенный для обеспечения простого и недорогого высокоскоростного сопряжения микроконтроллеров и периферии. SPI также иногда называют четырёхпроводным интерфейсом.

В отличие от стандартного последовательного порта, SPI является синхронным интерфейсом, в котором любая передача синхронизирована с общим тактовым сигналом, генерируемым ведущим устройством (процессором). Скорость данного интерфейса определяется делителем базовой частоты процессорного устройства. Принимающий (ведомый) абонент синхронизирует получение битовой последовательности с тактовым сигналом. К одному последовательному периферийному интерфейсу ведущего устройства-микросхемы может присоединяться несколько микросхем. Ведущее устройство выбирает ведомое для передачи, активируя сигнал «выбор кристалла» на ведомой микросхеме. Периферия, не выбранная процессором, не принимает участия в передаче по SPI. Основные преимущества данного интерфейса:

- ◆ высокая пропускная способность;
- ◆ возможность произвольного выбора длины пакета;
- ◆ простота аппаратной реализации, а именно низкие требования к энергопотреблению, возможность использования в системах с нестабильной тактовой частотой, ведомым устройствам не нужен уникальный адрес;
- ◆ максимальная тактовая частота ограничена только быстродействием устройств, участвующих в обмене данными.

Однако стоит отметить и основные недостатки SPI, которые могут накладывать ограничения при проектировании вычислителя для БИНС:

- ◆ ведомое устройство не может управлять потоком данных;
- ◆ нет подтверждения приема данных со стороны ведомого устройства;
- ◆ нет определенного стандартом протокола обнаружения ошибок.

Учитывая все положительные и отрицательные моменты, SPI является наиболее перспективным вариантом к применению в сравнении с I<sup>2</sup>C (последовательная асимметричная шина).

Рассмотренный пример построения вычислительного блока для системы навигации и ориентирования на базе отечественных микропроцессорных устройств является одним из возможных вариантов решения данной задачи и носит типовой характер. Недостатки данной реализации могут быть выявлены при необходимости распределения [16, 17] емких алгоритмов инерциальной навигации или при необходимости постобработки данных.

Проведенные натурные испытания разработанного блока обработки навигационных параметров для бесплатформенной инерциальной навигационной системы показали возможность выработки и передачу потребителю навигационного решения с частотой до 400 Гц. Получение исходных данных с датчиков первичной информации при этом было реализовано с частотой 1600 Гц.

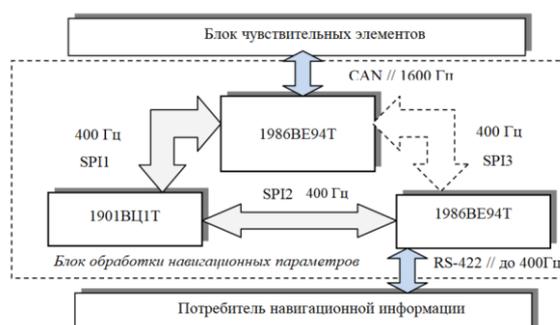


Рис. 2. Структура вычислителя инерциальной навигационной системы

На рис. 2 изображена структура вычислителя инерциальной навигационной системы, построенного на основе изложенного выше подхода. Канал информационного взаимодействия SPI3 является дополнительным и может быть задействован для ускоренной передачи данных между процессорами 1986BE94Т.

Функционирование БОНП происходит в последовательных режимах «Выставка» и «Навигация». Дополнительно на каждом цикле опроса датчиков выполняется алгоритм коррекции данных и управления режимами функционирования. Также программное обеспечение выполняет функцию организации взаимодействия с потребителем по интерфейсу RS-422 в соответствии с протоколом обмена. Режим «Навигация» является более ресурсоемким в связи с тем, что требует вычисления большого количества тригонометрических функций. Реализация обратной связи по каналу SPI обеспечивает возможность реализации расчета автономных координат.

Обмен информацией с блоком чувствительных элементов (БЧЭ) осуществляется по интерфейсу CAN2.0В (физическая организация соответствует ISO 11898-2) с использованием 11-ти разрядных идентификаторов сообщений. Скорость передачи данных составляет 1 Мбит/с. Частота обмена (частота обновления информации) с БЧЭ составляет 1600 Гц. Это накладывает ограничение на период расчёта алгоритмов в 0,000625 секунды. Для реализации алгоритмов функционирования БОНП высокоточной бесплатформенной инерциальной навигационной системы необходимо было разработать программные модули для трех однокристалльных ЭВМ с организацией взаимодействия между ними. В рамках оптимизации алгоритмов функционирования и подготовки их к реализации в условиях распределённых вычислений, была проведена работа по формированию набора базовых функций и проработаны алгоритмы их взаимосвязи. Это позволило обеспечить необходимую производительность вычислений.

В программном модуле для первой ЭВМ 1986BE94T были реализованы драйверы взаимодействия с БЧЭ по интерфейсу CAN, а также корректировка показаний датчиков в соответствии с калибровочными коэффициентами. В программном модуле для ЭВМ 1901BC1T полностью реализован алгоритм «Выставка» и часть алгоритма «Навигация». Вторая ЭВМ 1986BE94T выполняет функции окончательных расчетов алгоритмов штатного функционирования и обеспечивает взаимодействие с потребителем навигационной информации.

Как показывают результаты проведенной работы, вычислительные мощности отечественных процессоров являются достаточными для реализации штатных классических алгоритмов функционирования инерциальной навигационной системы с частотой обновления навигационного решения с высокой частотой. Такие параметры производительности достаточны для реализации классических алгоритмов функционирования системы навигации в том числе. При решении некоторых задач, связанных с накоплением больших объемов данных, узким местом может стать объем ОЗУ, но эта проблема может быть решена установкой дополнительных периферийных модулей [19, 20].

**Заключение.** Вопрос импортозамещения имеет особую актуальность для изделий вооружения и военной техники. В ходе данной работы был продемонстрирован возможный вариант построения блока обработки навигационных параметров на базе трех отечественных процессоров фирмы АО «ПКК Миландр». В этой реализации потребитель имеет возможность получать навигационное решение с частотой до 400Гц. Решение задачи построения вычислительного устройства на отечественной элементной базе ограничено в первую очередь характеристиками ключевых элементов, такими как процессор. Разработка программного обеспечения навигационных систем, очевидно, не имеет единого подхода и общей алгоритмической базы в связи с чем разработка унифицированных вычислительных устройств нецелесообразна. Оптимизация исходного кода и организация распределенных вычислений может позволить реализовать обработку большого объема данных, даже на уступающих своим зарубежным аналогам, отечественных процессорных устройствах.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Брозгуль Л.И., Зайцев А.В. Состояние и перспективы развития инерциальных навигационных систем // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2006. – № 3.
2. 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.
3. Grewal M., Henderson V., Miyasako R. Application of Kalman filtering to the calibration and alignment of inertial navigation systems // IEEE Transactions, Automatic Control. – 1991. – Vol. 36.
4. Алямов А.Э., Баласов И.Ю., Бажанов В.А. Импортозамещение электронной компонентной базы в оборонном производстве // Всероссийский экономический журнал ЭКО. – 2015.
5. Официальный сайт АО «ПКК Миландр». – URL: <https://ic.milandr.ru/> (дата обращения: 22.12.2018).
6. Carmine Noviello. Mastering STM32, 2018.
7. Agus Kurniawan. Getting Started With STM32 Nucleo Development, 2016.
8. Geoffrey Brown, Discovering the STM32 Microcontroller, 2016.
9. Warren Gay. Beginning STM32: Developing with FreeRTOS, libopenm3 and GCC», 2018.
10. Vincent Mahout, Assembly Language Programming: Arm® Cortex®-M3», 2011.
11. Косяков М.С. Введение в распределённые вычисления. – СПб.: НИУ ИТМО, 2014. – 155 с.
12. Романов А.А. Распределенные вычисления и приложения: учеб. пособие. – УлГТУ, 2018. – 152 с.
13. Таненбаум Э., ван Стеен М. Распределенные системы. Принципы и парадигмы. – СПб: Питер, 2003. – 877 с.

14. Тель Ж. Введение в распределенные алгоритмы: пер. с англ. – М.: МЦНМО, 2009. – 616 с.
15. *Руководство SPI v3.06* // WebArchive [2015-2018]. – URL: <http://www.ee.nmt.edu/~teare/ee308l/datasheets/S12SPIV3.pdf> (дата обращения: 22.12.2020).
16. Stallings W. Operating Systems: Internal and design principles. – Seventh edition. Prentice Hall, 2011.
17. Tel G. Introduction to Distributed Algorithms. Second edition. – Cambridge University Press, 2000.
18. Благодаров А.В. Программирование микроконтроллеров. – М., 2016. – 242 с.
19. Эндрю Таненбаумом. Архитектура компьютера. – 6-е изд. – 2013. – 801 с.
20. Белов А.В. Конструирование устройств на микроконтроллерах. – СПб.: Наука и Техника, 2005. – 256 с.

## REFERENCES

1. Brozgul' L.I., Zaytsev A.V. Sostoyanie i perspektivy razvitiya inertsiyal'nykh navigatsionnykh sistem [State and prospects for the development of inertial navigation systems], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2006, No. 3.
2. Vasil'ev K.K., Anikin A.A. Kalmanovskoe kompleksirovanie i modelirovanie navigatsionnykh sistem [Kalmanovskoe complexing and modeling of navigation systems], *Elektronnaya tekhnika: Mezhdvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov* [Electronic technology: Interuniversity collection of scientific papers], ed. by D.V. Andreeva. Ul'yanovsk: UIGTU, 2005.
3. Grewal M., Henderson V., Miyasako R. Application of Kalman filtering to the calibration and alignment of inertial navigation systems, *IEEE Transactions, Automatic Control*, 1991, Vol. 36.
4. Alyamov A.E., Balasov I.Yu., Bazhanov V.A. Importozameshchenie elektronnoy komponentnoy bazy v oboronnom proizvodstve [Import substitution of electronic component base in defense production], *Vserossiyskiy ekonomicheskiy zhurnal EKO* [All-Russian economic journal ECO], 2015.
5. Ofitsial'nyy sayt AO «PKK Milandr» [Official website of PKK Milandr]. Available at: <https://ic.milandr.ru/> (accessed 22 December 2018).
6. Carmine Noviello. Mastering STM32, 2018.
7. Agus Kurniawan. Getting Started With STM32 Nucleo Development, 2016.
8. Geoffrey Brown, Discovering the STM32 Microcontroller, 2016.
9. Warren Gay. Beginning STM32: Developing with FreeRTOS, libopenm3 and GCC», 2018.
10. Vincent Mahout, Assembly Language Programming: Arm® Cortex®-M3», 2011.
11. Kosyakov M.S. Vvedenie v raspredelennyye vychisleniya [Introduction to distributed computing]. Saint Petersburg: NIU ITMO, 2014, 155 p.
12. Romanov A.A. Raspredelennyye vychisleniya i prilozheniya: ucheb. posobie [Distributed Computing and Applications: textbook]. UIGTU, 2018, 152 p.
13. Tanenbaum E., van Steen M. Raspredelennyye sistemy. Printsipy i paradigm [Distributed systems. Principles and paradigms]. Saint Petersburg: Piter, 2003, 877 p.
14. Tel' Zh. Vvedenie v raspredelennyye algoritmy [Introduction to distributed algorithms]: Transl. from english. Moscow: MTSNMO, 2009, 616 p.
15. Rukovodstvo SPI v3.06 [SPI Manual v3.06], *WebArchive [2015-2018]*. Available at: <http://www.ee.nmt.edu/~teare/ee308l/datasheets/S12SPIV3.pdf> (accessed 22 December 2020).
16. Stallings W. Operating Systems: Internal and design principles. Seventh edition. Prentice Hall, 2011.
17. Tel G. Introduction to Distributed Algorithms. Second edition. Cambridge University Press, 2000.
18. Blagodarov A.V. Programmirovaniye mikrokontrollov [Programming of microcontrollers]. Moscow, 2016, 242 p.
19. Endryu Tanenbaumom. Arkhitektura komp'yutera [Structured Computer Organization]. 6 ed., 2013, 801 p.
20. Belov A.V. Konstruirovaniye ustroystv na mikrokontrollovakh [Designing devices on microcontrollers]. Saint Petersburg: Nauka i Tekhnika, 2005, 256 p.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. А.С. Карпенков.

**Шипов Илья Александрович** – АО «Всероссийский научно-исследовательский институт «Сигнал»; e-mail: [shipov@gmail.com](mailto:shipov@gmail.com); г. Ковров, Россия; тел.: 89100905025; зам. начальника отдела.

**Shipov Ilya Aleksandrovich** – JSC “VNII Signal”, e-mail: [shipov@gmail.com](mailto:shipov@gmail.com); Kovrov, Russia; phone: +79100905025; deputy head of department.

**А.А. Черкасова, А.Ю. Шатилов, Т.А. Мухамедзянов**

**ПОДДЕРЖКА ПЕТЕЛЬ СЛЕЖЕНИЯ ЗА ФАЗОЙ В ПРИЕМНИКЕ  
СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ С ПОМОЩЬЮ ИЗМЕРЕНИЙ  
ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ**

*Спутниковые радионавигационные системы позволяют оценивать вектор состояния потребителя, включающий в себя координаты, скорость потребителя и время относительно системной шкалы. Требования к характеристикам данных систем постоянно растут, что делает необходимым усовершенствование используемых в них алгоритмов обработки радионавигационных сигналов. Одной из основных характеристик спутниковых радионавигационных систем является точность оценивания вектора состояния потребителя. Улучшить эту характеристику позволяет наличие оценок фазы принимаемых радионавигационных сигналов. В спутниковой радионавигационной системе ошибки оценок фазы в петле слежения имеют две составляющие – динамическую и шумовую. Для компенсации шумовой ошибки необходимо уменьшать эквивалентную шумовую полосу сглаживающего фильтра петли слежения за фазой. Однако минимально возможная полоса сглаживающего фильтра ограничена наличием динамики потребителя и качеством опорного генератора. Вследствие чего, при наличии динамики потребителя, чувствительность и надежность слежения за фазой ухудшается. Для компенсации динамической ошибки в петле слежения за фазой можно использовать информацию от инерциальной навигационной системы. Спутниковая радионавигационная система и инерциальная навигационная система обладают взаимодополняющими характеристиками. Использование поддержки петель слежения за фазой от инерциальной навигационной системы позволяет повысить чувствительность и надежность ее работы при наличии динамики потребителя. Предполагается, что при такой реализации чувствительность петель слежения за фазой будет ограничена только нестабильностью опорного генератора и погрешностью инерциальных измерений. Был разработан алгоритм поддержки петель слежения за фазой измерениями от инерциальной навигационной системы. Это привело к повышению чувствительности слежения за фазой, что обеспечивает повышение характеристик точности и надежности работы приемника спутниковой навигации. Проведено исследование разработанного алгоритма на модели, использующей в качестве входных данных реальные измерения спутниковой и инерциальной навигационных систем. Разработанный алгоритм реализован в программном обеспечении прототипа инерциально-спутниковой навигационной системы NV216C-IMU. Проведены экспериментальные исследования в условиях автомобильной динамики на открытой местности. Результаты исследований представлены в работе.*

*Спутниковая навигационная система; инерциальная система навигации; поддержка петель слежения.*

**A.A. Cherkasova, A.Yu. Shatilov, T.A. Muhamedzyanov**

**PHASE TRACKING LOOPS SUPPORTING IN THE SATELLITE  
NAVIGATION RECEIVER USING INERTIAL NAVIGATION SYSTEM  
MEASUREMENTS**

*Satellite radio navigation systems make it possible to evaluate the user's state vector, use coordinates, user speed and time relative to the system scale. The requirements for the characteristics of these systems constantly depend on the fact that they have application features in their algorithms for processing radio navigation signals. One of the main characteristics of satellite radio navigation systems is the accuracy of estimating the user's state vector. This characteristic can be improved by the presence of estimates of the phase of the received radio navigation signals. In a satellite radio navigation system, phase estimation errors in the tracking loop have two components: dynamic and noise. To compensate for the noise error, it is necessary to reduce the equivalent noise band of the anti-aliasing filter of the phase tracking loop. However, the minimum*

possible bandwidth of the smoothing filter is limited by the presence of consumer dynamics and the quality of the reference oscillator. As a result, in the presence of consumer dynamics, the sensitivity and reliability of phase tracking deteriorates. To compensate for the dynamic error in the phase tracking loop, information from an inertial navigation system can be used. The satellite radio navigation system and the inertial navigation system have complementary characteristics. The use of support for phase tracking loops from an inertial navigation system makes it possible to increase the sensitivity and reliability of its operation in the presence of consumer dynamics. It is assumed that with such an implementation, the sensitivity of the phase tracking loops will be limited only by the instability of the reference oscillator and the error of inertial measurements. To improve the characteristics of accuracy, sensitivity and reliability of the coherent mode of operation of the end device, an algorithm was developed to support phase tracking loops with measurements from an inertial navigation system. A study of the developed algorithm was carried out on a model that uses real measurements of satellite and inertial navigation systems as input data. The developed algorithm is implemented in the software of the NV216C-IMU inertial satellite navigation system prototype. Experimental studies were carried out in the conditions of automobile dynamics in open areas. The research results are presented in the work.

*Satellite navigation system; inertial navigation system; tracking loop support.*

**Введение.** Спутниковая радионавигационная система [12] и инерциальная навигационная система (ИНС) [11] обладают взаимодополняющими характеристиками [3]. Объединив эти системы можно существенно повысить характеристики конечного устройства [4, 6]. Для этого необходимо совместно обрабатывать измерения спутниковой и инерциальной навигационных систем. Одним из способов совместной обработки является поддержка петли слежения за фазой (ФАП) оценками ускорений от ИНС [2]. После анализа работ по построению схем комплексирования на первичном этапе [5, 13–20], разработана система слежения за фазой с поддержкой от ИНС. Проведено исследование этого способа взаимной обработки измерений спутниковой и инерциальной навигационных систем на модели и в реальной аппаратуре.

**Разработка системы слежения за фазой с поддержкой от инерциальной навигационной системы.** Модель предназначена для исследования разработанного алгоритма поддержки петель слежения за фазой (ФАП) оценками ускорений от инерциальной навигационной системы. Модель работает по следующим данным, выгружаемым из приемника спутниковой навигации с темпом 50 Гц:

- ◆  $\varphi_{ch,cycle(k)}$  – полная часть фазы [циклы];
- ◆  $\varphi_{ch(k)}$  – дробная часть фазы [часть цикла];
- ◆  $\omega_{ch(k)}$  – скорость в канале [Гц];
- ◆  $a_{ch(k)}$  – ускорение в канале [Гц/сек];
- ◆  $a_{ISNS(k)}$  – ускорение от ИНС [Гц/сек];
- ◆ Статус когерентного слежения (0 – когерентное, 1 – некогерентное, 2 – режим счисления);
- ◆ Категория эквивалентной шумовой полосы (ЭШП) [9];
- ◆  $T_{ch(k)}$  – дискрет поступления данных из канала [сек];
- ◆  $t_{ch(k)}$  – время, соответствующее текущим данным в канале [сек];
- ◆  $t_{ISNS(k)}$  – время, соответствующее текущим данным в ИНС [сек];
- ◆  $freq_{Carrier(k)}$  – несущая частота принимаемого сигнала от АСН [Гц].

Всего  $k = 1 : N_{receiver\_solution}$  наборов данных.

Используются следующие параметры петли ФАП:

- ◆ Период когерентного накопления в корреляторе:  $T_{accum} = 0,02$  сек.
- ◆ Частота дискретизации в модели (удовлетворяет теореме Котельникова [7]):  $freq_{sampling} = 10$  кГц;

♦ Период дискретизации:  $dt = \frac{1}{freq_{sampling}} = 0,1$  мс;

♦ Поднесущая частота сигнала:  $freq_{subcarrier} = 0$  Гц;

♦ Коэффициент амплитудного детектора:  $\alpha = 1$ .

Информация, получаемая от пользователя:

♦ Отношение с/ш:  $SNR$  [дБГц];

♦ Один из двух вариантов подстройки категории ЭШП сглаживающего фильтра ( $0$  – категория постоянна и равна начальному значению, заданному пользователем,  $1$  – используется алгоритм подстройки категории ЭШП);

♦ Один из двух вариантов входного сигнала ( $1$  – Data;  $2$  – Pilot [8]);

♦ Начальное значение категории ЭШП сглаживающего фильтра:  $Band_{initial}$  [категория].

В соответствии с исходными данными формируются отсчеты входного сигнала с периодом дискретизации  $dt$ :

$$t = [1: T_{accum} \cdot freq_{sampling}] \cdot dt = [1: N_{signal}] \cdot dt. \quad (1)$$

Пусть  $j = [1: N_{signal}]$ , тогда:

$$Signal_j = \cos\left(2\pi \cdot (Freq_{signal(k)} \cdot t_j + \varphi_{ch(k-1)})\right); \quad (2)$$

$$Freq_{signal(k)} = freq_{subcarrier} + \frac{(\delta\varphi_{ch,cycle} + \delta\varphi_{ch})}{T_{accum}}; \quad (3)$$

$$\delta\varphi_{ch,cycle} = \varphi_{ch,cycle(k)} - \varphi_{ch,cycle(k-1)}; \quad (4)$$

$$\delta\varphi_{ch} = \varphi_{ch(k)} - \varphi_{ch(k-1)}. \quad (5)$$

Описание алгоритма фильтра ФАП с использованием поддержки на этапе экстраполяции. Третья компонента вектора состояния фильтра – ошибка ускорения фазы, состоящая из нестабильности опорного генератора и ошибок ИНС. Вектор состояния фильтра ФАП:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \varphi \\ \omega \\ \xi \end{bmatrix}; \quad \xi = -(\xi_{a_{SNS}} + \xi_{a_{OR}}). \quad (6)$$

Оценка параметров вектора состояния на шаге  $k-1$ :

$$\hat{\mathbf{x}}_{k-1} = \begin{bmatrix} \hat{\varphi}_{k-1} \\ \hat{\omega}_{k-1} \\ \hat{\xi}_{k-1} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Динамическая модель системы и матрица коэффициентов управляющего воздействия:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & dt & 0 \\ 0 & 1 & dt \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ dt \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Управляющее воздействие:

$$\mathbf{u}_k = a_{SNS(k)}. \quad (9)$$

Для получения фазы каждого отсчета референсного сигнала производится экстраполяция:

$$\tilde{\mathbf{x}}_{k,0} = \hat{\mathbf{x}}_{k-1}; \quad (10)$$

$$\tilde{\mathbf{x}}_{k,j} = \mathbf{F} \cdot \tilde{\mathbf{x}}_{k,j-1} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}_k. \quad (11)$$

Далее формируются отсчеты опорного сигнала:

$$Signal_{ref,j} = \exp(-1i \cdot 2\pi \cdot (freq_{subcarrier} \cdot t_j + \tilde{\mathbf{x}}_{k,j(1,1)})). \quad (12)$$

Корреляционная сумма рассчитывается следующим образом:

$$IQ_k = \sum_{j=1}^{N_{signal}} Signal_j \cdot Signal_{ref,j}. \quad (13)$$

Далее производится компенсация провалов I/Q в исходном сигнале и приведение к единичной амплитуде:

$$IQ_k = \frac{IQ_k}{|IQ_k|}. \quad (14)$$

ОСШ на выходе I-коррелятора:

$$q = \sqrt{10^{0.1 \cdot SNR} \cdot 2 \cdot T_{accum}}. \quad (15)$$

Добавление отсчетов дискретного белого гауссовского шума (ДБГШ) [10]  $\zeta_{IQ,k}$  с единичным СКО и нулевым мат.ожиданием к отсчетам I/Q:

$$IQ_k = IQ_k \cdot q + (\zeta_{I,k} + 1i \cdot \zeta_{Q,k}). \quad (16)$$

Амплитудный детектор:

$$A_k = A_{k-1} \cdot (1 - \alpha \cdot T_{accum}) + \alpha \cdot T_{accum} \cdot |real(IQ_k)|. \quad (17)$$

Если пользователь выбрал вариант Data-сигнала, то используется следующий дискриминатор [11]:

$$u_{d,k} = \frac{sign(real(IQ_k)) \cdot imag(IQ_k)}{2\pi \cdot A_k}. \quad (18)$$

Если пользователь выбрал вариант Pilot-сигнала, то используется дискриминатор [1]:

$$u_{d,k} = \frac{imag(IQ_k)}{2\pi \cdot A_k}. \quad (19)$$

Эквивалентная шумовая полоса  $\Delta F_{\text{ЭШП},k}$  задается пользователем или используется алгоритм автоподстройки полосы. Затем вычисляются коэффициенты фильтра, в соответствии с  $\Delta F_{\text{ЭШП},k}$ :

$$K_k = \begin{bmatrix} K_{1,k} \\ K_{2,k} \\ K_{3,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \cdot T \cdot (1.2 \cdot \Delta F_{\text{ЭШП},k}^3)^{\frac{2}{3}} \\ 2 \cdot T \cdot (1.2 \cdot \Delta F_{\text{ЭШП},k}^3)^{\frac{1}{3}} \\ T \cdot (1.2 \cdot \Delta F_{\text{ЭШП},k}^3) \end{bmatrix}. \quad (20)$$

Коррекция фильтра происходит следующим образом:

$$\tilde{x}_{k,NSignal} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{\varphi}_{k,NSignal} \\ \tilde{\omega}_{k,NSignal} \\ \tilde{\xi}_{k,NSignal} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{\varphi}_{k,NSignal} \\ \tilde{\omega}_{k,NSignal} \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (21)$$

$$\hat{x}_k = \tilde{x}_{k,NSignal} + K_k \cdot u_{d,k}. \quad (22)$$

Моделирование системы слежения за фазой с поддержкой от инерциальной навигационной системы с использованием реальных измерений. При работе по Data-компоненте в условиях наличия динамики по линии визирования только из-за движения навигационного космического аппарата (НКА) достигается чувствительность в 20 дБГц, как в петле с поддержкой, так и в петле без поддержки.

Анализируя представленные на рис. 1–3 результаты, видно, что отсутствуют срывы в слежении за фазой. Оценка скорости в петле с поддержкой менее шумная. Оценки ускорения определяются оценками ИСНС.

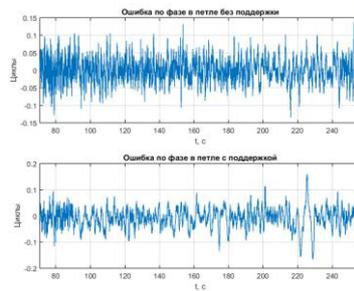


Рис. 1. Ошибка по фазе,  $s/\omega=20$  дБГц, динамика – только НКА

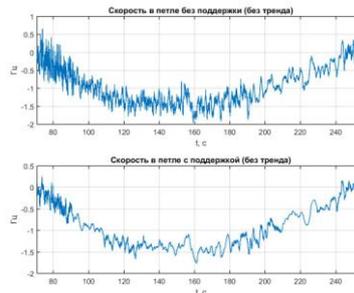


Рис. 2. Оценка скорости,  $s/\omega=20$  дБГц, динамика – только НКА

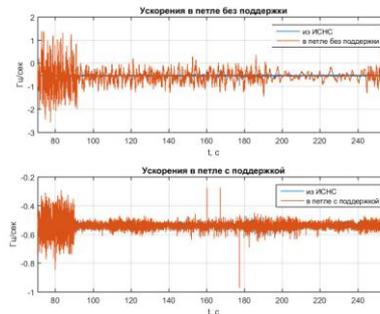


Рис. 3. Оценка ускорения,  $s/\omega=20$  дБГц, динамика – только НКА

При работе по Data-компоненте, в условиях наличия динамики по линии визирования из-за движения НКА и движения потребителя (автомобильная динамика), достигается чувствительность в 22 дБГц только в петле с поддержкой, в то время как в петле без поддержки такая чувствительность слежения не обеспечивается. Без поддержки от ИСНС чувствительность в динамике составляет 27 дБГц.

Анализируя представленные на рис. 4–6 результаты, видно, что в петле без поддержки регулярно происходят срывы в слежении, во время которых оценки ФАП не валидны.

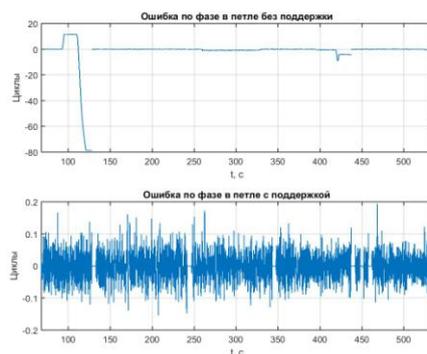


Рис. 4. Ошибка по фазе,  $c/u=22$  дБГц, динамика – НКА и потребитель

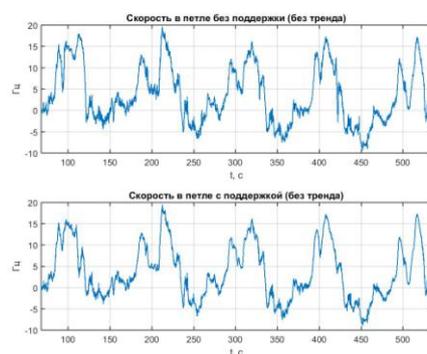


Рис. 5. Оценка скорости,  $c/u=22$  дБГц, динамика – только НКА и потребитель

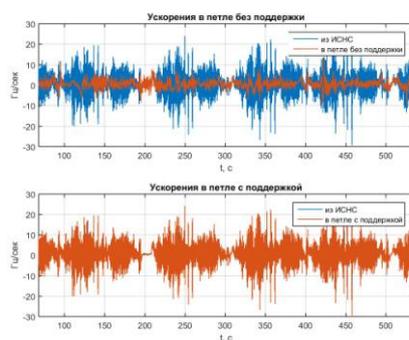


Рис. 6. Оценка ускорения,  $c/u=22$  дБГц, динамика – только НКА и потребитель

При работе по Pilot-компоненте в условиях наличия динамики по линии визуирования только из-за движения НКА достигается чувствительность в 11 дБГц, как в петле с поддержкой, так и в петле без поддержки.

Анализируя представленные на рис. 7–9 результаты, видно, что в петле с поддержкой срывов не наблюдается, в петле без поддержке виден одиночный cycle slip. Оценка скорости в петле с поддержкой менее шумная. Оценки ускорения определяются оценками ИСНС.

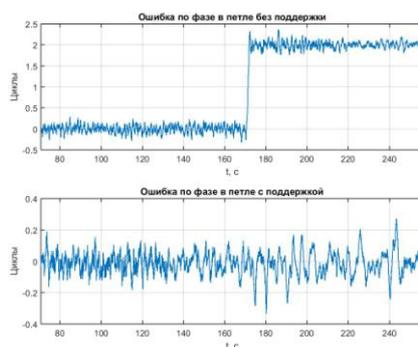


Рис. 7. Ошибка по фазе,  $c/\text{ш}=11$  дБГц, динамика – только НКА

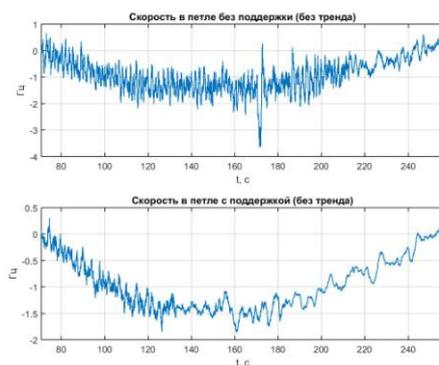


Рис. 8. Оценка скорости,  $c/\text{ш}=11$  дБГц, динамика – только НКА

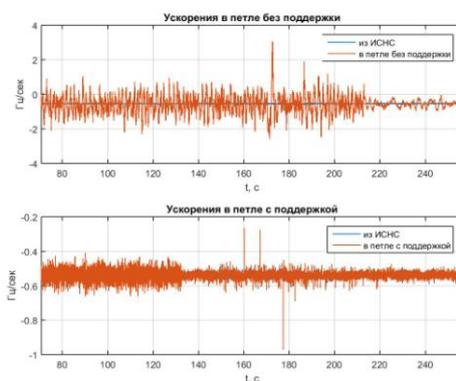


Рис. 9. Оценка ускорения,  $c/\text{ш}=11$  дБГц, динамика – только НКА

При работе по Pilot-компоненте в условиях наличия динамики по линии визирования из-за движения НКА и движения потребителя (автомобильная динамика) достигается чувствительность в 14 дБГц только в петле с поддержкой, в то время как в петле без поддержки такая чувствительность слежения не обеспечивается. Без поддержки от ИСНС в динамике чувствительность составляет 21 дБГц.

Анализируя представленные на рис. 10–12 результаты, видно, что в петле без поддержки регулярно происходят срывы в слежении, во время которых оценки ФАП не валидны.

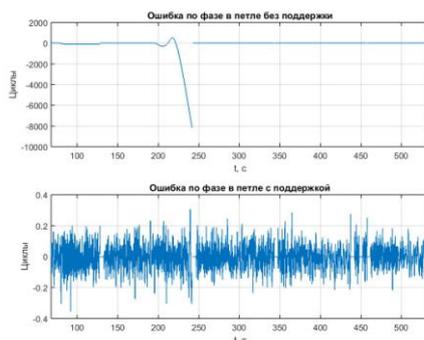


Рис. 10. Ошибка по фазе,  $c/w=14$  дБГц, динамика – НКА и потребитель

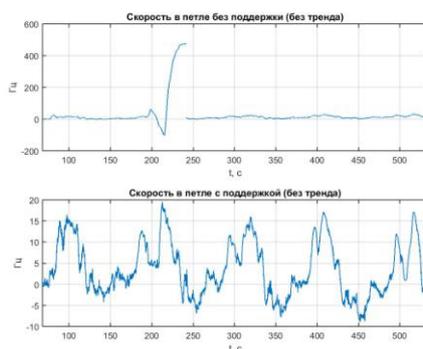


Рис. 11. Оценка скорости,  $c/w=14$  дБГц, динамика – только НКА и потребитель

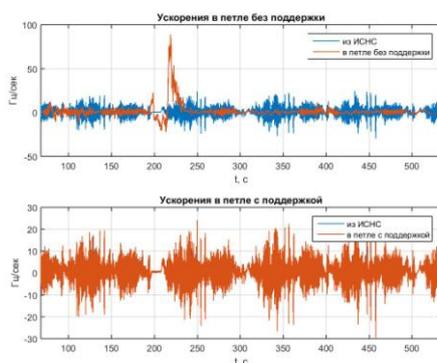


Рис. 12. Оценка ускорения,  $c/w=14$  дБГц, динамика – только НКА и потребитель

**Экспериментальные исследования системы слежения за фазой с поддержкой от инерциальной навигационной системы в прототипе ИСНС NV216С-IMU.** Для проведения испытаний на реальной аппаратуре, приведенный выше алгоритм был реализован в ПО приемника. Во время испытаний прототип ИСНС и антенна были установлены на крыше автомобиля. Автомобиль двигался по парковке под открытым небом, что минимизировало затенение спутников и воздействие многолучевости. Максимальная скорость автомобиля не превышала 40 км/ч.

Два канала приемника настраивались на слежение за одним и тем же сигналом. Поддержка от ИСНС по алгоритму, описанному выше, использовалась только в одном канале. В процессе движения происходило одновременное затягивание петель ФАП в этих каналах (рис. 13). Чувствительность слежения за фазой сигнала определялась по минимально возможной ЭШП сглаживающего фильтра ФАП, при которой не наблюдалось срывов слежения за фазой.

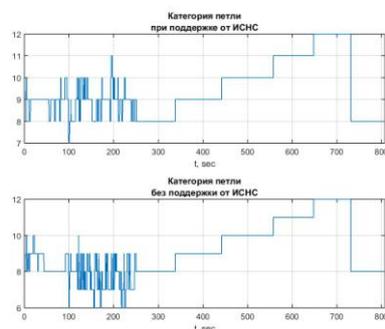


Рис. 13. Процесс затягивания петли слежения ФАП, динамика – только НКА и потребитель

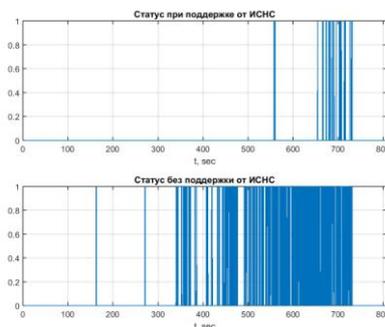


Рис. 14. Статус слежения за фазой в петле с поддержкой и без поддержки. 0 – когерентное слежение, 1 – переход в некогерентный режим (срыв слежения за фазой)

Полученные экспериментальные результаты подтверждают результаты моделирования. Петля с поддержкой следит вплоть до 11 категории петли, что соответствует чувствительности в 22 дБГц, петля без поддержки следит только до 8 категории петли, чувствительность – 27 дБГц.

**Заключение.** Представлен разработанный алгоритм совместной обработки измерений спутниковой и инерциальной навигационных систем. Алгоритм реализует поддержку петли ФАП оценками ускорений от инерциальной навигационной системы. Проведено исследование алгоритма на модели, которая использует ранее записанные логи измерений реальной приемной аппаратуры.

В модели получены следующие характеристики чувствительности слежения за фазой в условиях низкой динамики, обусловленной только движением НКА:

- ◆ 20 дБГц по Data-компоненте;
- ◆ 11 дБГц по Pilot-компоненте.

Чувствительность слежения за фазой в условиях низкой динамики ограничена в основном качеством опорного генератора.

В условиях более высокой динамики, обусловленной взаимным движением НКА и потребителя, чувствительности слежения за фазой составила:

- ◆ 22 дБГц по Data-компоненте (без поддержки 27 дБГц);
- ◆ 14 дБГц по Pilot-компоненте (без поддержки 21 дБГц).

В условиях наличия динамики потребителя не удалось достичь тех же значений чувствительности слежения за фазой, что и в условиях низкой динамики, в связи с наличием погрешности инерциальных измерений ИНС (по Data-компоненте не дотянули 2 дБ, по Pilot-компоненте 3 дБ).

Гораздо важнее то, что при наличии динамики потребителя, улучшение чувствительности благодаря поддержке составило 5 дБ для Data-компоненты и 7 дБ для Pilot-компоненты по сравнению с чувствительностью слежения за фазой в ФАП без поддержки.

Разработанный алгоритм внедрен в ПО прототипа инерциально-спутниковой навигационной системы. Проведены испытания работы алгоритма в прототипе NV216С-IMU в автомобильной динамике потребителя. Результаты испытаний подтвердили полученные при моделировании характеристики.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бакитъко Р.В., Дворкин В.В., Карутин С.Н., Корогодин И.В., Нагин И.А., Перов А.И., Повалев А.А., Фаткулин Р.Ф., Шатилов А.Ю. ГЛОНАСС. Модернизация и перспективы развития: монография / под ред. А.И. Перова. – М.: Радиотехника, 2020. – 1072 с.
2. Shatilov A.Y., Nagin I.A. A Tightly-Coupled GNSS/IMU Integration Algorithm for Multi-Purpose INS // 25<sup>th</sup> International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation: Proceedings ION GNSS. Nashville TN. 2012. – P. 867-873.
3. Salychev O.S. Applied Inertial Navigation: Problems and Solutions. – М.: BMSTU Press, 2004.
4. Grewal M.S., Weill L.R., Andrews A.P. Global Positioning Systems, Inertial navigation, and Integration. – New York: A John Wiley & Sons, Inc. Publication, 2001. – 392 p.
5. Оганесян А.А. Разработка алгоритмов глубокой интеграции в инерциально-спутниковых навигационных системах перспективных авиационных комплексов фронтовой авиации: дисс. ... канд. техн. наук. – М., 2002.
6. Белагин О.В. Основы радионавигации: учеб. пособие для вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Сов. радио, 1977. – 320 с.
7. Харкевич А.А. Основы радиотехники. – 3-е изд., стер. – М.: Физматлит, 2007. – 512 с.
8. ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Общее описание системы с кодовым разделением сигналов. Редакция 1,0. – М., 2016. – 64 с. – [http://russianspacesystems.ru/wpcontent/uploads/2016/08/ICD\\_GLONASS\\_rus\\_v5.1.pdf](http://russianspacesystems.ru/wpcontent/uploads/2016/08/ICD_GLONASS_rus_v5.1.pdf).
9. Первачев С.В. Радиоавтоматика: учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 1982. – 296 с.
10. Степанов О.А. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч. 1. Введение в теорию оценивания. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», 2010. – 509 с.
11. Перов А.И. Методы и алгоритмы оптимального приема сигналов в аппаратуре потребителей спутниковых радионавигационных систем. – М.: Радиотехника, 2012. – 240 с.
12. Roddy D. Satellite communications. – Fourth ed. – Publisher: McGraw-Hill, New York, 2006. – 636 p.
13. Перов А.И., Шатилов А.Ю. Синтез комбинированного алгоритма комплексирования на первичном и вторичном уровнях в инерциально-спутниковой системе навигации // Радиотехника. – 2005. – № 7. – С. 4-14.

14. Шатилов А.Ю. Разработка методов и алгоритмов оптимальной обработки сигналов и информации в инерциально-спутниковых системах навигации: дисс. ... канд. техн. наук. – М., 2007.
15. Харисов В.Н., Аникин А.Л., Оганесян А.А. Статистический анализ характеристик помехоустойчивости алгоритма глубокой интеграции приемника спутниковой навигации и инерциальных датчиков // Радиотехника. – 2005. – № 7. – С. 21-26.
16. Jovancevic A., Ganguly S. Real-Time Implementation of a Deeply Integrated GNSS-INS Architecture // ION GNSS 18th International Meeting of the Satellite Division. Long Beach, CA, 2005. – P. 503-511.
17. Шатилов А.Ю., Нагин И.А. Тесно связанная схема комплексирования ИНС и НАП СРНС // Радиооптические технологии в приборостроении: Сб. материалов научно-технической конференции. г. Туапсе, 2012.
18. Шатилов А.Ю., Нагин И.А. Тесно связанный алгоритм комплексирования НАП СРНС и многоцелевой ИНС // Радиотехника. – 2012. – № 6. – С. 118-125.
19. Шатилов А.Ю. Использование критерия срыва слежения при оценке помехоустойчивости следящих систем // Радиотехника. – 2010. – № 11. – С. 29-33.
20. Шатилов А.Ю. Методика расчета помехоустойчивости комплексной ФАП в НАП СРНС/ИНС // Радиотехника. – 2009. – № 7. – С. 113-120.

## REFERENCES

1. Bakit'ko R.V., Dvorkin V.V., Karutin S.N., Korogodin I.V., Nagin I.A., Perov A.I., Povalyaev A.A., Fatkulin R.F., Shatilov A.Yu. GLONASS. Modernizatsiya i perspektivy razvitiya: monografiya [GLONASS. Modernization and prospects of development: monograph], ed. by A.I. Perova. Moscow: Radiotekhnika, 2020, 1072 p.
2. Shatilov A.Y., Nagin I.A. A Tightly-Coupled GNSS/IMU Integration Algorithm for Multi-Purpose INS, 25<sup>th</sup> International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation: Proceedings ION GNSS. Nashville TN, 2012, pp. 867-873.
3. Salychev O.S. Applied Inertial Navigation: Problems and Solutions. Moscow: BMSTU Press, 2004.
4. Grewal M.S., Weill L.R., Andrews A.P. Global Positioning Systems, Inertial navigation, and Integration. New York: A John Wiley & Sons, Inc. Publication, 2001, 392 p.
5. Oganesyana A.A. Razrabotka algoritmov glubokoy integratsii v inertsiyal'no-sputnikovykh navigatsionnykh sistemakh perspektivnykh aviatsionnykh kompleksov frontovoy aviatsii: diss. ... kand. tekhn. nauk [Development of algorithms for deep integration in inertial-satellite navigation systems of advanced aviation complexes of front-line aviation: cand. of eng. sc. diss.]. Moscow, 2002.
6. Belavin O.V. Osnovy radionavigatsii: ucheb. posobie dlya vuzov [Fundamentals of radio navigation: a textbook for universities]. 2 ed. Moscow: Sov. radio, 1977, 320 p.
7. Kharkevich A.A. Osnovy radiotekhniki [Fundamentals of radio engineering]. 3 ed. Moscow: Fizmatlit, 2007, 512 p.
8. GLONASS. Interfeysnyy kontrol'nyy dokument. Obshchee opisaniye sistemy s kodovym razdeleniem signalov [GLONASS. Interface control document. General description of a system with code separation of signals]. Revision 1.0. Moscow, 2016, 64 p. Available at: [http://russianspacesystems.ru/wpcontent/uploads/2016/08/ICD\\_GLONASS\\_rus\\_v5.1.pdf](http://russianspacesystems.ru/wpcontent/uploads/2016/08/ICD_GLONASS_rus_v5.1.pdf).
9. Pervachev S.V. Radioavtomatika: uchebnik dlya vuzov [Radio automation: textbook for universities]. Moscow: Radio i svyaz', 1982, 296 p.
10. Stepanov O.A. Osnovy teorii otsenivaniya s prilozheniyami k zadacham obrabotki navigatsionnoy informatsii. Ch. 1. Vvedeniye v teoriyu otsenivaniya [Fundamentals of estimation theory with applications to navigation information processing tasks. Part 1. Introduction to estimation theory]. 2 ed. Saint Petersburg: GNTS RF OAO «Kontsern «TSNII «Elektropryor», 2010, 509 p.
11. Perov A.I. Metody i algoritmy optimal'nogo priema signalov v apparature potrebiteley sputnikovykh radionavigatsionnykh sistem [Methods and algorithms of optimal signal reception in the equipment of consumers of satellite radio navigation systems]. Moscow: Radiotekhnika, 2012, 240 p.
12. Roddy D. Satellite communications. Fourth ed. Publisher: McGraw-Hill, New York, 2006, 636 p.
13. Perov A.I., Shatilov A.Yu. Sintez kombinirovannogo algoritma kompleksirovaniya na pervichnom i vtorichnom urovnyakh v inertsiyal'no-sputnikovoy sisteme navigatsii [Synthesis of a combined algorithm of integration at the primary and secondary levels in an inertial-satellite navigation system], Radiotekhnika [Radio Engineering], 2005, No. 7, pp. 4-14.

14. *Shatilov A.Yu.* Razrabotka metodov i algoritmov optimal'noy obrabotki signalov i informatsii v inertial'no-sputnikovykh sistemakh navigatsii: diss. ... kand. tekhn. nauk [Development of methods and algorithms for optimal signal and information processing in inertial satellite navigation systems: cand. of eng. sc. diss.]. Moscow, 2007.
15. *Kharisov V.N., Anikin A.L., Oganeyan A.A.* Statisticheskiy analiz kharakteristik pomexoustoychivosti algoritma glubokoy integratsii priemnika sputnikovoy navigatsii i inertial'nykh datchikov [Statistical analysis of noise immunity characteristics of the algorithm of deep integration of satellite navigation receiver and inertial sensors], *Radiotekhnika* [Radio Engineering], 2005, No. 7, pp. 21-26.
16. *Jovanovic A., Ganguly S.* Real-Time Implementation of a Deeply Integrated GNSS-INS Architecture, *ION GNSS 18th International Meeting of the Satellite Division*. Long Beach, CA, 2005, pp. 503-511.
17. *Shatilov A.Yu., Nagin I.A.* Tesnosvyazannaya skhema kompleksirovaniya INS i NAP SRNS [A closely connected scheme of integration of INS and NAP SRNS], *Radioopticheskie tekhnologii v priborostroenii: Sb. materialov nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Radio-optical technologies in instrument engineering: Collection of materials of scientific and technical conference]. Tuapse, 2012.
18. *Shatilov A.Yu., Nagin I.A.* Tesno svyazannyy algoritm kompleksirovaniya NAP SRNS i mnogotselevoy INS [A closely related algorithm for integrating NAP SRNS and multi-purpose INS], *Radiotekhnika* [Radio Engineering], 2012, No. 6, pp. 118-125.
19. *Shatilov A.Yu.* Ispol'zovanie kriteriya sryva slezheniya pri otsenke pomexoustoychivosti sledyashchikh sistem [The use of the tracking failure criterion in assessing the noise immunity of tracking systems], *Radiotekhnika* [Radio Engineering], 2010, No. 11, pp. 29-33.
20. *Shatilov A.Yu.* Metodika rascheta pomexoustoychivosti kompleksnoy FAP v NAP SRNS/INS [Methodology for calculating the noise immunity of a complex FAP in the SRNS/INS], *Radiotekhnika* [Radio Engineering], 2009, No. 7, pp. 113-120.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. О.Э. Красников.

**Черкасова Анастасия Алексеевна** – АО КБ НАВИС; e-mail: cherkasova\_aa@navis.ru; г. Москва, Россия; тел.: +74956656148; инженер-программист 3 кат.

**Шатилов Александр Юрьевич** – e-mail: shatilov@navis.ru; начальник отделения базовых технологий ИНС.

**Мухамедзянов Тимур Алеевич** – e-mail: muhamedzyanov\_ta@navis.ru; инженер-программист 1 кат.

**Cherkasova Anastasia Alekseevna** – АО КБ NAVIS; e-mail: cherkasova\_aa@navis.ru; Moscow, Russia; phone: +74956656148; software engineer 3rd cat.

**Shatilov Alexander Yurievich** – e-mail: shatilov@navis.ru; head of the department of basic technologies of INS.

**Mukhamedzyanov Timur Aleevich** – e-mail: muhamedzyanov\_ta@navis.ru; software engineer 1st cat.

## Раздел V. Техническое зрение

УДК 004.383

DOI 10.18522/2311-3103-2022-1-238-247

**Н.А. Бочаров, А.В. Глухов, Н.Б. Парамонов**

### **ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МОДУЛИ COM-EXPRESS НА БАЗЕ МИКРОПРОЦЕССОРОВ ЭЛЬБРУС ДЛЯ 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. Необходимость учета предельных массогабаритных характеристик, требований к системе охлаждения вычислительного комплекса, требований к бортовой электросети и потребляемой мощности, требований к производительности и к внешним интерфейсам обуславливают сложность и дороговизну разработки бортовых вычислительных комплексов. Отсутствие унификации вычислительных модулей при разработке создает дополнительные сложности для разработчиков робототехнических комплексов, повышает конечную стоимость робототехнических комплексов и усложняет его модернизацию. Использование стандартизированного фактора типа COM-Express позволяет разделить бортовой вычислительный комплекс на универсальную высокотехнологическую системную часть и плату-носитель. Микропроцессор, контроллер периферийных интерфейсов, оперативная память и жесткий диск размещаются на системном модуле, который выпускается большим тиражом и может быть заменен на более новый при появлении новых поколений отечественной вычислительной техники. Плата-носитель в свою очередь проста в разработке и дешева в производстве, а по своим характеристикам может быть скомпонована для конкретного робототехнического комплекса. В данной статье рассмотрены вычислительные модули в формате COM-Express на базе отечественных микропроцессоров Эльбрус. Показана их применимость для создания перспективных бортовых вычислительных комплексов. Полученные авторами результаты говорят о перспективах импортозамещения в области робототехники.*

*Бортовые вычислительные комплексы; робототехника; COM-Express; Эльбрус; техническое зрение.*

**N.A. Bocharov, A.V. Gluhov, N.B. Paramonov**

### **COM-EXPRESS MODULES BASED ON ELBRUS MICROPROCESSORS FOR ONBOARD COMPUTING SYSTEMS**

*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. The need to take into account the maximum weight and size characteristics, the requirements for the cooling system of the computing complex, the requirements for on-board*

*power supply and power consumption, performance requirements and external interfaces cause the complexity and high cost of developing on-board computing systems. The lack of unification of computing modules during development creates additional difficulties for developers of robots, increases the final cost of the robot and complicates its modernization. The use of a standardized form factor such as COM-Express makes it possible to divide the onboard computing complex into a universal high-tech system part and a carrier board. The microprocessor, peripheral interface controller, RAM and hard disk are placed on the system module, which is produced in large quantities and can be replaced with a newer one when new generations of domestic computing equipment appear. The carrier board, in turn, is easy to develop and cheap to manufacture, and according to its characteristics can be configured for a specific robotic complex. This article discusses COM-Express modules based on domestic Elbrus microprocessors. Their applicability for the creation of promising on-board computing systems is shown. The results obtained by the authors indicate the prospects of import substitution in the field of robotics.*

*Onboard computing systems; robotics; COM-Express; Elbrus; technical vision.*

**Введение.** Управление современными автономными робототехническими комплексами (РТК) осуществляются с помощью специализированных бортовых вычислительных комплексов. Развитие возможностей сенсорных систем, систем глобальной навигации, рост вычислительной мощности и совершенствование алгоритмов позволяют создавать бортовые вычислительные комплексы, обладающие широкими интеллектуальными возможностями. Требования к бортовым вычислительным комплексам помимо производительности, определяются во многом требованиями к самим РТК. Для РТК специального назначения эти требования еще больше повышаются за счет необходимости дополнительной защиты от внешних воздействий, а также защиты информации, обрабатываемой на борту [1].

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 [4]. Использование стандартизированного малогабаритного формата вычислительных модулей, такого как COM-Express, позволило бы открыть новые возможности разработчикам робототехнических комплексов.

В данной статье рассмотрены вычислительные модули в формате COM-Express на базе микропроцессоров Эльбрус и их применимость в качестве систем управления 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 требованиями 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.

**Бортовые вычислительные модули в форм-факторе SOM-Express.** Сочетание на одной печатной плате миниатюрных процессоров и крупных простых компонентов приводит к тому, что площадь многослойных печатных плат расходуется неэффективно. Кроме того, все простые изменения в компоновке печатной платы будут приводить к повторной дорогостоящей подготовке производства, что также неэффективно.[5]

Естественным выходом из такой ситуации является применение систем на модуле (SOM) и разделение устройства на несколько печатных плат: универсальную высокотехнологическую системную часть и плату-носитель. В таком подходе высокотехнологичные компоненты размещаются на системном модуле, который может выпускаться большим тиражом и иметь широкий спектр применений. Плата-носитель, наоборот, оптимизирована и скомпонована для конкретного применения.

Характерной чертой всех изделий класса SOM и модулей SOM Express, в частности, является то, что они устанавливаются на клиентские базовые платы, где реализуются необходимые разъемы и отражается прикладная специфика. В аспектах, не относящихся к сфере компетенции спецификации SOM Express, клиент должен проектировать базовую плату по собственному усмотрению, сообразуясь с требованиями конкретных задач и воплощая свои ноу-хау [6].

В настоящий момент на базе микропроцессоров Эльбрус реализовано три варианта вычислительных модулей в формате SOM Express.

Вычислительный модуль «E4C/COM [7] реализован на базе микропроцессора «Эльбрус-4С». Объем памяти составляет 8 Гб (два канала по 4GB DDR3L с ECC каждый). Внутри модуля реализованы высокоскоростные интерфейсы (PCI express, 1000BASE-T) с использованием контроллера периферийных интерфейсов (КПИ). Межмодульный обмен информацией и управление внешними устройствами производятся через три соединителя серии СНЦ144К-100. Габаритные размеры вычислительного модуля составляют 125×95×9,8 мм без радиатора. Масса без радиатора составляет 140 г. Внешний вид платы E4C/COM изображен на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид модуля E4C/COM

Вычислительный модуль основан на микропроцессоре Эльбрус-4С – многоядерном универсальном высокопроизводительном микропроцессоре, построенном в соответствии с архитектурой «Эльбрус» версии 4. Каждое ядро процессора декодирует и отправляет на исполнение до 23 операций за такт. Эльбрус-4С представ-

ляет собой систему на кристалле, содержащую 4 вычислительных ядра, кэш-память 2-го уровня общим объемом 8 Мегабайт, 3 контроллера памяти, 3 канала межпроцессорного обмена и канал ввода-вывода. Рабочая тактовая частота микросхемы составляет 800 МГц. Кристалл выполнен по технологической норме 65 нм, средняя рассеиваемая мощность составляет 45 Вт. Имеются средства для значительного снижения рассеиваемой мощности.

На базе отечественного микропроцессора Эльбрус-1С+ ПАО «ИНЭУМ им. И.С. Брука» разработан процессорный модуль МП18 [8], выполненный в форм-факторе Com Express Type 6. Модуль включает в себя полноценное процессорное ядро с контроллером периферийных интерфейсов КПИ-2, оперативную память, выполненную методом поверхностного монтажа для улучшения характеристик по вибрации, а также с интегрированным твердотельным носителем объемом от 8 до 64 Гб. Для расширения коммуникационных способностей изделия на отдельный разъем выведен дополнительный канал ethernet 10/100/1000.

Модуль поставляется в комплекте с теплораспределительной пластиной, обеспечивающей передачу выделяемого тепла на охлаждающие конструкции изделия Заказчика.

Встроенное в процессор Эльбрус-1С+ графическое ядро позволяет применять модуль для отображения информации на пульт управления. Поддерживается вывод на два канала HDMI и LVDS. Габаритные размеры вычислительного модуля составляют 95x125x12 мм. Масса без радиатора составляет 120 г. Внешний вид платы МП18 приведен на рис. 2.



Рис. 2. Внешний вид модуля МП18

Плата МП18 основана на микропроцессоре Эльбрус-1С+ – высокопроизводительном экономичном микропроцессоре для встраиваемых решений, изготовленного по технологии 40 нм. Он содержит одно ядро на архитектуре «Эльбрус» на базе широкого командного слова (VLIW) с тактовой частотой ядра 1000 МГц и графическое ядро с тактовой частотой 800 МГц с поддержкой OpenGL 2.1 и OpenCL 1.1. В процессор интегрирован двухканальный контроллер памяти DDR3-1600 и канал ввода-вывода для подключения южного моста КПИ-2. Микропроцессор разработан и производится АО «МЦСТ».

Модуль E2C3-COM [9], на базе процессора Эльбрус-2С3, выполнен в форм-факторе COM Express Type 6 Basic. Представляет собой «компьютер на модуле» – встраиваемый одноплатный компьютер промышленного назначения, выполненный в бескорпусном исполнении для использования в качестве мезонина, устанавливаемого на специализированных платах носителях.

Модуль включает в себя полноценное процессорное ядро с интегрированными контроллерами периферийных интерфейсов и видеоконтроллером, оперативной памятью, выполненной методом поверхностного монтажа, а также с интегрированным твердотельным носителем объемом до 120 Гб.

Модуль может поставляться в комплекте с теплораспределительной пластиной, обеспечивающей передачу выделяемого тепла на охлаждающие конструкции изделия Заказчика. Встроенное в процессор Эльбрус-2С3 графическое ядро позволяет применять модуль для вывода информации на пульт управления.



Рис. 3. Внешний вид модуля E2C3-COM

Вычислительный модуль основан на микропроцессоре «Эльбрус-2С3» — процессор общего назначения архитектуры Эльбрус версии 6 со встроенными ускорителями 2D/3D-графики и кодирования-декодирования видео. Спроектирован и изготовлен по технологическим нормам 16 нм, реализует технологии энергосбережения.

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 для решения задач РТК.** Исследования по применимости вычислительной техники на базе микропроцессоров Эльбрус для задач робототехники проводились в ряде работ [10, 11], 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 [12, 13]
- ◆ определение положения мобильного робота в заданной системе координат [14, 15];
- ◆ планирование траектории с учетом препятствий, кинематических и динамических возможностей мобильного шасси [16, 17];
- ◆ осуществления автономного движения вдоль спланированной траектории [18, 19].

Не менее важной для автономных РТК является задача диагностики. Диагностика отказов бортового вычислительного комплекса, как правило, базируется на использовании средств операционной системы (ОС) реального времени (РВ) вычислительного модуля и специальных аппаратных средств и позволяет обнаруживать отказ, определять степень его критичности для сети и запускать реконфигурацию за минимальное время после возникновения отказа.

Таким образом, в качестве основных задач РТК, требующих особого внимания, выделим:

- ◆ задача поиска пути;
- ◆ задача технического зрения;
- ◆ задача диагностики.

Как показано в работе [20] 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 [21]. 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. Одним из самых распространенных методов технического зрения на борту РТК является стереозрение. В стандартную поставку дистрибутива ОС «Эльбрус» входит библиотека OpenCV, с помощью которой реализуются два алгоритма стереорекострукции – StereoSGBM и StereoBM. С использованием рассмотренных вычислительных модулей рабочая производительность на паре изображений разрешением 640x480 px составила от 8 до 30 кадров в секунду, причем максимальная производительность достигнута на ВМ E2C3-COM. Замеры проводились с использованием средств OpenCV, C++ и Python, входящих в состав ОПО Эльбрус.

**Заключение.** В данной статье рассмотрены вычислительные модули в формате COM-Express на базе отечественных микропроцессоров Эльбрус для применения в бортовых вычислительных комплексах. Рассмотрены платы E4C/COM, МП18, E2C3-COM. Использование стандартизированного форм-фактора типа COM-Express позволяет унифицировать и удешевить производство бортовой вычислительный комплекс и упростить их модернизацию.

Показано соответствие рассмотренных вычислительных модулей требованиям по предельным массогабаритным характеристикам, требованиям к системе охлаждения СВТ, к бортовой электросети и потребляемой мощности СВТ, к производительности и к внешним интерфейсам для применения в наземных робототехнических комплексах. Полученные авторами результаты говорят о перспективах импортозамещения в области робототехники.

#### 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. Дашевский В.П., Бизин М.М. Обзор возможностей бортовых вычислителей на основе SMARC-модулей для робототехнических комплексов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2015. – № 3 (37). – С. 91-96.
6. Афонин Д. Новости с рынка встраиваемых систем: наступление COM Express продолжается // Компоненты и технологии. – 2007. – № 4 (69). – С. 138-141.
7. <http://www.mcst.ru/e4c-com>.
8. <http://www.sml820.ru/2018/09/04/mp18/>.

9. <http://www.sm1820.ru/2021/12/10/e2c3-com/>.
10. Бочаров Н.А., Зувев 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.
11. 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.
12. 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>.
13. 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>.
14. 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>.
15. 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>.
16. 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>.
17. Chaymaa Lamini, Said Benhlima, 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>.
18. 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>.
19. 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>.
20. 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 November 2017. – М., 2017. – P. 234-244.
21. 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 года. – Анапа: Федеральное государственное автономное учреждение "Военный инновационный технополис "ЭРА", 2020. – С. 71-83.

## 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 control systems for robots of various sizes and purposes. Part 3. Extreme robotics], *Rossiyskiy tekhnologicheskii 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 vklucheniyu 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), pp. 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. *Dashevskiy V.P., Bizin M.M.* Obzor vozmozhnostey bortovykh vychisliteley na osnove SMART-moduley dlya robototekhnicheskikh kompleksov [Overview of the capabilities of onboard computers based on SMART modules for robotic complexes], *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki* [Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.], 2015, No. 3 (37), pp. 91-96.
6. *Afonin D.* Novosti s rynka vstraivaemykh sistem: nastuplenie COM Express prodolzhaetsya [News from the embedded systems market: COM Express offensive continues], *Komponenty i tekhnologii* [Components and Technologies], 2007, No. 4 (69), pp. 138-141.
7. Available at: <http://www.mcst.ru/e4c-com>.
8. Available at: <http://www.sm1820.ru/2018/09/04/mp18/>.
9. Available at: <http://www.sm1820.ru/2021/12/10/e2c3-com/>.
10. *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-8C V 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.
11. *Bocharov N.A.* Modelirovanie algoritmov katastrofoustoychivosti grupp robotov na programmno-apparatnoy platforme "El'brus" [Modeling of algorithms for disaster tolerance of groups of robots on the software and hardware platform "Elbrus"], *Radiopromyshlennost'* [Radio industry], 2019, No. 3, pp. 8-14. DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-3-8-14.
12. *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>.
13. *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>.
14. *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. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.046>.
15. *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. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2020.103567>.
16. *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. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.046>.
17. *Chaymaa Lamini, Said Benhlima, Ali Elbekri.* Genetic Algorithm Based Approach for Autonomous Mobile Robot Path Planning, *Procedia Computer Science*, 2018, Vol. 127, pp. 180-189. ISSN 1877-0509. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.01.113>.
18. *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. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.02.004>.
19. *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. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2020.04.007>.

20. 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 November 2017*. Moscow, 2017, pp. 234-244.
21. 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 [Possibilities of microprocessors Elbrus-8C and Elbrus-8SV for solving robotics problems], *Robotizatsiya Vooruzhennykh Sil Rossiyskoy Federatsii: Sb. statey V voenno-nauchnoy konferentsii, Anapa, 29–30 iyulya 2020 goda* [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.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. О.А. Славин.

**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.

**Глухов Антон Викторович** – e-mail: glukhov\_a@ineum.ru; к.т.н.; начальник отделения.

**Парамонов Николай Борисович** – e-mail: paramon\_n@mcst.ru. д.т.н.; профессор; г.н.с.

**Bocharov Nikita Alexeevich** – PJSC «Brook INEUM»; e-mail: bocharov.na@phystech.edu; Moscow, Russia; phone: +79167346437; cand. of eng. sc.; chief of department.

**Glukhov Anton Viktorovich** – e-mail: glukhov\_a@mcst.ru; cand. of eng. sc.; chief of division.

**Paramonov Nikolay Borisovich** – e-mail: paramon\_n@mcst.ru; dr. of eng. sc.; professor; chief researcher.

УДК 004.932.2

DOI 10.18522/2311-3103-2022-1-247-255

**А.Ю. Гагарина, П.А. Гессен, А.И. Лизин, В.А. Павлова, М.В. Созинова,  
В.А. Тупиков**

### **КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ И СОПРОВОЖДЕНИЯ С ОБУЧЕНИЕМ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ**

*Целью данной разработки является создание устойчивого алгоритма автоматического обнаружения и сопровождения недетерминированных объектов с обучением в реальном времени, для встраиваемых вычислительных устройств оптико-электронных систем. В рамках представленной работы произведено исследование и анализ имеющегося мирового научно-технического опыта в области алгоритмов автоматического сопровождения общего назначения. В статье показано что современные алгоритмы автоматического сопровождения представляют собой систему, принимающую решение о текущем положении, размерах и других параметрах сопровождаемого объекта на основе обучаемой модели. Авторами исследования выделены наиболее эффективные из применяемых базовых алгоритмов, подходящие для применения во встраиваемых вычислительных системах робототехнических комплексов, и разработан новый алгоритм автоматического обнаружения и сопровождения недетерминированных объектов. Проведено полунатурное тестирование разработанного алгоритма и оценена его эффективность в решении задач не только автоматического сопровождения объектов, но и задач автоматического обнаружения объектов по нескольким эталонным образам. В заключении представлены предложения по дальнейшему повышению точности разработанного алгоритма и по его оптимизации и внедрению в состав специального программного обеспечения бортовых вычислительных систем летательных аппаратов.*

*Автоматическое обнаружение; автосопровождение; обучение на лету; встраиваемые системы; гистограмма направленных градиентов.*

A.Yu. Gagarina, P.A. Gessen, A.I. Lysine, V.A. Pavlova, M.V. Sozinova,  
V.A. Tupikov

## CORRELATIONAL SUPPORT ALGORITHM WITH REAL-TIME LEARNING

*In order to develop a stable algorithm for automatic detection and tracking of non-deterministic objects with real-time learning for embedded computing systems with optoelectronic devices, within the framework of this work, a study and analysis of the existing world scientific and technical experience in the field of automatic tracking algorithms for general purposes was carried out. The article shows that the most stable modern automatic tracking algorithms are a system that makes a decision about the current position, size and other parameters of the tracked image based on the model being trained. The authors of the study identified the most effective of the applied basic algorithms suitable for use in embedded computing systems of robotic complexes, and developed a new algorithm for automatic detection and maintenance of non-deterministic objects. A semi-natural testing of the developed algorithm was carried out and its effectiveness was evaluated in solving problems not only of automatic tracking of objects, but also problems of automatic detection of objects using several reference images. In conclusion, proposals are presented for further improving the accuracy of the developed algorithm and for its optimization and implementation in the special software of on-board computer systems of aircraft.*

*Automatic detection; auto tracking; on-the-fly training; embeddable histogram of directional gradients.*

**Введение.** В современных системах технического зрения всё ещё остро стоит проблема автоматического обнаружения и сопровождения недетерминированных объектов в осложнённых условиях наблюдения. Ни один из вариантов решения данной задачи, представленных в общедоступных научных трудах, не гарантирует надежного обнаружения и уверенного долговременного сопровождения, однако анализ тенденций в разработке новых алгоритмов позволяет сделать вывод, что они чаще всего представляют подходы с применением искусственных нейронных сетей, однако их применение в реальном времени затруднено, так как они, как правило, требуют априорного знания об объекте (обучающей выборки) и/или имеют высокую вычислительную сложность при использовании (например, требуют использования графического ускорителя уровня GeForce GTX Titan X для работы в реальном времени) [1–3]. Анализируя существующие работы, было принято решение ориентироваться на одни из наиболее эффективных по предъявляемым требованиям алгоритмов: TLD [4] и KCF [5]. Эти алгоритмы показывают высокую устойчивость к частичным или полным перекрытиям объекта слежения, а также к различным постепенным изменениям масштаба, разворота и ракурса наблюдения объекта.

Алгоритм TLD основан на использовании подхода Сопровождение-Обучение-Обнаружение (Tracking-Learning-Detection). Рассматриваемый алгоритм помимо краткосрочного сопровождения объекта от кадра к кадру, производит обнаружение всех локальных появлений объекта. На основе такого подхода к обнаружению, появляется возможность построить модель объекта слежения основанную на вейвлетах Хаара. Добавление модуля обучения позволяет снизить ошибки работы алгоритма, путем коррекции модели по результатам сопровождения. Однако, согласно данному алгоритму, обнаружение производится по всему кадру изображения с окнами разных масштабов, и хоть для обучения используются быстрые вейвлеты Хаара, вычислительная сложность все равно слишком велика, что не позволяет использовать данный алгоритм в системах реального времени.

Алгоритм KCF (Kernelized Correlation Filter) является представителем группы корреляционных методов. Опираясь на гистограмму направленных градиентов для обучения детектора и свойств циркулянтной матрицы (circulant matrix) [6] вместе с дискретным преобразованием Фурье для повышения скорости обработки изобра-

жения, данный метод достигает высоких скоростей обработки изображения. К минусам этого подхода можно отнести низкую вероятность обнаружения объекта после его потери.

На основе анализа данных алгоритмов, принимая во внимание их сильные и слабые стороны, авторами был разработан новый алгоритм обнаружения и сопровождения объектов, основанный на online-обучении HOG модели. Алгоритм разработан с возможностью применения во встраиваемых системах в режиме реального времени, без предварительного анализа данных, и совмещать скорость работы, присущую KCF, с точностью, свойственной TLD.

Прежде чем приступить к детальному разбору логики разработанного алгоритма, рассмотрим и обоснуем необходимость методов и подходов, используемых в предлагаемом решении.

**Гистограмма направленных градиентов (HOG).** Использование значений яркостей пикселей зачастую неэффективно, и большинство алгоритмов обработки изображений, как правило, извлекают из входных данных наиболее значимую для дальнейшего применения информацию – ключевые признаки изображения или его дескриптор, позволяющие определить объект интереса минимальным количеством данных, сокращая тем самым размерность входных данных и облегчая дальнейшую их обработку. Метод HOG позволяет выделить и получить из изображения признаки, описывающие объект.

Основной идеей алгоритма является допущение, что внешний вид и форма объекта на участке изображения могут быть описаны распределением градиентов интенсивности или направлением краев. Градиенты изображения полезны, так как их значение велико на краях и углах какой-либо фигуры (областях резкого изменения интенсивности), а именно эти области несут в себе ключевую информацию о форме объекта, в отличие от плоских (монотонных) регионов.

Алгоритм преобразования изображения в HOG-дескриптор:

1. Вычисление градиента изображения по осям  $x$  и  $y$  (рис. 1).
2. Вычисление гистограмм ячеек изображения.
3. Формирование и нормирование блоков дескрипторов.
4. Финальное вычисление вектора ключевых признаков.

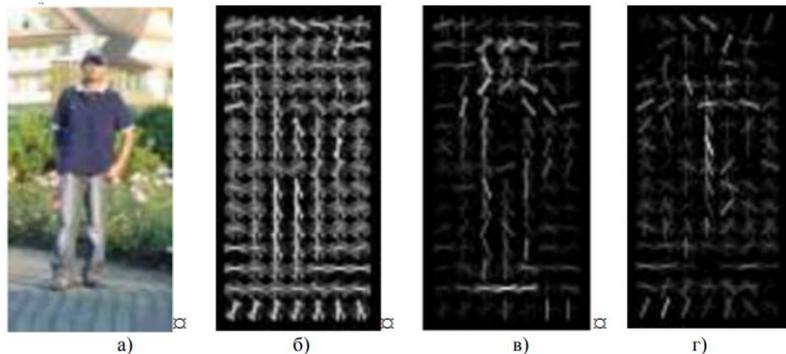


Рис. 1. Пример распознавания с использованием HOG; а – исходное изображение; б – гистограмма направленных градиентов; в – дескриптор HOG с положительными весами; г – дескриптор с отрицательными весами

Таким образом на выходе, после преобразования из исходных значений яркости получается вектор численных значений, описывающий изображение.

НОГ-дескриптор является отличным методом описания изображения ввиду своей высокой дискриминативности, скорости работы, малого количества хранимой информации, нашедшим признание среди исследователей в различных областях применения [8–10], а также имеет широкие возможности для оптимизации и ускорения своей работы за счет применения векторных команд [11] и других методов [12]. К недостаткам данного метода можно отнести отсутствие поворотной инвариантности в финальном виде (на стадии составления гистограмм возможен ограниченный поворот на фиксированный угол) и необходимость этапа предварительной обработки изображения, который оказывает сильное влияние на качество работы алгоритма, если исходные изображения имеют сильные различия в масштабе. В нашей реализации этап предварительной обработки сводится к масштабированию изображения к фиксированной величине, определяемой в зависимости от исходного размера выделенной части изображения, и происходит вычислительно быстро.

**Дискретное преобразование Фурье.** Преобразование Фурье разложит изображение на составляющие синуса и косинуса. Другими словами, он преобразует изображение из пространственной области в частотную область. Идея состоит в том, что любая функция может быть точно аппроксимирована суммой бесконечных функций синуса и косинуса. Преобразование Фурье – способ, как это сделать. Математически преобразование Фурье двумерных изображений выглядит так:

$$F(k, l) = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} f(i, j) e^{-i2\pi\left(\frac{ki}{N} + \frac{lj}{N}\right)}. \quad (1)$$

Здесь  $f$  – значение изображения в его пространственной области, а  $F$  – в его частотной области. Результатом преобразования являются комплексные числа. Отображение этого возможно либо через реальное изображение и комплексное изображение, либо через амплитудное и фазовое изображения. Однако во всех алгоритмах обработки изображений интерес представляет только изображение амплитуды, поскольку оно содержит всю необходимую нам информацию о геометрической структуре изображения.

Идея применения состоит в том, чтобы определить геометрическую ориентацию, присутствующую в изображении. Например, давайте выясним, является ли корабль развернутым (смещенным) по углу? Корабль можно представить в виде нескольких горизонтальных линий это можно увидеть и в случае преобразования Фурье.

В случае горизонтального:



Рис. 2. Горизонтальный корабль

В случае смещенного так:

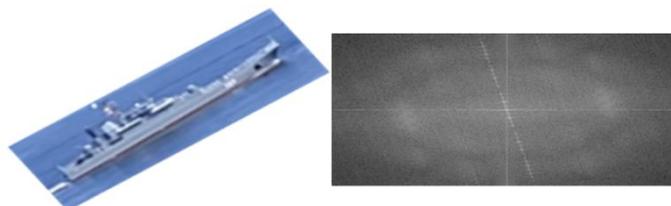


Рис. 3. Повернутый корабль

Можно заметить, что самые влиятельные компоненты частотной области (самые яркие точки на изображении магнитуды) следуют геометрическому вращению объектов на изображении. Исходя из этого, появляется возможность рассчитать смещение и выполнить поворот изображения, чтобы исправить возможное неправильное выравнивание.

**Применяемый подход.** На вход системы подается видеопоток и описывающий прямоугольник, определяющий первоначальное положение объекта слежения, или обученная модель. На стадии инициализации, основываясь на соотношении сторон исходной рамки, изображение приводится к квадратной форме, к которому будут приводиться последующие изображения объекта даже при изменении их масштаба и выбирается описывающая область вокруг объекта кратную двум, что упростит работу с гистограммами на следующих этапах.

Основная идея отслеживания корреляционного фильтра заключается в построении оптимального фильтра изображения таким образом, чтобы фильтрация входного изображения давала желаемый ответ. Желаемый ответ обычно имеет форму Гаусса с центром в целевом местоположении.

Фильтр обучается на переведенных (сдвинутых) экземплярах целевого изображения. При тестировании оценивается отклик фильтра и его максимум дает новое положение цели. Фильтр обучается в режиме онлайн и обновляется последовательно с каждым кадром, чтобы алгоритм сопровождения адаптировался к умеренным изменениям цели.

Основным преимуществом предлагаемого метода отслеживания является эффективность вычислений, так же вычисления выполняются в области Фурье. Таким образом алгоритм сопровождения работает в супер реальном времени (несколько сотен кадров в секунду). Существуют как линейные, так и нелинейные версии фильтров, основанные на объединяющем принципе наименьших квадратов Энрикеса и др.

Линейный корреляционный фильтр. Оптимальный линейный фильтр  $w$  находится путем решения регуляризованной задачи наименьших квадратов

$$\min_w (\|Xw - y\|^2 + \lambda \|w\|^2), \quad (2)$$

где  $X$  – матрица циркуляции патча целевого изображения. В строках  $X$  хранятся все возможные циклические сдвиги изображения,  $y$  – желаемый ответ,  $\lambda$  – вес регуляризатора.

Решение (2) есть

$$w = (X^T X + \lambda I)^{-1} X^T y. \quad (3)$$

Поскольку  $X$  – циркулянтная матрица,  $w$  в (3) можно быстро вычислить, используя операции с областью Фурье.

$$\hat{w} = \hat{x} \odot \frac{\hat{y}}{\hat{x}^* \odot \hat{x} + \lambda}, \quad (4)$$

где символы обозначают:  $\hat{\phantom{x}}$  образ Фурье,  $\odot$  покомпонентное умножение,  $*$  комплексно-сопряженное. Кроме того, отклик фильтра  $\hat{g}$  на тестовом изображении  $\hat{z}$  вычисляется не с помощью скользящего окна, а опять же более эффективно с помощью

$$\hat{g} = \hat{z}^* \odot \hat{w}. \quad (5)$$

Помимо высокой эффективности, предложенный алгоритм отличается простой реализацией на встраиваемых вычислительных ОЭС.

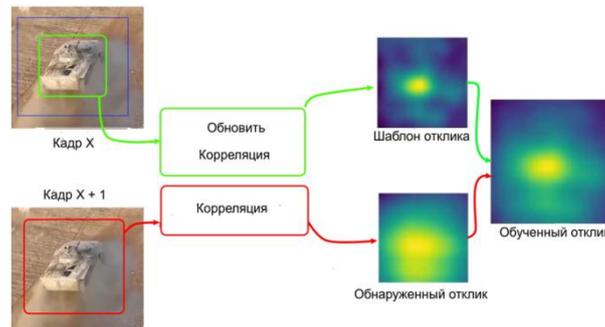


Рис. 4. Применяемый подход

**Тестирование алгоритма.** Тестирование выполнялось при помощи полуаналитического моделирования с использованием программного комплекса автоматизации тестирования алгоритмов обнаружения и сопровождения, разработанного АО «НПП «АМЭ», и реальных видеозаписей, полученных в различных условиях наблюдения. Для тестирования были размечены 15 видеопоследовательностей, содержащих объекты интереса типа «Кунг», «Здание», «Мост» и др. размером от  $\sim 64 \times 64$  до  $\sim 256 \times 256$  пикселей.

Разработанный корреляционный алгоритм сравнивался с другими разработанными подходами: классический корреляционный алгоритм сопровождения и MAPC [ ]. Используя метрику IoU (Intersection over Union) [20], подразумевающую оценку отношения площадей пересечения описывающих прямоугольников к площади их объединения.

$$IoU = \frac{S1 \cap S2}{S1 \cup S2} \in [0; 1], \quad (6)$$

$S1$  – истинное положение объекта в кадре,  $S2$  результатом работы того или иного алгоритма сопровождения.

Результат IoU нормирован от 0 до 1, что позволяет численно определить точность предсказания истинного положения объекта и его размеров.

В дополнение к IoU возможно добавить еще одну метрику. Анализируя ошибки определения центра (средняя квадратическая ошибка, root mean square error) объекта, позволяющие оценить отклонение между истинным положением отслеживаемого объекта и полученным положением в результате сопровождения объекта. В выражении (7) представлена формула расчета среднеквадратичной ошибки отклонения центра по всей видеопоследовательности, длиной  $N$  кадров.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} * \sum_1^N (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}, \quad (7)$$

где  $N$  – количество кадров в видеопоследовательности,  $x_1$  и  $y_1$  – координаты центра прямоугольника, предсказывающего положение объекта, от тестируемого алгоритма,  $x_2$  и  $y_2$  – координаты центра прямоугольника, описывающего истинное положение объекта.

Данная метрика хорошо дополняет оценку области перекрытия.

Результаты систематизации экспериментов, проведенных по данной методике, представлены на рис. 5.

Проанализировав результаты 20 экспериментов, можно сказать, что разработанный алгоритм показал отклонение IoU в 0.68 в отличие от других подходов.



Рис. 5. Графики областей пересечения

**Заключение.** Резюмируя изложенное, можно сказать, что разработанный алгоритм позволяет выполнять высокоскоростную обработку изображений в реальном масштабе времени, что дает возможность использовать данный алгоритм, например, в составе специального программного обеспечения оптико-электронных систем беспилотных и пилотируемых летательных аппаратов.

Использование предложенного обучаемого алгоритма показало высокие результаты в сравнении конкурирующими подходами и с классическими алгоритмами на основе сравнения по шаблону для средне и крупноразмерных объектов.

На следующем этапе планируется подключить обработку цветного канала, для повышения качества сопровождения и улучшить обнаружение объекта за счет увеличения размера НОГ.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Zdenek Kalal, Krystian Mikolajczyk, and Jiri Matas.* Tracking-Learning-Detection // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. – January 2010. – Vol. 6, No. 1.
2. *Georg Nebehay, Roman Pflugfelder.* Consensus-based Matching and Tracking of Keypoints for Object Tracking. Safety and Security Department, AIT Austrian Institute of Technology, Austria, 2014.
3. *Sam Hare, Amir Saffari, Philip H.S. Torr.* Struck: Structured Output Tracking with Kernels, Oxford Brookes University, Oxford, UK 2Sony Computer Entertainment Europe, London, UK, 2014.
4. *Kalal Z., Mikolajczyk K., Matas J.* Tracking-Learning-Detection // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2012. – Vol. 34, No. 7. – P. 1409-1422.
5. *Henriques J.F., et al.* High-Speed Tracking with Kernelized Correlation Filters // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2015. – Vol. 37, No. 3. – P. 583-596.
6. *Бондаренко В.А., Каплинский Г.Э., Павлова В.А., Тутиков В.А.* Метод поиска и сопоставления ключевых особенностей изображений для распознавания образов и сопровождения объектов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 1 (213). – С. 281-293.
7. *Rodehorst V., Koschan A.* Comparison and evaluation of feature point detectors // Proceedings of 5th International Symposium Turkish-German Joint Geodetic Days, 2006.
8. *Tuytelaars T., Mikolajczyk K.* Local Invariant Feature Detectors – Survey // Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision. – 2008. – No. 3 (3). – P. 177-280.
9. *Ethan Rublee, Vincent Rabaud, Kurt Konolige, Gary Bradski.* ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF. Willow Garage, Menlo Park, California, 2011.
10. *Erich Schubert, Jörg Sander, Martin Ester, Hans Peter Kriegel, Xiaowei Xu.* DBSCAN Revisited, Revisited: Why and How You Should (Still) Use DBSCAN // ACM Trans. Database Syst. – 2017.
11. *Amila Jakubovic, Jasmin Velagic.* Image Feature Matching and Object Detection using Brute-Force Matchers. Faculty of Electrical Engineering University of Sarajevo Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2018.
12. *Lucas B.D. and Kanade T.* An iterative image registration technique with an application to stereo vision // International Joint Conference on Artificial Intelligence. – 1981. – P. 674-679.
13. *Eibe Frank, Remco R. Bouckaert.* Naive Bayes for Text Classification with Unbalanced Classes. Computer Science Department, University of Waikato, New Zealand, Xtal Mountain Information Technology, Auckland, New Zealand, 2006.
14. *Lowe D.G.* Object recognition from local scale-invariant features // Proceedings of the International Conference on Computer Vision. – 1999. – No. 2. – P. 1150-1157.

15. Sung-Joo Y., Kim T. Development of Stereo Visual Odometry Based on Photogrammetric Feature Optimization // *Remote Sensing*. – 2019. – No. 11.
16. Horn B.K.P. and Schunck B.G. Determining optical flow // *Artificial intelligence*. – 1981. – Vol. 17, No. 1-3. – P. 185-203.
17. Shi J. and Tomasi C. Good features to track // *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. – 1994.
18. Leutenegger S., Chli M., and Siegwart R.Y. BRISK: Binary robust invariant scalable keypoints. In *ICCV*, 2011.
19. Shahed Nejhum S.M., Ho J., and Yang M.-H. Visual tracking with histograms and articulating blocks. In *CVPR*, 2008.
20. Zhang L. and van der Maaten L. Structure preserving object tracking. In *CVPR*, 2013.
21. Martin Ester, Hans-Peter Kriegel, Jiirg Sander, Xiaowei Xu. A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise. Institute for Computer Science, University of Munich Oettingenstr. 67, D-80538 Miiinchen, Germany, 1996.
22. Taheri S., Mammadov M. Learning the naive Bayes classifier with optimization models. Centre for Informatics and Applied Optimization School of Science, Information Technology and Engineering, University of Ballarat, Victoria 3353, Australia. 2.
23. Andrew Moores. Efficient memory-based learning for robot control. 15 JJ Thomson Avenue Cambridge CB3 0FD United Kingdom. 1990.
24. Молчанов А.С. Иконические системы воздушной разведки: основы построения, оценка качества и их применение в комплексах с беспилотными летательными аппаратами. – Волгоград: Панорама, 2017. – 216 с.

## REFERENCES

1. Zdenek Kalal, Krystian Mikolajczyk, and Jiri Matas. Tracking-Learning-Detection, *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, January 2010, Vol. 6, No. 1.
2. Georg Nebel, Roman Pflugfelder. Consensus-based Matching and Tracking of Keypoints for Object Tracking. Safety and Security Department, AIT Austrian Institute of Technology, Austria, 2014.
3. Sam Hare, Amir Saffari, Philip H.S. Torr. Struck: Structured Output Tracking with Kernels, Oxford Brookes University, Oxford, UK 2Sony Computer Entertainment Europe, London, UK, 2014.
4. Kalal Z., Mikolajczyk K., Matas J. Tracking-Learning-Detection, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, Vol. 34, No. 7, pp. 1409-1422.
5. Henriques J.F., et al. High-Speed Tracking with Kernelized Correlation Filters, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2015, Vol. 37, No. 3, pp. 583-596.
6. Bondarenko V.A., Kaplinskiy G.E., Pavlova V.A., Tupikov V.A. Metod poiska i sopostavleniya klyuchevykh osobennostey izobrazheniy dlya raspoznavaniya obrazov i soprovozhdeniya ob"ektov [Method of search and comparison of key features of images for pattern recognition and object tracking], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskije nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 1 (213), pp. 281-293.
7. Rodehorst V., Koschan A. Comparison and evaluation of feature point detectors, *Proceedings of 5th International Symposium Turkish-German Joint Geodetic Days, 2006*.
8. Tuytelaars T., Mikolajczyk K. Local Invariant Feature Detectors – Survey, *Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision*, 2008, No. 3 (3), pp. 177-280.
9. Ethan Rublee, Vincent Rabaud, Kurt Konolige, Gary Bradski. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF. Willow Garage, Menlo Park, California, 2011.
10. Erich Schubert, Jörg Sander, Martin Ester, Hans Peter Kriegel, Xiaowei Xu. DBSCAN Revisited, Revisited: Why and How You Should (Still) Use DBSCAN, *ACM Trans. Database Syst.*, 2017.
11. Amila Jakubovic, Jasmin Velagic. Image Feature Matching and Object Detection using Brute-Force Matchers. Faculty of Electrical Engineering University of Sarajevo Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2018.
12. Lucas B.D. and Kanade T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision, *International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 1981, pp. 674-679.
13. Eibe Frank, Remco R. Bouckaert. Naive Bayes for Text Classification with Unbalanced Classes. Computer Science Department, University of Waikato, New Zealand, Xtal Mountain Information Technology, Auckland, New Zealand, 2006.
14. Lowe D.G. Object recognition from local scale-invariant features, *Proceedings of the International Conference on Computer Vision*, 1999, No. 2, pp. 1150-1157.

15. *Sung-Joo Y., Kim T.* Development of Stereo Visual Odometry Based on Photogrammetric Feature Optimization, *Remote Sensing*, 2019, No. 11.
16. *Horn B.K.P. and Schunck B.G.* Determining optical flow, *Artificial intelligence*, 1981, Vol. 17, No. 1-3, pp. 185-203.
17. *Shi J. and Tomasi C.* Good features to track, *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1994.
18. *Leutenegger S., Chli M., and Siegwart R.Y.* BRISK: Binary robust invariant scalable keypoints. In *ICCV*, 2011.
19. *Shahed Nejhum S.M., Ho J., and Yang M.-H.* Visual tracking with histograms and articulating blocks. In *CVPR*, 2008.
20. *Zhang L. and van der Maaten L.* Structure preserving object tracking. In *CVPR*, 2013.
21. *Martin Ester, Hans-Peter Kriegel, Jiirg Sander, Xiaowei Xu.* A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise. Institute for Computer Science, University of Munich Oettingenstr. 67, D-80538 Miiinchen, Germany, 1996.
22. *Taheri S., Mammadov M.* Learning the naive Bayes classifier with optimization models. Centre for Informatics and Applied Optimization School of Science, Information Technology and Engineering, University of Ballarat, Victoria 3353, Australia. 2.
23. *Andrew Moores.* Efficient memory-based learning for robot control. 15 JJ Thomson Avenue Cambridge CB3 0FD United Kingdom. 1990.
24. *Molchanov A.S.* Ikonicheskie sistemy vozduшной razvedki: osnovy postroeniya, otsenka kachestva i ikh primeneniye v kompleksakh s bespilotnymi letatel'nymi apparatami [Iconic aerial reconnaissance systems: fundamentals of construction, quality assessment and their application in complexes with unmanned aerial vehicles]. Volgograd: Panorama, 2017, 216 p.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. П.К. Шульженко.

**Тупиков Владимир Алексеевич** – АО «Научно-производственное предприятие «Авиационная и морская электроника». e-mail: tupikov@nppame.ru, г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 88123274667; д.т.н.; профессор.; зам. ген. Директора; директор научно-производственного комплекса робототехнических систем специального назначения (НПК РТС СН).

**Павлова Валерия Анатольевна** – e-mail: pavlova@nppame.ru; к.т.н.; зам. директора НПК РТС СН по НИОКР.

**Гагарина Алена Юрьевна** – e-mail: gagarina\_ay@nppame.ru; зам. начальника средств интеллектуальной обработки изображений (ЦСИОИ) НПК РТС СН.

**Гессен Павел Алексеевич** – e-mail: gessen\_pa@nppame.ru; старший научный сотрудник отдела прикладного программирования (ЦСИОИ) НПК РТС СН.

**Лизин Алексей Игоревич** – e-mail: lizin\_a@nppame.ru; начальник центра средств интеллектуальной обработки изображений (ЦСИОИ) НПК РТС СН.

**Созинова Мария Владимировна** – e-mail: sozinova@nppame.ru.; тел.: 88123274667.

**Tupikov Vladimir Alekseevich** – SPE "Research and Production Enterprise "Air and Marine Electronics"; e-mail: tupikov@nppame.ru; Saint Petersburg, Russia; phone: +78123274667; dr. of eng. sc.; professor; Deputy Director General, Director of Research and production complex of special purpose robotic systems.

**Pavlova Valeria Anatolyevna** – e-mail: pavlova@nppame.ru; cand. of eng. sc.; Deputy Director of research at Research and production complex of special purpose robotic systems.

**Gagarina Alena Yurevna** – e-mail: gagarina\_ay@nppame.ru; Deputy chief of intellectual image processing center (IIPC) RPCSPRS.

**Gessen Pavel Alekseevich** – e-mail: gessen\_pa@nppame.ru; researcher department of Applied Programming IIPC RPCSPRS.

**Lizin Aleksey Igorevich** – e-mail: lizin\_a@nppame.ru; chief of intellectual image processing center (IIPC) RPCSPRS.

**Sozinova Maria Vladimirovna** – e-mail: sozinova@nppame.ru; phone: +78123274667.

**Р.А. Горбачев, М.Н. Зарипов, Д.Л. Шишков**

### **ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ПРЕПЯТСТВИЙ И ПРЕДСКАЗАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПУТЯХ**

*В настоящее время повышение качества предоставляемых транспортных и логистических услуг напрямую связано с внедрением новых и модернизацией существующих технологий информатизации и цифровизации. Одной из наиболее актуальных задач, решаемых с помощью внедрения цифровых технологий в существующие технологические процессы, является повышение безопасности движения поездов. Анализ отечественных и зарубежных работ, посвящённых разработке систем повышения безопасности движения поездов показал, что одним из методов решения поставленной задачи является разработка и внедрение систем технического зрения для обнаружения объектов инфраструктуры и препятствий по ходу движения поезда. Это особенно актуально при увеличении скоростей движения поездов, когда машинисту бывает сложно правильно оценить сложившуюся ситуацию и принять оперативное решение. В данной работе описана реализация системы технического зрения для беспилотных поездов. В её рамках был реализован новый подход к обучению узкоспециализированной масочной нейронной сети. Основной задачей этой системы является распознавание препятствий и фигур человека на фоне железнодорожной инфраструктуры, определения их местоположения относительно рельсовых путей и оценки этой ситуации с точки зрения безопасности движения. Для получения более качественной маски был использован подход одновременного использования изображений стандартных камер CVS и камер с более высоким разрешением. Данный метод способен повысить качество распознавания, особенно на больших расстояниях, когда интересующий объект не заметен в сложной среде окружающей его обстановки. Выполненная работа показала хорошие результаты по идентификации объектов на железнодорожных путях. Создание прототипа такой системы и оснащение ей тягового подвижного состава позволит реализовать своевременное обнаружение препятствий и людей на пути поезда, что способствует повышению уровня безопасности движения поездов.*

*Система компьютерного зрения; нейронные сети; метод Лукаса–Канаде; карта глубины; фотограмметрия.*

**R.A. Gorbachev, M.N. Zaripov, D.L. Shishkov**

### **AN INTELLIGENT SYSTEM OF TECHNICAL VISION FOR DETECTING OBSTACLES AND PREDICTING THE BEHAVIOR OF MOVING OBJECTS ON RAILWAY TRACKS**

*Currently, the improvement of the quality of transport and logistics services provided is directly related to the introduction of new and modernization of existing technologies of informatization and digitalization. One of the most urgent tasks solved by the introduction of digital technologies into existing technological processes is to improve the safety of train traffic. The analysis of domestic and foreign works devoted to the development of train safety improvement systems has shown that one of the methods of solving the task is the development and implementation of vision systems for detecting infrastructure objects and obstacles in the course of train movement. This is especially true when train speeds increase when it is difficult for the driver to correctly assess the current situation and make an operational decision. This paper describes the implementation of a vision system for unmanned trains. Within its framework, a new approach to the training of a highly specialized mask neural network was implemented. The main task of this system is to recognize obstacles and human figures against the background of the railway infrastructure determine their location relative to the tracks and assess this situation from the point of view of traffic safety. To obtain a higher-quality mask, the approach of simultaneous use of images of standard CVS cameras and cameras with the higher resolution was used. This method is able to*

*improve the quality of recognition, especially at large distances, when the object of interest is not noticeable in the complex environment surrounding it. The work performed has shown good results in identifying objects on railway tracks. The creation of a prototype of such a system and equipping it with traction rolling stock will allow for the timely detection of obstacles and people on the train path, which contributes to improving the level of train safety.*

*Computer vision system; neural networks; Lucas–Canada method; depth map; photogrammetry.*

**1. Введение.** В настоящее время из-за увеличения плотности железнодорожных перевозок любые отклонения от установленного графика приводят к значительным потерям качества движения, например, к увеличению задержек поездов или их отмене. Одной из наиболее распространенных предпосылок такого рода является появление препятствия или присутствие человека на железнодорожных путях, которые мешают движению поезда и способны привести не только к задержкам в движении, но и к авариям.

Повышение качества предоставляемых транспортных и логистических услуг напрямую зависит от внедрения новых и улучшения существующих технологий информатизации и цифровизации, особенно на железнодорожном транспорте ввиду постоянно растущего трафика и задачи наиболее эффективного использования уже существующих ресурсов для его обеспечения. Однако разработка и внедрение технологий в данной области подчинено требованиям безопасности движения. Одним из методов повышения безопасности на железной дороге является разработка систем обнаружения посторонних объектов на путях, а также их анализ [1]. Поэтому разработка систем идентификации и классификации объектов на путях является одной из важнейших задач в системах управления железнодорожным движением. В данной области особенно хорошо себя показали технологии компьютерного зрения и искусственного интеллекта. Такие системы не только обнаруживают препятствия, но и классифицируют их для определения последующих действий, например, возможности дальнейшего движения или аварийной остановки поезда.

Развитие представленной в данной работе технологии способствует цифровизации железнодорожного транспорта [2] и особенно востребовано для использования в движении беспилотных поездов, так как система технического зрения выполняет ключевую роль в оценке текущей дорожной ситуации.

**2. Обзор.** Задачам распознавания для железных дорог посвящен ряд работ [3–5]. Рассмотрим основные идеи, представленные в них.

В работе [4] предложен метод обнаружения препятствий путем сравнения входного и эталонного изображений с камеры лобового обзора поезда. Одним из новшеств данной работы является обнаружение неизвестных классов объектов, т.е. которых не было в обучающей выборке с помощью предложенного метода вычитания фона, который можно применять и к нестационарным камерам.

В работе [5] представлен прототип устройства TRINETRA, который обещает легкое движение поездов в неизвестных условиях, таких как условия нулевой видимости, туман, смог и сильный дождь. Прототип основан на интеграции камеры, системы радиобнаружения и определения дальности (RADAR) и усиления инфракрасного (ИК) света за счет стимулированного излучения (LASER). Комбинированный короткий, средний, и система радарных датчиков дальнего действия используется для непрерывного обнаружения препятствий в слепых зонах локомотивов на трассе, особенно для помощи в предотвращении столкновений на высокой скорости. Экспериментальные результаты испытания прототипа для расстояний от 2 м до 2 км на движущемся поезде показывают, что разработанный прототип эффективно отслеживает препятствия в условиях тумана и смога.

В работе [5] приведена реализация системы обнаружения препятствий, основанной на глубоком обучении нейронной сети MaskR-CNN, как описано в этой статье. Система обнаружения использует модель Mask-RCNN с ResNet101 в качестве своей базовой сети извлечения признаков. Результаты испытаний показали, что точность модели Mask-RCNN с ResNet101 в качестве ее базовой сети извлечения признаков достигла 95,7% и что для этого потребовалось среднее время 0,18 с.

Однако подходы, приведенные в работах [3–5] предназначены только для обнаружения препятствий. Подход, предложенный в данной работе, позволяет не только выделять объекты, но и рассчитывать расстояние до них, а также оценить поведение этих объектов.

**3. Постановка задачи.** Одной из важнейших проблем, требующих решения на железной дороге является возникновение аварий, вызванных препятствиями. Для этого разрабатываются системы обнаружения препятствий на железнодорожных перегонах [6]. Задачами разработки и развития систем технического зрения для поездов и локомотивов является разработка алгоритмов по анализу цветового пространства, определению местоположения мешающих движению объектов и их идентификации на цифровом изображении. Для решения поставленных задач была реализована система анализа исправности рельсового пути и наличия препятствий на основе анализа плоского (нестереоскопического) изображения. Ключевым компонентом данного подхода является интеллектуальная система технического зрения (Далее - СТЗ). Главной задачей, решаемой с помощью данной СТЗ для беспилотных поездов, является обнаружение и классификация препятствий, возникающих в процессе железнодорожного движения. Распознавание препятствий (люди, повреждения конструкций и т.п.) осуществляется на расстоянии 200–500+ м. Данные объекты в дальнейшем будем называть объектами интереса.

**4. Оптимизация входных изображений.** Однако при решении задач обнаружения и распознавания объектов, в которых используется автоматическая подстройка параметров видеокамер, очень часто возникают такие проблемы как засветка изображений, затененность и размытость изображений и т.п. (рис. 1).



Рис. 1. Пример неудачных снимков фронтальных камер (засветка)

В связи с этим были проведены дополнительные исследования оптимизации изображений в случаях возникновения таких дефектов и способов их устранения, например, увеличение контрастности и т.п. Для этого для тестового участка железнодорожной трассы на основе видеоданных фронтальных камер была построена 3d-карта объектов в ближней зоне железнодорожных путей, в которую входят такие объекты как столбики, стрелки и другие элементы железнодорожной инфраструктуры, которые визуально могут быть похожи на большом расстоянии на фигуру человека. При необходимости, такая съемка с помощью камер СТЗ дополняется или даже заменяется съемкой с помощью специализированных камер высоко-

го разрешения. Привязка к месту, т.е. точное позиционирование, может осуществляться с помощью высокоточных приемников GPS/ГЛОНАСС в режиме кинематики реального времени и/или с помощью другой системы позиционирования.

Для нейронной сети была реализована система автоматизированного построения дата-сетов обучающих и контрольных выборок объектов интереса из видеофайлов. Для этого осуществляется генерация изображений с объектами интереса, получаемых из реальных видеопотоков, поступающих от видеокамер.

Для проверки системы были проведены исследовательские испытания стенда СТЗ на неиспользуемых участках железнодорожных путей. В процессе этих испытаний были проверены технологии калибровки камер, распознавания объектов интереса на различных расстояниях, в разных условиях освещенности и различных погодных условиях. Создание цифровой модели тестового участка было реализовано с помощью лазерного сканера и серий фотографий с последующей их обработкой посредством алгоритмов фотограмметрии.

СТЗ в данной системе основано на комплексном применении оптических камер и искусственного интеллекта для сопоставления данных съемки с накопленной базой снимков и трехмерных моделей. При этом для корректной и более точной работы совершенно необходима гибкая настройка параметров работы камер СТЗ в зависимости от места, времени, условий освещения и т.п. Фактически настройки камер привязаны к маршруту и времени перемещения подвижного железнодорожного состава.

На подобного рода снимках прежде всего можно обнаруживается наличие резких перепадов освещения в подлежащей контролю окрестности пути следования поезда. В дополнение к этому существует и необходимость одновременного контроля в реальном времени как засвеченных, так и затемненных участков вблизи пути движения поезда. То есть при движении, например, в туннеле нужно одновременно различать хорошо освещенные объекты на выходе из туннеля и затемненные участки вблизи стен туннеля. Другим примером такой ситуации служит движение по мосту, где также необходимо одновременно различать освещенные объекты между сооружениями моста и объекты в затемненных участках сооружения моста.

Все это приводит к тому, что необходимо использовать несколько стереокамер, каждая из которых имеет свои настройки освещенности, то есть контролирует свой диапазон яркости объектов в поле зрения). Получаемые от камер данные будут интегрироваться в единое 3d-облако точек с указанием для каждой точки стереокамеры-источника для предотвращения потерь видеоданных и правильного программного совмещения освещенности и цвета точек облака, полученных от разных видеокамер.

Полученное облако точек далее будет использоваться в 2-х модификациях для 2-х видов обработки.

Плотное точное облако точек будет использоваться для «медленной» фоновой обработки с целью регулярного профилактического визуального контроля оборудования и сооружений станций и путевых сооружений, обнаружения на путях посторонних предметов посредством системы технического зрения поезда. «Медленная» обработка может выполняться на стационарных компьютерах. При этом данные должны передаваться в фоновом режиме с поезда на стационарный компьютер вне зависимости, находится ли поезд на станции или следует по маршруту. Это необходимо для определения необходимости направления ремонтных бригад, а также срочности направления ремонтных бригад (в течение суток, в течение недели и т.д.).

Для «быстрой» обработки данных в реальном времени и для рационального использования вычислительных ресурсов в данной системе применена кусочно-разреженная версия облака точек. Задача быстрой обработки – определение наруше-

ний, требующих немедленной реакции и остановки поезда. Поэтому в ближней окрестности рельсовых путей плотность облака точек должна быть достаточной для выявления явных нарушений в структуре, в составе которой входят рельсы, шпалы, насыпь, а также в рельсовой части стрелочных сооружений. Вне окрестности рельсовых путей плотность облака точек должна быть достаточной для обнаружения сравнимых размером с человеком посторонних объектов, которые отсутствуют в исходном априорном описании путевых и станционных сооружений.

Технологически «быстрая» обработка видеоинформации будет выполняться следующим образом.

Статические кадры ближней окрестности рельсового пути в надлежащем ракурсе будут подаваться на вход искусственно минимизированной нейронной сети *ssdmobilenet*, обученной на распознавание минимальных регулярных участков рельсовых путей и рельсового механизма вблизи стрелок с целью анализа их целостности и соответствия «правильному» образцу. Нейронная сеть реализована и обучена для выявления и локализации таких участков, а также определения их целостности как соответствия критериям, заложенным при обучении.

Кадры дальней окрестности пути анализируются помощью метода Лукаса-Канаде [7], после чего полученное поле скоростей фильтруется для очистки от:

- ◆ движений, обусловленных движением поезда вдоль путей;
- ◆ случайных движений, обусловленных неидеальностью пути и ходовой части;
- ◆ помех посредством ценза по скорости.

Далее эти кадры сравниваются со сделанной ранее точечной картой сооружений, динамически медленно изменяемой согласно видеоданным поездов. Данное сравнение обеспечивает выявление некартированных объектов, линейные размеры которых по вертикали и горизонтали близки к размерам человека. Такие объекты с высокой вероятностью могут оказаться людьми, находящимися в окрестности пути, что в свою очередь потребует остановки поезда для предотвращения столкновения с ними.

«Медленная» фоновая обработка выполняется путем сравнения изображения с «предыдущими» и с «правильными» (то есть сделанными немедленно после выполненного монтажа и верифицированными специалистом-экспертом либо исполнителем ремонта на исправность изображенного оборудования) изображениями посредством специально обученных для этой цели нейронных сетей с целью определения факта наличия и вида неисправности, диагностируемой по отличию фактического изображения от «правильного».

Также при «медленной» обработке определяются объекты, не предусмотренные конструктивно (упавшее дерево, стихийная свалка мусора, и т.д.). Сведения о них будут передаваться эксперту, выносящему решение либо о ликвидации объекта и о ее сроках и приоритетности, либо об игнорировании объекта с занесением его на 3d-карту априорных объектов «быстрой» обработки как безвредного объекта.

В условиях более сложной фоно-целевой обстановки для распознавания препятствий, необходима информация о маршруте поезда. Это позволяет уменьшить рабочую область распознавания и увеличить скорость обработки визуальной информации.

В результате тестирования системы на объектах в железнодорожной инфраструктуре были дополнительно реализованы следующие функции:

- ◆ устранение ложных срабатываний от таких объектов, как, например, различный бытовой мусор;
- ◆ работа на расстояниях от 200м;
- ◆ специализация настроек камер;
- ◆ использование стереопар с большим плечом
- ◆ и другие доработки.

В условиях быстро меняющегося освещения (например, облачная погода с непостоянным присутствием солнца) неотъемлемой частью системы является использование двух-трех комплектов камер с разными настройками или гибкая настройка параметров объективов. Это позволяет повысить эффективность и качество работы системы в переменных погодных условиях.

Совместная работа СТЗ и стационарных камер, передающих информацию о состоянии пути по радиоканалу на приближающийся поезд.

**5. Описание реализованной технологии.** Система распознавания состоит из следующих аппаратных компонентов:

- ◆ Стереопары с разными объективами, а также стереопара в тепловом диапазоне.

- ◆ Сборка СТЗ с бортовым вычислителем (компьютер, возможно специализированный, с соответствующим ПО).

Для решения поставленной задачи были реализованы следующие программные компоненты системы:

- ◆ Сегментация изображений, полученных с помощью камер. Суть этого подхода заключается в сужении области применения алгоритмов распознавания на область интереса. Данный компонент реализован посредством нейронной сети, выполняющей задачу «Semantic segmentation» для рельсового пути и возможных препятствий с целью выделения их маской. Подробно технология семантической сегментации описана в работах [8, 9]. В данном случае областями интереса являются:

- Непосредственно пути;
- Прилегающие к путям участки и сооружения;
- Области, появление в которых объектов интереса может представлять потенциальную опасность для железнодорожного движения или жизни людей.

- ◆ Стереорекострукция, соединенная с получением данных от нейронной сети об обнаруженных объектах интереса. Данная технология работает с видеоданными и картами глубины и определяет 3d-координаты объектов, а также расстояния до них. В дополнение к этому строится прогноз траектории движения объектов, например, людей. Данный компонент на основе изображения от видеокамеры и полученных от нейронной сети в виде бинарных изображений масок объектов реализует выполнение следующих функций:

а) Проверяет наличие и топологическую целостность видимого рельсового пути. Если рельсовых путей несколько – проверяется тот, который идет от середины нижнего края изображения (то есть тот путь, на котором находится данный поезд). Рельсы должны быть топологически непрерывны, не иметь видимых дефектов и участков с резкими границами, сами рельсы и их ближайшая окрестность не должны быть сверху ничем закрыты.

б) В случае обнаружения людей проверяется, насколько они удалены от железнодорожных путей, является ли расстояние безопасным. Предполагается расстояние обнаружение людей 200 - 500+ метров, что вследствие удаленности сильно снижает точность стереорекострукции, поэтому используется разработанная авторами технология оценки расстояния, не использующая стереозрение.

в) Для каждого человека, находящегося вблизи рельсового пути, делается оценка расстояния от него до поезда.

г) Используя метод Лукаса-Канаде [10], анализируется движение каждого детектированного человека, чтобы определить, движется ли он в опасную зону, либо успеет выйти из опасной зоны.

В качестве нейронной сети использовалась сеть «mask\_rcnn\_inception\_resnet\_v2\_1024x1024\_coco17» [11, 12], переученная для распознавания рельсового пути и для распознавания людей на фоне железнодорожной инфраструктуры. Сеть функционировала в среде Tensorflow 2 [13].

Программный модуль, анализирующий расстояния и скорости людей вблизи рельсового пути, был написан на C++ с использованием библиотек OpenCV [14].

Для интеграции модуля нейронной сети и программного модуля анализа расстояний и скоростей, в том числе параллельной трансляции видеоряда на оба модуля и организации обмена данными между ними использовалась Robot Operating System версии "Kinetic Kame" [15] под Linux Ubuntu 16.04.

В данной работе реализован новый подход к обучению узкоспециализированной масочной нейронной сети, которая распознает фигуру человека на фоне железнодорожной инфраструктуры и определяет его местоположение относительно рельсовых путей с точки зрения его безопасности. Для создания более качественной маски используются снимки более высокого разрешения, созданные одновременно со снимками штатных камер СТЗ, благодаря чему увеличивается качество распознавания, особенно для больших дистанций, когда объект интереса в сложной фоно-целевой обстановке малозаметен.

Помимо детектирования фигуры человека в окрестности железнодорожных путей нейронная сеть производит быструю оценку расстояния до нее за счет сравнения с близкими предметами, типичные линейные размеры которых заносились в сеть в процессе обучения. Здесь «быстрая оценка» означает, что скорость оценки не менее чем в 3 раза превосходит скорость, обеспечиваемую алгоритмами Block Matching [16] или Semi-Global Block Matching [17]. Соответственно, в отличие от данных алгоритмов, предложенная в данной работе технология не обеспечивает субдециметровую точность, но для решения данной задачи ее точность достаточна.

Для обучения нейронной сети был использован размеченный датасет, состоящий из большого набора (порядка 120 000) фотографий исправных путей без людей-нарушителей, значительно меньшим набором фотографий людей вблизи путей и малого сета фотографий заброшенных путей, находящихся не в лучшем состоянии.

С целью балансировки датасета было сделано следующее: датасет был случайным образом разбит на 6000 примерно равных фрагментов, в каждом фрагменте количество элементов каждого класса было примерно одинаково. Затем с помощью скрипта было инициализировано обучение нейронной сети. Однако для устранения проблемы переобучения обучение выполняется на каждом случайно выбранном фрагменте ровно 10 эпох, после чего завершается и случайным образом выбирается новый фрагмент. На нём также обучается 10 эпох и так далее, пока качество распознавания не будем приемлемым.

Обученная нейронная сеть использована как узел (node) под управлением ROS, то есть она подписана на видеотему от видеокамеры и в ответ на каждое полученное сообщение публикует результаты распознавания как набор битовых масок.

Программный модуль, анализирующий расстояния и скорости людей, написан как узел ROS, подписанный на видеотему от видеокамеры и на результаты распознавания от нейронной сети и публикующий результаты в виде перечисления обнаруженных людей с указанием дистанции и скорости, а также, с целью контроля, в виде изображений.

Программный модуль для анализа расстояний и скорости написан на C++ с использованием библиотек OpenCV, являющихся компонентой ROS «Kinetic Kame» [18].

Оценка исправности рельсового пути делается проверкой, что каждый рельс распознается как связанная область без резких колебаний толщины, а также не имеет резких колебания яркости в продольном направлении.

Рассмотрим подробнее решение задачи оценки расстояния до человека в разработанном алгоритме. На плоском изображении от нижнего края изображения человека (т.е. от его ступней) проводится горизонтальная линия до пересечения с

рельсами включительно и определяется длина в пикселах участка этой линии, оканчивающегося между рельсами (обозначим это число  $n_1$ ). Затем определим в пикселах длину участка линии от человека до рельса (обозначим это число  $n_2$ ). Оценкой расстояния в метрах от человека до рельсов будет

$$d_2 = \frac{n_2}{n_1} \cdot d_1, \quad (1)$$

где  $d_1 = 1.520$  м, стандарт расстояния между рельсами, принятый в Российских железных дорогах, называемый "ширина колеи" и определяемый как "расстояние между внутренними гранями головок рельсов" [19]. Данное значение сравнивается с результатом «быстрой оценки» расстояния нейронной сетью и корректируется в сторону «быстрой оценки», причем вес коррекции логистически убывает при увеличении разности «быстрой оценки» и  $d_2$  [19].

Кроме этого, мы получим значение

$$L_{pix} = \frac{d_1}{n_1}, \quad (2)$$

указывающее, какое поперечное расстояние в метрах при данном удалении от поезда соответствует одному пикселу.

Оценка расстояния от человека до видеокамеры (то есть, по факту, до поезда), делается 2-мя способами:

а) В ближайшем к человеку участке рельсового пути измеряется видимое горизонтальное расстояние между рельсами в пикселах  $n_1$ , после чего вычисляется приблизительное расстояние от видеокамеры до человека по формуле:

$$d = \frac{A_1}{n_1}, \quad (3)$$

где  $A_1$  полностью определяется оптическими свойствами камеры и шириной колеи и может быть либо вычислена, либо найдена посредством калибровки.

б) Измеряется высота человека в пикселах  $n_2$  и, используя среднюю оценку роста 170 см, приблизительно оценивается расстояние до человека по формуле:

$$d = \frac{A_2}{n_2}, \quad (4)$$

где  $A_2$  полностью определяется оптическими свойствами камеры и может быть либо вычислена, либо найдена посредством калибровки. Берется наименьшее из этих значений.

На рис. 2 на красном фоне оценка расстояния до человека. Оценка не является прецизионной, но точность достаточна для оценки безопасности либо опасности нахождения вблизи путей.

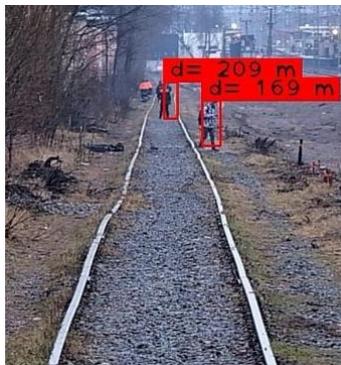


Рис. 2. Примеры определения расстояния до человека возле путей

Оценка скорости человека делается следующим способом. Вначале решим, что "продольная составляющая" скорости, то есть вдоль путей, нам неинтересна, так как она ничего не меняет. Нам интересна именно поперечная составляющая скорости, то есть приближение человека к путям либо его удаление от путей. Поперечную составляющую найдем следующим образом: найдем на изображении видимую поперечную скорость пиксел/сек., после чего, из оценки расстояния до человека, зная соотношение пикселов к метрам на данной дистанции, получим поперечную скорость в метрах в секунду.

Для определения видимой поперечной скорости на изображении применим метод Лукаса-Канаде. А именно, воспользуемся тем, что у нас независимо в разных потоках работают "медленная" нейронная сеть и "быстрая" программа-анализатор расстояния и скорости и к

каждой связной области, выделенной битовой маской как "человек", применим технологию Лукаса-Канаде.

Метод Лукаса-Канаде основан на следующем: пусть у нас есть изображение  $I(x, y, t)$ , где  $I(x, y, t)$  – это яркость как функция пиксельных координат  $x$  и  $y$  и времени  $t$ . Предполагая, что изменение изображения обусловлено его перемещением на малые расстояния  $\delta x$  и  $\delta y$ , происходящим за промежуток времени  $\delta t$ , получим

$$I(x, y, t) = I(x + \delta x, y + \delta y, t + \delta t), \quad (5)$$

где  $\frac{\partial I}{\partial x}, \frac{\partial I}{\partial y}, \frac{\partial I}{\partial t}$  – частные производные по координатам  $x, y$  и  $t$  соответственно;  $v_x = \frac{\delta x}{\delta t}, v_y = \frac{\delta y}{\delta t}$  – компоненты скорости оптического потока.

Малые значения величин  $\delta x, \delta y$  и  $\delta t$  позволяет нам при разложении функции в ряд Тейлора ограничиться только первыми частными производными по пространственным координатам ( $x$  и  $y$ ) и временной координате  $t$ . Это дает возможность свести задачу нахождения оптического потока к решению линейного уравнения относительно двух неизвестных компонент его скорости  $\mathbf{v}(v_x, v_y)$ :

$$\frac{\partial I}{\partial x} v_x + \frac{\partial I}{\partial y} v_y + \frac{\partial I}{\partial t} = 0, \quad (6)$$

называемого основным уравнением оптического потока.

Очевидно, что уравнение (6) неразрешимо однозначно – возникает так называемая проблема регуляризации, требующая добавления к модели задачи дополнительной информации. Поэтому добавляется требование, чтобы в окрестности "рассматриваемой точки" скорость менялась минимальным образом, что реализуют так: в конечной окрестности "рассматриваемой точки" скорость считают постоянной, в вызванную этим допущение ошибку минимизируют методом наименьших квадратов.

В конечном итоге система уравнений для нахождения компонент скорости приобретает вид:

$$\mathbf{Q}\mathbf{v} = \mathbf{b}, \quad (7)$$

где

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n q_i \left( \frac{\partial I(b_i)}{\partial x} \right)^2 & \sum_{i=1}^n q_i \frac{\partial I(b_i)}{\partial x} \frac{\partial I(b_i)}{\partial y} \\ \sum_{i=1}^n q_i \frac{\partial I(b_i)}{\partial x} \frac{\partial I(b_i)}{\partial y} & \sum_{i=1}^n q_i \left( \frac{\partial I(b_i)}{\partial y} \right)^2 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

$$\mathbf{b} = - \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n q_i \frac{\partial I(b_i)}{\partial x} \frac{\partial I(b_i)}{\partial t} \\ \sum_{i=1}^n q_i \frac{\partial I(b_i)}{\partial y} \frac{\partial I(b_i)}{\partial t} \end{pmatrix}, \quad (9)$$

Здесь  $b_i$  – пиксели области, видимая скорость которой нас интересует,  $q_i$  – веса пикселей (положительные ненулевые, убывают до нуля на границе области).

В поле скоростей методом наименьших квадратов следует выделить скорость  $v_{x1} = v_{x0} + Bx$ ,  $v_{y1} = v_{y0} + By$ , обусловленную движением поезда (здесь  $(v_{x0}, v_{y0})$  обусловлена угловой скоростью,  $(Bx, By)$  обусловлена движением вперед), то есть  $(v_{x0}, v_{y0}, B)$  должны быть выбраны так, чтобы скорость  $v - v_1$  большинства фоновых объектов оказались минимальна.

Соответственно,  $v - v_1$  и будет пиксельной скоростью. Истинной поперечной скоростью в метрах в секунду будет  $(v - v_1)L_{pix}$ .

Также в программе оцениваются полученные от нейронной сети данные о местоположении человека и местоположении рельсового пути с целью определения взаимного положения человека и рельсового пути. По результатам оценки маска человека помечается синим цветом, если он в опасной зоне на рельсах и красным цветом, если он находится на краю опасной зоны, но его изображение указывает, что с высокой вероятностью он окажется внутри опасной зоны (человек стоит лицом к пути). Это проиллюстрировано на рис. 3.



Рис. 3. Работа масочной сети

Отметим, что, оценивая не только местоположение человека, но и его контекст (местоположение ближайших объектов) можно оценить поведение попавшего в поле зрения камер СТЗ случайного человека. То есть, кроме низкоуровневой категориальной оценки (например, "человек=90%") нейронная сеть способна дать высокоуровневую категориальную оценку. То есть такая система способна оценить следующую "категориально-когнитивную вероятность":

- ◆ Человек безопасно уйдет до появления поезда.
- ◆ Человек не сможет оценить опасность и ему будет причинен вред в результате столкновения с поездом.
- ◆ В результате действий человека вред будет нанесен инфраструктуре железных дорог либо поезду.

Соответственно, было бы возможным и целесообразным давать временной прогноз ситуации, т.е. либо указывать время ожидаемой реализации опасной ситуации, либо прогноз, что данная ситуация не произойдет по каким-либо причинам. Для этого нейронная сеть должна анализировать траекторию движения объекта по нескольким кадрам. Для этого в используемой нейронной сети должны присутствовать как плоские слои, определяющие общие тенденции и целеполагание ситуаций, так и сверточные слои, в данном случае реализующие в параллельном режиме технологию Лукаса-Канаде построения поля скоростей посредством дифференциального анализа изображений и, тем самым, способные экстраполировать движение объекта и изменение его контекста как функцию времени.

Но, соответственно, кроме высоких требований к архитектуре такой нейронной сети и ее входным данным, не менее высокие требования предъявляются к обучающей выборке данной сети, то есть, чтобы сеть могла делать прогноз и оценивать вероятное время реализации данного прогноза, обучающая выборка должна содержать не статические ситуации, а именно ситуации с ожидаемым прогнозом и известным временем его реализации, причем обучающая выборка должна быть «достаточно полной» а смысле содержания достаточного большого набора ситуаций и прогнозов близких к «условиям эксплуатации сети».

Данная технология будет полезна в областях, где требуется постоянная оценка обстановки и необходимо оперативно решать по местоположению и контексту человека, является ли ситуация штатной, либо потенциально опасной для людей и сооружений и т.д.

**Заключение.** Системы обнаружения и распознавания движения и объектов повсеместно используются в системах, связанных с повышенной безопасностью движения. Примером таких систем являются автомобильные системы предупреждения о столкновениях и слежения за дорогой. Одной из задач таких систем является обнаружение движущихся объектов, таких как пешеходы, и их движение при переходе проезжей части [20].

Подобные технологии также востребованы и в сфере железнодорожного транспорта, так как данная область связана с четким выполнением заранее построенных графиков движения. Любое отклонение от установленного маршрута может привести к большим экономическим потерям, а несвоевременная оценка обстановки может повлиять на жизни людей. Данная работа содержит основные идеи системы компьютерного зрения, позволяющей обнаруживать препятствия на пути железнодорожного транспорта для их предварительной классификации и принятия решения о дальнейших действиях.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Fioretti F., Ruffaldi E., Avizzano C. A.* A single camera inspection system to detect and localize obstacles on railways based on manifold Kalman filtering // 2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). – IEEE, 2018. – Vol. 1. – P. 768-775.
2. *Минаков В.А., Фоменко В.К.* Технология машинного зрения на локомотивах для идентификации путевых сигналов // Мир транспорта. – 2020. – Т. 17, №. 6. – С. 62-72.
3. *Mukojima H. et al.* Moving camera background-subtraction for obstacle detection on railway tracks // 2016 IEEE international conference on image processing (ICIP). IEEE, 2016. – P. 3967-3971.
4. *Kyatsandra A.K. et al.* Development of TRINETRA: A Sensor Based Vision Enhancement System for Obstacle Detection on Railway Tracks // IEEE Sensors Journal. – 2022.
5. *He D. et al.* Obstacle detection in dangerous railway track areas by a convolutional neural network // Measurement Science and Technology. – 2021. – Vol. 32, No. 10. – P. 105401.
6. *Sheikh Y., Zhai Y., Shafique K. and Shah M.* Visual monitoring of railroad grade crossing // Proc. SPIE Sensors and Command Control Communications and Intelligence (C3I) Technologies for Homeland Security and Homeland Defense III. – 2004. – Vol. 5403. – P. 654-660.
7. *Konovalenko I.* Overview of methods for estimation the observed velocity of the object in the video stream // Управление, информация и оптимизация (VI ТМШ). – 2014. – С. 34-34.
8. *Le James.* How to do Semantic Segmentation using Deep learning. – URL: <https://nanonets.com/blog/how-to-do-semantic-segmentation-using-deep-learning>.
9. *Lateef F., Ruichek Y.* Survey on semantic segmentation using deep learning techniques // Neurocomputing. – 2019. – Vol. 338. – P. 321-348.
10. *Визильтер Ю.В., Желтов С.Ю., Бондаренко А.В. и др.* Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения. – М.: Физматкнига, 2010. – 672 с.
11. *He K. et al.* Mask r-cnn // Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. – 2017. – P. 2961-2969.

12. TensorFlow 2 Detection Model Zoo. – URL: [https://github.com/tensorflow/models/blob/master/research/object\\_detection/g3doc/tf2\\_detection\\_zoo.md](https://github.com/tensorflow/models/blob/master/research/object_detection/g3doc/tf2_detection_zoo.md).
13. Gulli A., Kapoor A., Pal S. Deep learning with TensorFlow 2 and Keras: regression, ConvNets, GANs, RNNs, NLP, and more with TensorFlow 2 and the Keras API. – Packt Publishing Ltd, 2019.
14. Bradski G., Kaehler A. OpenCV // Dr. Dobb's journal of software tools. – 2000. – Т. 3. – С. 2.
15. ROS Kinetic Kame. - URL: <http://wiki.ros.org/kinetic>.
16. Chang Q., Maruyama T. Real-time stereo vision system: a multi-block matching on GPU // IEEE Access. – 2018. – Vol. 6. – P. 42030-42046.
17. Banz C., Blume H., Pirsch P. Real-time semi-global matching disparity estimation on the GPU // 2011 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCV Workshops). – IEEE, 2011. – P. 514-521.
18. Fairchild C., Harman T.L. ROS Robotics By Example: Learning to control wheeled, limbed, and flying robots using ROS Kinetic Kame. – Packt Publishing Ltd, 2017.
19. Карпачевский В.В. Правила технической эксплуатации железных дорог. – 2017.
20. Sam Schauland, Joerg Velten, Anton Kummert. Motion-Based Object Detection for Automotive Applications using Multidimensional Wave Digital Filters // VTC Spring 2008 - IEEE Vehicular Technology Conference, Singapore, Singapore, 20 May 2008. – P. 2700-2704.

## REFERENCES

1. Fioretti F., Ruffaldi E., Avizzano C. A. A single camera inspection system to detect and localize obstacles on railways based on manifold Kalman filtering, 2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). IEEE, 2018, Vol. 1, pp. 768-775.
2. Minakov V.A., Fomenko V.K. Tekhnologiya mashinnogo zreniya na lokomotivakh dlya identifikatsii putevykh signalov [Technology of machine vision on locomotives for identification of track signals], *Mir transporta* [Mir transport.], 2020, Vol. 17, No. 6, pp. 62-72.
3. Mukojima H. et al. Moving camera background-subtraction for obstacle detection on railway tracks, 2016 IEEE international conference on image processing (ICIP). IEEE, 2016, p. 3967-3971.
4. Kyatsandra A.K. et al. Development of TRINETRA: A Sensor Based Vision Enhancement System for Obstacle Detection on Railway Tracks, *IEEE Sensors Journal*, 2022.
5. He D. et al. Obstacle detection in dangerous railway track areas by a convolutional neural network, *Measurement Science and Technology*, 2021, Vol. 32, No. 10, pp. 105401.
6. Sheikh Y., Zhai Y., Shafique K. and Shah M. Visual monitoring of railroad grade crossing, *Proc. SPIE Sensors and Command Control Communications and Intelligence (C3I) Technologies for Homeland Security and Homeland Defense III*, 2004, Vol. 5403, pp. 654-660.
7. Konovalenko I. Overview of methods for estimation the observed velocity of the object in the video stream, *Upravlenie, informatsiya i optimizatsiya (VI TMSH)* [Management, Information and optimization (VI TMSH)], 2014, pp. 34-34.
8. Le James. How to do Semantic Segmentation using Deep learning. Available at: <https://nanonets.com/blog/how-to-do-semantic-segmentation-using-deep-learning>.
9. Lateef F., Ruichek Y. Survey on semantic segmentation using deep learning techniques, *Neurocomputing*, 2019, Vol. 338, pp. 321-348.
10. Vizil'ter Yu.V., Zheltov S.Yu., Bondarenko A.V. i dr. Obrabotka i analiz izobrazheniy v zadachakh mashinnogo zreniya [Image processing and analysis in machine vision problems]. Moscow: Fizmatkniga, 2010, 672 p.
11. He K. et al. Mask r-cnn, *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*, 2017, pp. 2961-2969.
12. TensorFlow 2 Detection Model Zoo. Available at: [https://github.com/tensorflow/models/blob/master/research/object\\_detection/g3doc/tf2\\_detection\\_zoo.md](https://github.com/tensorflow/models/blob/master/research/object_detection/g3doc/tf2_detection_zoo.md).
13. Gulli A., Kapoor A., Pal S. Deep learning with TensorFlow 2 and Keras: regression, ConvNets, GANs, RNNs, NLP, and more with TensorFlow 2 and the Keras API. Packt Publishing Ltd, 2019.
14. Bradski G., Kaehler A. OpenCV, *Dr. Dobb's journal of software tools*, 2000, Vol. 3, pp. 2.
15. ROS Kinetic Kame. - URL: <http://wiki.ros.org/kinetic>.

16. Chang Q., Maruyama T. Real-time stereo vision system: a multi-block matching on GPU, *IEEE Access*, 2018, Vol. 6, pp. 42030-42046.
17. Banz C., Blume H., Pirsch P. Real-time semi-global matching disparity estimation on the GPU, *2011 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCV Workshops)*. IEEE, 2011, pp. 514-521.
18. Fairchild C., Harman T.L. ROS Robotics By Example: Learning to control wheeled, limbed, and flying robots using ROS Kinetic Kame. Packt Publishing Ltd, 2017.
19. Karpachevskiy V.V. Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznikh dorog [Rules of technical operation of railways], 2017.
20. Sam Schauland, Joerg Velten, Anton Kummert. Motion-Based Object Detection for Automotive Applications using Multidimensional Wave Digital Filters, *VTC Spring 2008 - IEEE Vehicular Technology Conference, Singapore, Singapore, 20 May 2008*, pp. 2700-2704.

Статью рекомендовал к опубликованию к.ф.-м.н. С.В. Семендяев.

**Шишков Дмитрий Леонидович** – МФТИ; e-mail: shishkov\_dmitry\_geor@mail.ru; г. Долгопрудный, Россия; ведущий программист-разработчик лаборатории волновых процессов и систем управления.

**Зарипов Михаил Нилович** – e-mail: mikezmn@mail.ru; ведущий программист-разработчик лаборатории волновых процессов и систем управления.

**Горбачев Роман Александрович** – к.т.н.; зав. лабораторией волновых процессов и систем управления.

**Shishkov Dmitry Leonidovich** – MIPT; e-mail: shishkov\_dmitry\_geor@mail.ru; Dolgoprudnyy, Russia; leading programmer and developer of the laboratory of wave processes and control systems.

**Zaripov Mikhail Nilovich** – e-mail: mikezmn@mail.ru; leading programmer and developer of the laboratory of wave processes and control systems.

**Gorbachev Roman Alexandrovich** – cand. of eng. sc.; head of the laboratory of wave processes and control systems

УДК 007:621.865.8

DOI 10.18522/2311-3103-2022-1-268-278

**В.П. Носков, А.Н. Курьянов**

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЛЕКСИРОВАННЫХ ДЕСКРИПТОРОВ В РЕШЕНИИ SLAM-ЗАДАЧИ**

*Рассмотрена актуальная задача определения всех шести координат (трех линейных и трех угловых) текущего положения мобильного робота (беспилотного летательного аппарата) по видео-дальномерным изображениям внешней среды (объемным раскрашенным облакам точек), формируемым бортовой комплексированной системой технического зрения, построенной на базе 3D-дальномерного сенсора (лидара) и цветной видеокамеры, при движении (полете) в неизвестной среде. Предложен алгоритм видеонавигации, основанный на использовании комплексированных (видео-дальномерных) дескрипторов, для описания которых используются яркостные и геометрические параметры. Сформулированы правила формирования комплексированного дескриптора, обеспечивающие выделение с помощью оператора Собеля особых (центральных) точек дескриптора и вычисление яркостных и геометрических параметров в его локальной области. Дополнение яркостных параметров дескриптора, формируемых видеокамерой, геометрическими параметрами, формируемых дальномерным сенсором, снимает проблему инвариантности дескриптора к масштабу и тем самым существенно снижает трудоемкость вычислений при его выделении. Описаны правила нахождения соответствующих друг другу комплексированных дескрипторов в последовательности комплексированных изображений, основанные на вычислении разности яркостных и геометрических парамет-*

ров сравниваемых дескрипторов. Выполнена оценка ошибки решения навигационной задачи с использованием комплексированных дескрипторов в зависимости от ошибки сенсоров системы технического зрения и геометрических размеров дескриптора. За счет построения гистограмм решения навигационной задачи по каждой координате объекта управления для всех пар соответствующих друг другу дескрипторов достигнута статистически устойчивая высокая достоверность решения полной навигационной задачи. При этом ошибка решения навигационной задачи получилась на порядок меньше ошибки при формировании системой технического зрения комплексированных изображений. Использование комплексированных дескрипторов позволило при сравнительно малом объеме вычислений с приемлемой точностью и быстродействием решить полную навигационную задачу, что обеспечивает решение SLAM-задачи на бортовых вычислителях в темпе движения объекта управления. Эффективность предложенных алгоритмических и разработанных программно-аппаратных средств подтверждена натурными экспериментами, проведенными в реальных условиях различных сред.

*Дальномертический сенсор; облако точек; телевизионное изображение; комплексированное изображение; комплексированный дескриптор.*

V.P. Noskov, A.N. Kuryanov

### THE APPLICATION OF COMPLEX DESCRIPTORS IN SOLVING A SLAM TASK

*The actual problem of determining all six coordinates (three linear and three angular) of the current position of a mobile robot (unmanned aerial vehicle) from video rangefinder images of the external environment (volumetric colored point clouds) formed by an onboard integrated vision system built on the basis of a 3D rangefinder sensor (lidar) and a color video camera while moving (flying) in an unknown environment is considered. An algorithm of video navigation based on the use of complexed (video-rangefinder) descriptors is proposed, for the description of which visual and geometric parameters are used. The rules for the formation of a complex descriptor are formulated, which ensure the allocation of special (central) points of the descriptor using the Sobel operator and the calculation of brightness and geometric parameters in its local area. The addition of the brightness parameters of the descriptor provided by the video camera with the geometric parameters provided by the rangefinder sensor removes the problem of invariance of the descriptor to the scale and thereby significantly reduces the complexity of calculations when selecting it. The rules for finding complexed descriptors corresponding to each other in a sequence of complexed images are described, based on calculating the difference in brightness and geometric parameters of the compared descriptors. The estimation of the error in solving the navigation problem using the integrated descriptors was performed depending on the error of the sensors of the vision system and the geometric dimensions of the descriptor. By constructing histograms of the solution of the navigation problem for each coordinate of the control object for all pairs of descriptors corresponding to each other, a statistically stable high reliability of the solution of the complete navigation problem has been achieved. At the same time, the error in solving the navigation task turned out to be an order of magnitude smaller than the error in the formation of complex images by the technical vision system. The use of complex descriptors made it possible, with a relatively small amount of calculations, to solve the complete navigation problem with acceptable accuracy, which provides a solution to the SLAM problem on the onboard computations at the pace of movement of the control object. The effectiveness of the proposed algorithmic and developed software and hardware is confirmed by field experiments conducted in real conditions of various environments.*

*Rangefinder sensor; point cloud; television image; complex image; complex descriptor.*

**Введение.** Центральной и актуальной для востребованной сейчас автономной робототехники является SLAM-задача – определение текущих координат объекта управления с построением модели внешней среды по данным бортовой СТЗ в процессе движения. Знание текущих координат и модели внешней среды обеспечивает автоматическое планирование безопасных целенаправленных траекторий движения и их отработку, что является основой автономного (без участия человека-

оператора) управления движением. Из этих двух взаимосвязанных подзадач ведущей и наиболее сложной является задача видеонавигации. Наиболее эффективными с точки зрения практичности, точности и полноты ее решения являются средства видеонавигации на основе 3D-дальнометрических сенсоров. Существует множество методов и алгоритмов решения навигационной задачи по данным 3D-сенсоров [1–17]. Практически все они сводятся к трудоемким задачам многомерной оптимизации. Снижения объема вычислений здесь можно добиться за счет использования, когда это возможно, традиционных средств навигации (одометрических, инерциальных, спутниковых), обеспечивающих сужение области поиска глобального оптимума функционала оптимизации до области их ошибки [5, 6, 8, 15, 16]. Другим перспективным направлением повышения эффективности решения видеонавигационной задачи является использование видеосенсоров различной физической природы [9, 17], что позволяет объединять их преимущества, исключать недостатки и получить новое качество. Например, в работе [17] показано, что комплексирование данных 3D-лазерного сенсора и видеокамеры позволяет выделять и использовать для навигации плоские текстурированные объекты, что существенно упрощает решение навигационной задачи в урбанизированной среде. Однако данный подход не работает в естественной среде, где нет плоских объектов. В работе [12], где также используются видео и дальнометрические изображения, сначала в видеоизображениях выделяются соответствующие друг другу локальные SIFT-дескрипторы [19–21], что существенно упрощает решение навигационной задачи по соответствующим дальнометрическим изображениям. Однако сам процесс выделения необходимого числа достоверных дескрипторов является не тривиальной задачей.

В данной работе предлагается в видео-дальнометрическом изображении, сформированном комплексированной СТЗ, состоящей из взаимно юстированных лидара и цветной видеокамеры, выделять и использовать для решения задачи видеонавигации комплексированные (видео-дальнометрические) дескрипторы, которые характеризуются как яркостными, так и геометрическими параметрами. Наличие геометрических параметров комплексированного дескриптора автоматически обеспечивает инвариантность дескриптора к масштабу, что позволяет по сравнению с обычным дескриптором (например, SIFT) существенно упростить процесс их выделения и использования.

**Определение комплексированного дескриптора.** В качестве особых точек (кандидатов в центральные точки дескрипторов) целесообразно использовать наиболее контрастные точки телевизионного изображения, выделенные с помощью оператора Собеля [22, 23]:

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2},$$

$$G_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ +1 & +2 & +1 \end{bmatrix} * A, \quad G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix} * A,$$

где  $A$  – исходное телевизионное изображение в полутонах.

Такие точки менее чувствительны к ошибкам видеокамеры, так как каждая такая точка представляет собой результат обработки значений яркости соседних пикселей. Направление градиента перепада яркости в локальной области особой точки рассчитывается как:  $\varphi = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right)$ . Выделенные оператором Собеля особые точки инвариантны к смещениям и поворотам, а градиент перепада яркости определяется с высокой точностью по направлению ( $\approx 1^\circ$ ) [22].

Одним из основных преимуществ дополнения телевизионного изображения дальнометрическим, является то, что становится известна геометрия изображения и можно напрямую привести текстуры дескрипторов к единому масштабу. При

расчетах только по телевизионным изображениям, для получения инвариантности дескриптора к масштабу чаще всего используют пирамиды гауссианов (Gaussian) и разностей гауссианов (Difference of Gaussian, DoG) [24], что требует значительных объемов вычислений и памяти. При построении же комплексированного дескриптора достаточно просто натянуть текстуру (цветовую яркость) на геометрию окрестности особой точки.

Для формирования параметров комплексированного дескриптора используем крестообразное сечение комплексированного изображения в локальной области особой точки, при этом одна из осей сечения должна совпадать по направлению с градиентом яркости (рис. 1). В качестве параметров такого дескриптора выберем координаты центра ( $v_0$ ) и концов ( $v_i, i=1,2,3,4$ ) креста и распределение текстуры по крестообразному сечению.

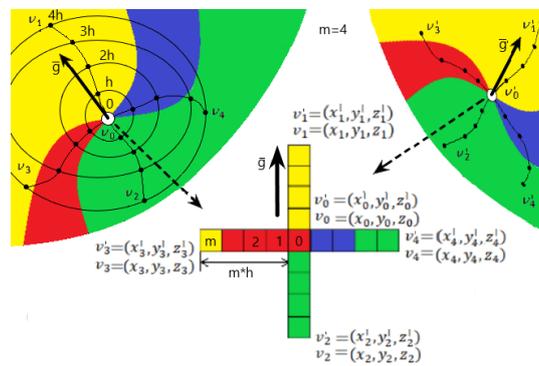


Рис. 1. Параметры комплексированного дескриптора

Таким образом, комплексированный дескриптор в соответствии с выбранным сечением будет иметь следующие параметры: два распределения цветовой яркости, каждое из  $(m * 2 + 1)$  элементов ( $m$  – число элементов одного плеча креста), и пять координат концов креста и его центра. Так как ошибка дальнометрического сенсора может быть соизмерима и даже превосходить расстояние между соседними точками в дальнометрическом изображении, то для ее нивелировки необходимо выбирать соответствующие размеры локальной области вокруг особой точки, которые определяются значением  $m \cdot h$  ( $h$  – шаг дискретизации комплексированного изображения в локальной области дескриптора). Значение параметра  $m$  выбирается исходя из практики сравнения телевизионных изображений, которая показывает, что  $2 \cdot (m * 2 + 1) \approx 16 \div 64$  пикселя достаточно для оценки схожести изображений [25], поэтому  $m$  можно задавать в пределах  $4 \div 8$ . Такие значения  $m$  позволяют достаточно надежно находить соответствующие друг другу дескрипторы в последовательности изображений (на рис. 1 приведен один и тот же дескриптор, выделенный в 2-х комплексированных изображениях, полученных из разных положений сенсора).

Так как дальнометрический сенсор формирует координаты каждой точки с некоторой ошибкой  $\delta$ , то и вычисление с использованием введенных дескрипторов перемещения сенсора выполняется с ошибкой. При этом линейная составляющая ошибки будет соразмерна  $\delta$ , а угловая будет зависеть от расстояния между центральной и крайними точками дескриптора ( $m \cdot h$ ) и верхняя граница ее  $\mu$  будет равна  $\text{atan} \frac{2 \cdot \delta}{m \cdot h}$  (рис. 2). Данная оценка позволяет выбрать значение  $h$ , обеспечивающее решение навигационной задачи с возможной для предлагаемого метода точностью.

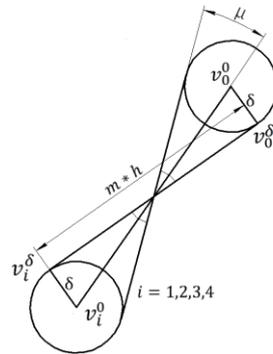


Рис. 2. Оценка ошибки комплексированного дескриптора

Сложность выделения особых (центральных) точек дескриптора можно оценить как  $n^2IJ$  ( $n$  – размер контрастного фильтра,  $I$  и  $J$  – размеры изображения). Определение параметров дескриптора сводится в основном к вычислению расстояний между используемыми в структуре дескриптора точками и аппроксимации текстуры на дискретные элементы дескриптора, что не требует большого объема вычислений в следствии ограниченного числа дескрипторов.

**Решение навигационной задачи.** В начале в двух анализируемых изображениях вычисляются и находятся соответствующие друг другу комплексированные дескрипторы. Соответствие дескрипторов определяется по степени близости их параметров (минимум разности яркостных и геометрических параметров сравниваемых дескрипторов). Пусть в двух изображениях, полученных соответственно из положений  $O_1$  и  $O_2$ , найден в соответствующих системах координат ( $O_1XYZ$  и  $O_2xyz$ ) один и тот же комплексированный дескриптор (рис. 3). Требуется вычислить перемещение  $\langle \Delta X, \Delta Y, \Delta Z, \Delta \varphi, \Delta \psi, \Delta \theta \rangle$  сенсора из положения  $O_1$  в  $O_2$  в системе координат  $O_1XYZ$ .

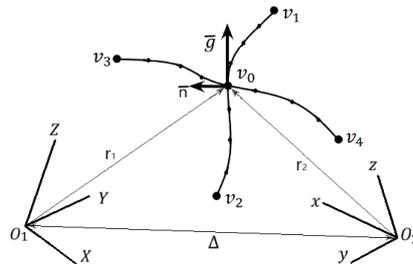


Рис. 3. Комплексированный дескриптор и системы координат сенсора

Для одного и того же вектора  $\vec{n}$ , заданного соответственно в первой ( $O_1XYZ$ ) и второй системах ( $O_2xyz$ ) координат, как  $\vec{n}_1$  и  $\vec{n}_2$ , можно записать следующее векторное уравнение относительно искомых угловых перемещений  $\langle \Delta \varphi, \Delta \psi, \Delta \theta \rangle$ :

$$\vec{n}_1 = A(\Delta \varphi, \Delta \psi, \Delta \theta) \vec{n}_2,$$

где  $A(\Delta \varphi, \Delta \psi, \Delta \theta) = A_Z(\Delta \varphi) \times A_X(\Delta \psi) \times A_Y(\Delta \theta)$  – обобщенная матрица поворотов при переходе из системы  $O_2xyz$  в систему  $O_1XYZ$  ( $A_E(F)$  – матрица поворота вокруг оси  $E$  на угол  $F$ ).

Для его однозначного разрешения достаточно подстановки в данное уравнение двух неколлинеарных векторов, координаты которых известны в обеих системах координат. Такими векторами могут быть градиент яркости и нормаль к

плоскости, проходящей через центральную точку и любые две крайние точки разных «перекладин креста» дескриптора. Для формального описания предлагаемого подхода удобно использовать аппарат кватернионов. Для кватерниона поворота нормали  $q_n$  осью поворота является вектор  $N_n = n_1 * n_2$ , а углом поворота  $\omega_n = \arccos\left(\frac{n_1 n_2}{|n_1||n_2|}\right)$  ( $n_1$  и  $n_2$  – нормали, полученные из пары соответствующих дескрипторов):

$$q_n = \left[ \frac{N_n}{|N_n|} \sin \frac{\omega_n}{2} \cos \frac{\omega_n}{2} \right].$$

Для кватерниона поворота градиента яркости  $q_g$  осью поворота является вектор  $N_g = g_1$ , а углом поворота  $\omega_g = \arccos\left(\frac{g_1 g_2}{|g_1||g_2|}\right)$  ( $g_1$  и  $g_2$  – градиенты яркостей, полученные из пары соответствующих дескрипторов):

$$q_g = \left[ \frac{N_g}{|N_g|} \sin \frac{\omega_g}{2} \cos \frac{\omega_g}{2} \right].$$

Итоговые угловые перемещения можно представить как композицию кватернионов:

$$Q = \langle Q_x, Q_y, Q_z, Q_w \rangle = q_g q_n.$$

Тогда вектор угловых перемещений в соответствии с принятой выше последовательностью элементарных поворотов определяется следующим выражением:

$$\begin{vmatrix} \Delta\varphi \\ \Delta\theta \\ \Delta\psi \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \operatorname{atan}\left(\frac{2Q_y Q_x - 2Q_y Q_z}{1 - 2Q_x^2 - 2Q_z^2}\right) \\ \operatorname{atan}\left(\frac{2Q_x Q_w - 2Q_y Q_z}{1 - 2Q_x^2 - 2Q_z^2}\right) \\ \operatorname{asin}(2Q_x Q_x - 2Q_z Q_w) \end{vmatrix}.$$

Вектор линейных перемещений  $\Delta = \langle \Delta X, \Delta Y, \Delta Z \rangle$  можно найти как:

$$\Delta = r_1 - A(\Delta\varphi, \Delta\psi, \Delta\theta)r_2,$$

где  $r_1$  и  $r_2$  – радиус-вектора до центральных точек дескриптора в первой и второй системах координат соответственно.

При использовании одной пары дескрипторов ошибка определения приращений координат будет соответствовать ошибке дескриптора, оценка которой приведена выше. Кроме того существует возможность сбоя в следствии возможности ошибочного определения соответствия дескрипторов из-за неблагоприятного сочетания геометрических и текстурных особенностей внешней среды. Для устранения данных недостатков необходимо учитывать решения для всех выделенных пар дескрипторов путем построения гистограмм вычисленных приращений координат. Такой подход повышения статистической устойчивости при незначительном увеличении объема вычислений позволяет снизить влияние ошибки сенсора за счет усреднения решений и исключить использование неправильно подобранных пар дескрипторов, которых, как показывает практика, гарантированное меньшинство.

**Результаты экспериментальных исследований.** Для экспериментальной проверки разработанных алгоритмических и программных средств использовались комплектированные изображения (рис. 4), полученные камерой глубины и цветной видеокамерой сенсора Asus Xtion PRO [26].

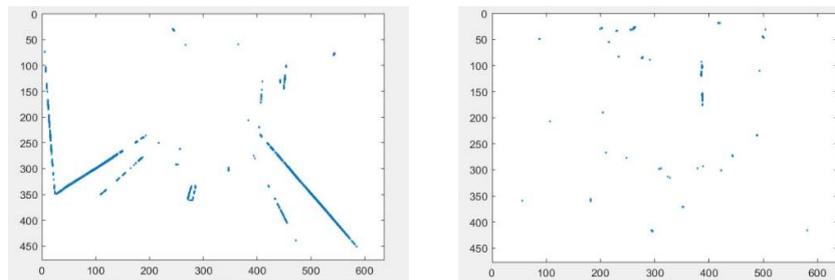


а) Урбанизированная среда

б) Пересеченная местность

Рис. 4. Изображения различных сред

Так как в реальных изображениях некоторые точки могут содержать неполную или ошибочную информацию (артефакты), то их необходимо удалить до начала выделения дескрипторов. Возникновение артефактов обусловлено ограничениями по измерению дальностей до объектов внешней среды, а также из-за параллакса камер глубины и видеокамеры. Для удаления артефактов достаточно удалить соседние дальнометрические точки, расстояние между которыми превышает некоторое пороговое значение, а также пиксели видеоизображения, для которых нет соответствующих измерений дальности. На рис. 4,а) приведено уже очищенное от артефактов изображение урбанизированной среды. Результаты применения оператора Собеля для изображений различных сред приведены на рис. 5.

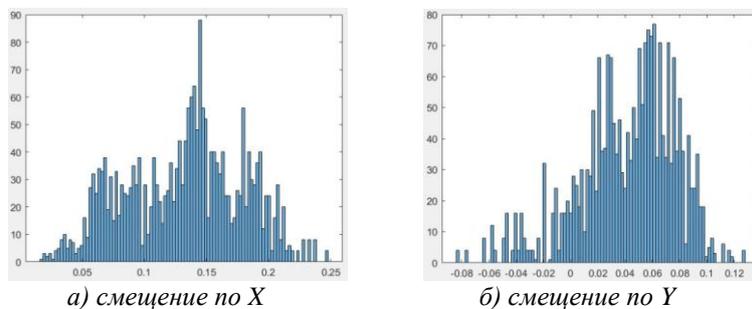


а) урбанизированная среда

б) пересеченная местность

Рис. 5. Особые точки изображения

На рис. 6 для примера приведены гистограммы решения навигационной задачи по всем шести координатам для всех пар соответствующих друг другу дескрипторов, выделенных в первом и втором изображениях сцены помещения, приведенной на рис. 4,а). Максимумы гистограмм соответствуют наиболее достоверному решению навигационной задачи.



а) смещение по X

б) смещение по Y

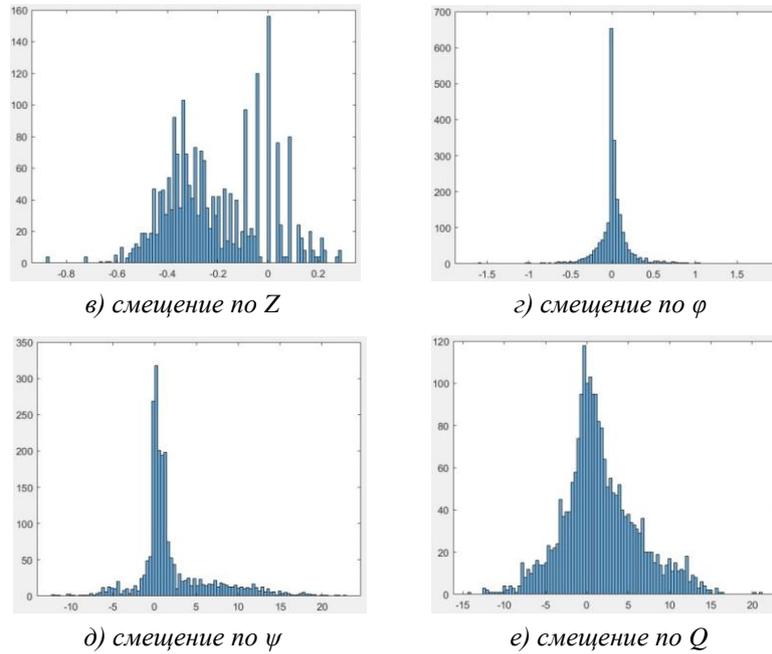


Рис. 6. Гистограммы решения навигационной задачи в урбанизированной среде

Результаты работы созданных программно-аппаратных средств при решении SLAM-задачи по последовательности из 5-и комплексированных изображений, полученным в процессе движения сенсора в различных средах, приведены на рис. 7. Время вычислений на один цикл решения SLAM-задачи (обработка 2-х соседних изображений из последовательности) на компьютере с процессором Intel(R) Core(TM) i7-9750H составляет 0.15 с.

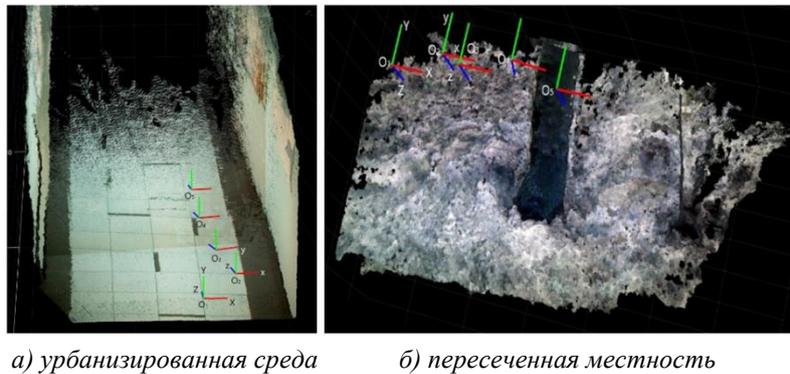


Рис. 7. Результат решения SLAM-задачи

**Заключение.** Разработанный алгоритм навигации по комплексированным видеоданным, формируемым бортовыми взаимно-юстированными дальнометрическим и телевизионным сенсорами, на основе предложенного аппарата видеодальнометрических дескрипторов обеспечивает при сравнительно малом объеме вычислений достоверное решение полной навигационной задачи и формирование объединенной модели внешней среды на бортовых вычислителях в темпе движе-

ния объектов управления. Эффективность предложенных алгоритмических и разработанных программно-аппаратных средств решения SLAM-задачи подтверждается результатами натуральных экспериментов, проведенными в реальных условиях индустриально-городских сред и пересеченной местности.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Каляев А.В., Носков В.П., Чернухин Ю.В., Каляев И.А.* Однородные управляющие структуры адаптивных роботов. – М.: Наука, 1990. – 147 с.
2. *Besl P.J., McKay Neil D.* A Method for Registration of 3-D Shapes // IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 1992. – Vol. 14, No. 2. – P. 239-256.
3. *Zhang Zhengyou.* Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces // International Journal of Computer Vision. – 1994. – Vol. 13 (12). – P. 119-152.
4. *Носков В.П., Носков А.В.* Система экстремальной навигации цехового транспортного робота // Искусственный интеллект в технических системах: Сб. научных трудов. – М.: Гос.ИФТП. 1998. – С. 136-144.
5. *Лакота Н.А., Носков В.П., Рубцов И.В., Лундгрен Я.-О. Моор Ф.* Опыт использования элементов искусственного интеллекта в системе управления цехового транспортного робота // Мехатроника. – 2000. – № 4. – С. 44-47.
6. *Носков В.П., Носков А.В.* Распознавание ориентиров в дальнометрических изображениях // Сб. МГУ «Мобильные роботы и мехатронные системы». – 2001. – С. 179-192.
7. *Mitra N., Gelfand N., Pottmann H., Guibas L.J.* Registration of Point Cloud Data from a Geometric Optimization Perspective // Proceedings of the 2004 Eurographics/ACM SIGGRAPH symposium on Geometry processing. – 2004. – P. 22-31.
8. *Носков В.П., Носков А.В.* Навигация мобильных роботов по дальнометрическим изображениям // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2005. – № 12. – С. 16-21.
9. *Носков В.П., Рубцов И.В., Романов А.Ю.* Формирование объединенной модели внешней среды на основе информации видеокамеры и дальномера // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2007. – № 8. – С. 2-5.
10. *Nüchter A., Lingemann K., Hertzberg J., Surmann H.* 6D SLAM - 3D Mapping Outdoor Environments // Journal of Field Robotics. – September 2007. – Vol. 24, No. 8-9. – P. 699-722.
11. *Segal A., Haehnel D., Thrun S.* Generalized-ICP // Proc. of Robotics: Science and Systems, RSS, 2009.
12. *Загоруйко С.Н., Носков В.П.* Регистрация дальнометрических и телевизионных данных при построении трехмерной модели внешней среды // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – Вып. 8. – URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/robot/933.html>.
13. *Pomerleau F., Colas F., Siegwart R., Magnenat S.* Comparing ICP Variants on Real-World Data Sets // Autonomous Robots. – April 2013. – Vol. 34, No. 3. – P. 133-144.
14. *Bylow E., Sturm J., Kerl C., Kahl F., Cremers D.* Real-Time Camera Tracking and 3D Reconstruction Using Signed Distance Functions // Proceedings of "Robotics: Science and Systems". Berlin, Germany, 2013. – Vol. 9.
15. *Казьмин В.Н., Носков В.П.* Выделение геометрических и семантических объектов в дальнометрических изображениях для навигации роботов и реконструкции внешней среды // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 10 (171). – С. 71-83.
16. *Носков В.П., Киселев И.О.* Трехмерный вариант метода Хафа в реконструкции внешней среды и навигации // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2018. – № 8. – С. 552-560.
17. *Носков В.П., Киселев И.О.* Использование текстуры линейных объектов для построения модели внешней среды и навигации // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2019. – № 8, Т. 20. – С. 490-497.
18. *Носков В.П., Губернаторов Д.В.* Экстремальная навигация по 3D-изображениям в мобильной робототехнике // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2021. – № 11, Т. 22. – С. 594-600.
19. *David L.* Object recognition from local scale-invariant features // Proceedings of the International Conference on Computer Vision. – 1999. – Vol. 2. – P. 1150.
20. *Bay H., Tuytelaars T., Gool L.V.* SURF: Speeded Up Robust Features // Computer Vision and Image Understanding. – 2008. – URL: <http://www.vision.ee.ethz.ch/~surf/eccv06.pdf>.

21. Ke Y., Sukthankar R. PCA-SIFT: A More Distinctive Representation for Local Image Descriptors. – URL <http://www.cs.cmu.edu/~rahuls/pub/cvpr2004-keypoint-rahuls.pdf>.
22. Duda R., Hart P. Pattern Classification and Scene Analysis. – John Wiley and Sons, 1973. – P. 271-272.
23. Gonzalez R., Woods R. Digital Image processing. – Moscow: Technosphere, 2005. – 1007 p.
24. Kevin P. Murphy. Gaussians. – 2006.
25. Ивашицкий А.П., Василенко А.Ю., Гончаров Б.Д. Методы нахождения особых точек изображения и их дескрипторов // Молодой ученый. – 2016. – № 15. – С. 138-140. – URL <https://moluch.ru/archive/119/33106/> (дата обращения: 06.03.2020).
26. [http://www.asus.com/Multimedia/Xtion\\_PRO\\_LIVE/](http://www.asus.com/Multimedia/Xtion_PRO_LIVE/).

## REFERENCES

1. Kalyaev A.V., Noskov V.P., Chernukhin Yu.V., Kalyaev I.A. Odnorodnye upravlyayushchie struktury adaptivnykh robotov [Homogeneous control structures of adaptive robots]. Moscow: Nauka, 1990, 147 p.
2. Besl P.J., McKay Neil D. A Method for Registration of 3-D Shapes, *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 1992, Vol. 14, No. 2, pp. 239-256.
3. Zhang Zhengyou. Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces, *International Journal of Computer Vision*, 1994, Vol. 13 (12), pp. 119-152.
4. Noskov V.P., Noskov A.V. Sistema ekstremal'noy navigatsii tsekhovogo transportnogo robota [System navigation and extreme shop transport robot], *Iskusstvennyy intellekt v tekhnicheskikh sistemakh: Sb. nauchnykh trudov* [Artificial intelligence in engineering systems: Collection of scientific papers]. Moscow: Gos.IFTP. 1998, pp. 136-144.
5. Lakota N.A., Noskov V.P., Rubtsov I.V., Lundgren Ya.-O. Moor F. Opyt ispol'zovaniya elementov iskusstvennogo intellekta v sisteme upravleniya tsekhovogo transportnogo robota [The experience of using artificial intelligence elements in the control system of a shop transport robot], *Mekhatronika* [Mechatronics], 2000, No. 4, pp. 44-47.
6. Noskov V.P., Noskov A.V. Raspoznavanie orientirov v dal'nometricheskikh izobrazheniyakh [Recognition of landmarks in rangefinder images], *Sb. MGU «Mobil'nye roboty i mekhatronnye sistemy»* [Collection of MSU "Mobile robots and mechatronic systems", 2001, pp. 179-192.
7. Mitra N., Gelfand N., Pottmann H., Guibas L.J. Registration of Point Cloud Data from a Geometric Optimization Perspective, *Proceedings of the 2004 Eurographics/ACM SIGGRAPH symposium on Geometry processing*, 2004, pp. 22-31.
8. Noskov V.P., Noskov A.V. Navigatsiya mobil'nykh robotov po dal'nometricheskikh izobrazheniyam [Navigation of mobile robots by rangefinder images], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2005, No. 12, pp. 16-21.
9. Noskov V.P., Rubtsov I.V., Romanov A.Yu. Formirovanie ob"edinennoy modeli vneshney sredy na osnove informatsii videokamery i dal'nomera [Formation of a combined model of the external environment based on information from a video camera and a rangefinder], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2007, No. 8, pp. 2-5.
10. Nüchter A., Lingemann K., Hertzberg J., Surmann H. 6D SLAM - 3D Mapping Outdoor Environments, *Journal of Field Robotics*, September 2007, Vol. 24, No. 8-9, pp. 699-722.
11. Segal A., Haehnel D., Thrun S. Generalized-ICP, *Proc. of Robotics: Science and Systems, RSS, 2009*.
12. Zagoruyko S.N., Noskov V.P. Registratsiya dal'nometricheskikh i televizionnykh dannykh pri postroenii trekhmernoy modeli vneshney sredy [Registration of rangefinder and television data in the construction of a three-dimensional model of the external environment], *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2013, Issue 8. available at: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/robot/933.html>.
13. Pomerleau F., Colas F., Siegwart R., Magnenat S. Comparing ICP Variants on Real-World Data Sets, *Autonomous Robots*, April 2013, Vol. 34, No. 3, pp. 133-144.
14. Bylow E., Sturm J., Kerl C., Kahl F., Cremers D. Real-Time Camera Tracking and 3D Reconstruction Using Signed Distance Functions, *Proceedings of "Robotics: Science and Systems"*. Berlin, Germany, 2013, Vol. 9.

15. Kaz'min V.N., Noskov V.P. Vydelenie geometricheskikh i semanticheskikh ob'ektov v dal'nometricheskikh izobrazheniyakh dlya navigatsii robotov i rekonstruktsii vneshney sredy [Selection of geometric and semantic objects in rangefinder images for robot navigation and reconstruction of the external environment], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 10 (171), pp. 71-83.
16. Noskov V.P., Kiselev I.O. Trekhmernyy variant metoda Khafa v rekonstruktsii vneshney sredy i navigatsii [A three-dimensional version of the Hough method in the reconstruction of the external environment and navigation], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2018, No. 8, pp. 552-560.
17. Noskov V.P., Kiselev I.O. Ispol'zovanie tekstury lineynykh ob'ektov dlya postroeniya modeli vneshney sredy i navigatsii [Using the texture of linear objects to build a model of the external environment and navigation], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2019, No. 8, Vol. 20, pp. 490-497.
18. Noskov V.P., Gubernatorov D.V. Ekstremal'naya navigatsiya po 3D-izobrazheniyam v mobil'noy robototekhnike [Extreme navigation on 3D images in mobile robotics], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2021, No. 11, Vol. 22, pp. 594-600.
19. David L. Object recognition from local scale-invariant features, *Proceedings of the International Conference on Computer Vision*, 1999, Vol. 2, pp. 1150.
20. Bay H., Tuytelaars T., Gool L.V. SURF: Speeded Up Robust Features, *Computer Vision and Image Understanding*, 2008. Available at: <http://www.vision.ee.ethz.ch/~surf/eccv06.pdf>.
21. Ke Y., Sukthankar R. PCA-SIFT: A More Distinctive Representation for Local Image Descriptors. Available at: <http://www.cs.cmu.edu/~rahuls/pub/cvpr2004-keypoint-rahuls.pdf>.
22. Duda R., Hart P. Pattern Classification and Scene Analysis. John Wiley and Sons, 1973, pp. 271-272.
23. Gonzalez R., Woods R. Digital Image processing. Moscow: Technosphere, 2005, 1007 p.
24. Kevin P. Murphy. Gaussians, 2006.
25. Ivashchkin A.P., Vasilenko A.Yu., Goncharov B.D. Metody nakhozheniya osobykh toчек izobrazheniya i ikh deskriptorov [Methods of finding singular image points and their descriptors], *Molodoy uchenyy* [Young Scientist], 2016, No. 15, pp. 138-140. Available at: <https://moluch.ru/archive/119/33106/> (accessed 06 March 2020).
26. Available at: [http://www.asus.com/Multimedia/Xtion\\_PRO\\_LIVE/](http://www.asus.com/Multimedia/Xtion_PRO_LIVE/).

Статью рекомендовал к опубликованию академик РАН И.А. Каляев.

**Носков Владимир Петрович** – Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана; e-mail: [noskov\\_mstu@mail.ru](mailto:noskov_mstu@mail.ru); г. Москва, Россия; тел.: +79166766057; кафедра СМ-7 «Робототехнические системы и мехатроника», к.т.н.; доцент; НИИ Специального машиностроения, зав. сектором.

**Курьянов Алексей Николаевич** – e-mail: [tigr-kur@mail.ru](mailto:tigr-kur@mail.ru); тел.: +79258248138; кафедра СМ-7 «Робототехнические системы и мехатроника»; магистр.

**Noskov Vladimir Petrovich** – Bauman Moscow State Technical University; e-mail: [noskov\\_mstu@mail.ru](mailto:noskov_mstu@mail.ru); Moscow, Russia; phone: +79166766057; cand. of eng. sc.; Special robotics and mechatronics department, NIISM sector head.

**Kuryanov Alexsei Nikolaevich** – e-mail: [tigr-kur@mail.ru](mailto:tigr-kur@mail.ru); phone: +79258248138; master.

**К.А. Суминов, Н.А. Бочаров**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОГРАНИЧЕНИЙ ПРИМЕНИМОСТИ  
МИКРОПРОЦЕССОРОВ РЯДА ЭЛЬБРУС ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ  
ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ**

*Одним из ключевых направлений развития области искусственного интеллекта является направление технического зрения. Для ресурсоемких задач технического зрения создаются высокопроизводительные вычислительные комплексы (ВК), использующие специализированные ускорители. Использование таких ускорителей обусловлено неспособностью микропроцессоров (МП) общего назначения решить такие задачи за поставленное время вследствие большой вычислительной нагрузки. Однако, в настоящее время, МП ряда Эльбрус успешно используются для решения задач технического зрения как в серверном, так и в бортовом режимах, а появление МП Эльбрус шестого поколения должно еще больше повысить производительность на таких задачах. В силу дороговизны, большей сложности и ограничений в использовании систем со специализированными ускорителями встает вопрос об определении условий, в которых для решения рассматриваемых задач достаточно использовать МП общего назначения, например из ряда Эльбрус, без специальных ускорителей. Одними из самых ресурсоемких задач в области технического зрения являются задачи обнаружения и классификации объектов на изображении. Для обнаружения объектов одним из популярных методов является метод Виолы-Джонса. Для решения задачи классификации как правило используются сверточные нейронные сети. На примере сетей VGG16 и VGG19 разработаны математические модели вычислений применительно к актуальным микропроцессорам ряда Эльбрус. С использованием разработанных моделей обоснована теоретическая достаточность производительность микропроцессоров Эльбрус для задач технического зрения. Также, на основе данных методов разработаны программы моделирования поиска и объектов на фото и в видеопотоке. Программы написаны на языке C++ с использованием библиотеки OpenCV, ОПО Эльбрус, библиотеки Платформы-ГНС и базы данных соревнований ImageNet. С использованием реализованных программ было проведено сравнительное тестирование на ряде ВК с процессорами Эльбрус, а также ВК с процессорами intel и ускорителем в виде видеокарты Nvidia. На основе полученных результатов показано, что для решения задачи поиска объектов на изображении выбранным методом достаточно МП Эльбрус-8С для входных разрешений до 1920 x 1080, где обеспечивается скорость обработки видеопотока более 20 кадров в секунду.*

*Техническое зрение; микропроцессоры эльбрус; сверточные нейронные сети; OpenCV.*

**К.А. Suminov, N.A. Bocharov**

**RESEARCH OF APPLICABILITY LIMITATIONS FOR ELBRUS  
MICROPROCESSORS FOR SOLVING TASKS OF TECHNICAL VISION**

*One of the key areas in the artificial intelligence is technical vision. For resource-intensive tasks of technical vision high-performance, computing systems are created with use of specialized accelerators. The use of such accelerators is necessary due to the inability of general-purpose microprocessors (GPM) to solve such problems in a given time due to a high computational load. However, the microprocessors of Elbrus series are successfully used to solve technical vision problems in both server and on-board modes, and the appearance of the sixth-generation Elbrus microprocessors should further improve performance on such tasks. Due to the high cost, greater complexity and limitations in the use of systems with specialized accelerators, the question arises of determining the conditions under which, it is sufficient to use CPU's to solve the tasks of technical vision, for example, with the microprocessors of the Elbrus series without special accelerators. One of the most resource-intensive tasks in the field of technical vision are detection and classification of objects. For the detection of objects one of the popular methods is the Viola-Jones method. Convolutional neural networks are usually used to solve the classification problem.*

*Mathematical models of computations have been developed for VGG16 and VGG19 neural networks in relation to the actual microprocessors of the Elbrus series. Using the developed models, the theoretical sufficiency of the performance of Elbrus microprocessors for technical vision tasks is substantiated. Also, based on these methods, programs for modeling detection and classification objects in the image and video stream have been developed. The programs are written in C++ using the OpenCV library, OPO Elbrus, the GNS Platform library and the ImageNet competition database. Using the implemented programs, comparative testing was carried out on a number of high-performance computing systems with Elbrus and Intel CPU's and NVidia video card. Based on the results obtained, it is shown that the Elbrus-8S is sufficient to solve the problem of searching for objects in the image for input resolutions up to 1920 x 1080, where the processing speed of the video stream is more than 20 frames per second.*

*Technical vision; elbrus microprocessors; convolutional neural networks; OpenCV.*

**Введение.** Задачи технического зрения в настоящее время являются важным направлением развития области искусственного интеллекта [1]. Создание новых поколений автономных робототехнических комплексов, систем распознавания и систем технического зрения в целом невозможно без использования современной вычислительной техники. При этом для решения подобного рода задач в настоящее время активно применяются и разрабатываются [2–4] вычислительные комплексы с использованием специализированных ускорителей. Тем не менее, граница применимости таких спец. ускорителей при проектировании вычислительных комплексов для решения подобных задач часто определяется эмпирически, в особенности для ВК на основе МП серии «Эльбрус» [5]. Т.к. в силу особенности архитектуры МП «Эльбрус» – Very Long Instruction Word (VLIW) – сложно и не всегда возможно оценить сложность и ресурсоемкость решения на базе имеющихся решений подобных задач, реализованных для систем с МП других архитектур.

Одним из важных и актуальных применением бортовых систем с МП серии «Эльбрус» являются бортовые вычислители и системы технического зрения. В ходе проведенных в АО МЦСТ работ показано, что вычислители на основе МП серии «Эльбрус» могут и успешно используются для решения задач технического зрения как в серверном [6] так и в бортовом [7] режиме. В 2017 году АО МЦСТ разработан и внедрен бортовой вычислитель на базе МП Эльбрус-4С, обеспечивающий достаточную производительность для автономного движения робота на скоростях до 40 км\ч. В работе [8] было обосновано, что для обеспечения корректной работы на такой скорости достаточным условием является работа системы технического зрения с производительностью не менее 10 кадров в секунду.

Появление новых МП серии Эльбрус, таких как Эльбрус-8СВ, Эльбрус-2С3 и Эльбрус-16С [9], а также средств вычислительной техники на их основе [10] открывает новые перспективы перед разработчиками робототехнических комплексов (РТК). Высокая производительность, обеспечиваемая новыми МП серии Эльбрус, позволит создавать бортовые вычислительные комплексы, способные решать задачи технического зрения на РТК, с использованием отечественной программно-аппаратной платформы.

Целью данной работы является исследование ограничений применимости МП ряда Эльбрус для решения задач технического зрения для определения структуры перспективных бортовых вычислительных комплексов.

**Особенности аппаратно-программной платформы «Эльбрус» для задач технического зрения.** Ключевые особенности МП серии «Эльбрус» - в том числе архитектура VLIW, предполагающая содержание нескольких операций в одной инструкции процессора, когда распараллеливание между множеством вычислительных блоков процессора происходит на этапе компиляции программы, большой парк вычислительных устройств (АЛУ) в составе процессоров «Эльбрус», большое количество операций - 25 в скалярном и 41 и векторном режимах [11] за такт

на одно ядро (Для Эльбрус-8С), за счет явного параллелизма микроопераций дают возможность поставить процессоры «Эльбрус» в ряд между процессорами общего назначения и специализированными процессорами, использующими SIMD инструкции. В совокупности с большой степенью параллельности многих задач, обеспечивающих функционирование систем технического зрения, это дает основание предполагать, что задачи подобного класса могут эффективно решаться и использованием современных МП серии «Эльбрус».

В табл. 1 представлены основные характеристики актуальных МП «Эльбрус» а также эквивалентных процессоров Intel.

Таблица 1

Основные характеристики рассматриваемых МП

Процессор	Эльбрус 8С	Эльбрус 8СВ	Эльбрус 16С	Эльбрус 2С3	intel Core i7-2600	intel Core i7-8565U	intel Core i7-8700	Intel Xeon silver 4110	Intel Xeon e5 2620 v4	NVidia GeForce GTX 960
Микроархитектура	elbrus – v4	elbrus - v5	elbrus – v6	elbrus – v6	Sandy-Bridge	Whiskey Lake	Coffee Lake	SkyLake	Broadwell	Maxwell
Частота (МГц)	1300	1500	2000	2000	3400-3800	1800-4600	3200-4600	2100-3000	2100-3000	1126-1178
Ядра	8	8	16	2	4	4	6	8	8	1024
Техпроцесс (нм)	28	28	16	16	32	14	14	14	14	28
TDP(Вт) не более	70	80	110	15	95	25	65	85	85	120
Тип ОЗУ	DDR3-1600	DDR4 - 2400	DDR4 -3200	DDR4-3200	DDR3 -1333	DDR4-2400	DDR4 2666	DDR4-2400	DDR4-2133	GDDR5-1752
Год выпуска	2016	2020	2022	2022	2011	2018	2018	2017	2016	2015

**Математическая модель вычислений задач технического зрения на платформе Эльбрус.** Системы технического зрения предназначены для решения задач получая информацию из изображений различного рода, в том числе и не графических. Задачи, для решения которых применяются системы технического зрения, включают в себя классификацию, кластеризацию, отслеживание, обнаружение, сегментацию и др. [12].

Для решения задач классификации и кластеризации объектов успешно применяются алгоритмы, основанные на использовании нейронных сетей [13]. Одним из примеров такой сети является fully connected сеть, где каждый нейрон следующего слоя соединен с каждым нейроном предыдущего слоя. В таких сетях успешно используются различные виды признаков, в том числе: бинарный, номинальный, порядковый, количественный и др. В реальных случаях возможно очень большое количество признаков для каждого объекта, и если среди них есть коррелирующие между собой признаки находящиеся в непосредственной зависимости, если не все они имеют ценность в конкретном случае и такие признаки могут быть исключены без существенной потери информации, то применяются методы понижения размерности пространства признаков для уменьшения вычислительной нагрузки. При работе с изображениями с задачей лучше справляются сверточные нейронные сети [14, 15], которые позволяют сильно сократить объем необходимых для работы параметров.

Работа сверточной нейронной сети обычно интерпретируется как переход от конкретных особенностей изображения к более абстрактным деталям, и далее к ещё более абстрактным деталям вплоть до выделения понятий высокого уровня.

При этом сеть самонастраивается и вырабатывает сама необходимую иерархию абстрактных признаков (последовательности карт признаков), фильтруя маловажные детали и выделяя существенные. Работа таких сетей основана на использовании операций свертки примененной к изображению. Используя различные ядра свертки формируется поиск различных признаков на изображении. Схема применения свертки приведена на рис. 1.

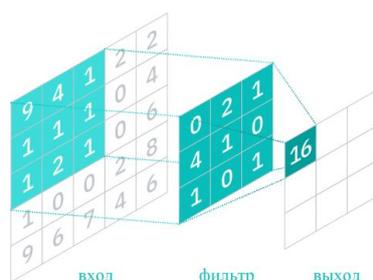


Рис. 1. Схема применения свертки к изображению

Из схемы видно, что для вычисления свертки основными операциями являются операции умножения и сложения, которые могут быть реализованы в виде совмещенных операций умножения-сложения. Также в архитектуре такой сети могут использоваться слои пуллинга, подвыборки, субдискретизации используемые для уменьшения размерности карты признаков. Пример работы max-pooling слоя представлен на рис. 2.

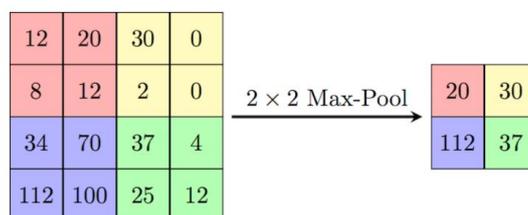


Рис. 2. Схема работы max-pooling слоя

Известными архитектурами сверточных нейронных сетей, дающими хороший результат top 5 accuracy (среди топ 5 результатов сети присутствует ожидаемый ответ) – более 92% на соревновании ImageNet [16] являются сети VGG16 и VGG19 [17]. Схематичное изображение слоев сети VGG19 представлено на рис. 3. Сеть использует изображения 224x224x3 на входе, оперирует с FP32 числами, имеет 19 слоев с весами и 5 pooling слоев. Первая часть сети (содержащая сверточные слои) используется для извлечения признаков с изображения, вторая часть, состоящая из последних 3 слоев представляет собой Fully Connected нейронную сеть для распознавания одного из классов, к которому принадлежит изображение. Архитектура VGG16 отличается от VGG19 отсутствием 8, 12 и 16 слоев.

Для теоретического обоснования времени выполнения вычислений на примере МП Эльбрус, разработана математическая модель вычислений, учитывающая количество операций, производимых при расчёте нейронной сети с архитектурой VGG16 и VGG19. В табл. 2 представлены необходимое количество параметров и их объем при выполнении вычислений сети указаны архитектуры, а также количество и тип необходимых операций для VGG19 и VGG16. Слои, помеченные (\*) не входят в VGG16.

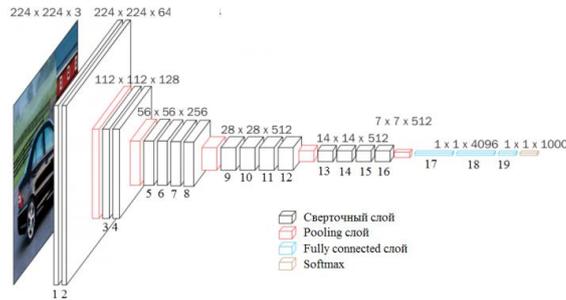


Рис. 3. Схема архитектуры VGG16

Таблица 2

Количество параметров, операций и их тип для слоев сети VGG19

номер слоя	слой	размерность входа			количество умножений в слое	количество сложений в слое	количество сравнений в слое	количество параметров в слое
		Ш	В	Г				
1	conv3-64	224	224	3	89915392	86704128	0	1792
2	conv3-64	224	224	64	1852899328	1849688064	0	36928
	pool2	224	224	64	0	0	2408448	0
3	conv3-128	112	112	64	926449664	924844032	0	73856
4	conv3-128	112	112	128	1851293696	1849688064	0	147584
	pool2	112	112	128	0	0	1204224	65664
5	conv3-256	56	56	128	925646848	924844032	0	295168
6	conv3-256	56	56	256	1850490880	1849688064	0	590080
7	conv3-256	56	56	256	1850490880	1849688064	0	590080
8(*)	conv3-256	56	56	256	1850490880	1849688064	0	590080
	pool2	56	56	256	0	0	602112	0
9	conv3-512	28	28	256	925245440	924844032	0	1180160
10	conv3-512	28	28	512	1850089472	1849688064	0	2359808
11	conv3-512	28	28	512	1850089472	1849688064	0	2359808
12(*)	conv3-512	28	28	512	1850089472	1849688064	0	2359808
	pool2	28	28	512	0	0	301056	0
13	conv3-512	14	14	512	462522368	462422016	0	2359808
14	conv3-512	14	14	512	462522368	462422016	0	2359808
15	conv3-512	14	14	512	462522368	462422016	0	2359808
16(*)	conv3-512	14	14	512	462522368	462422016	0	2359808
	pool2	14	14	512	0	0	75264	0
17	fc4096	1	1	25088	102760448	102760448	0	102764544
18	fc4096	1	1	4096	16777216	16777216	0	16781312
19	fc1000	1	1	4096	4096000	4096000	0	4097000
		Всего VGG19			19646914560	19632062464	4290048	143732904
		Всего VGG16			15483811840	15470264320	4591104	138423208

В табл. 3 представлены значения теоретического времени выполнения расчетов сетей (inference) при рассмотрении идеальной модели процессоров, в которой отсутствуют задержки по памяти, длительность вычислений ограничивается лишь скоростью работы и степенью конвейеризации (АЛУ) в составе. В действительности, с учетом не идеальности процессов вычисления и существующих потерь, учитывая размер кэш памяти, с использованием механизма предподкачки (prefetch) реализованного в «Эльбрусах» [18], механизма АРВ, а также при эффективной реализации умножения матриц блоками, использования схемы unroll and fuse и возможности АЛУ выполнять зацепленные операции умножения и сложения, скорость предподкачки достигает значения, обеспечивающего на ~90% эффективную загрузку АЛУ. Время выполнения  $T$  в этом случае можно посчитать как

$$T = \frac{(Nc+Nm+Ns)*R*k}{F*C*A*S},$$

где  $Nc$  – количество совмещенных операций,  $Nm$  и  $Ns$  – количество отдельных операций умножения и сложения соответственно,  $R$  – разрядность чисел,  $k$  – коэффициент эффективности,  $F$  – тактовая частота процессора,  $C$  – количество ядер,  $A$  – количество АЛУ включающих Float Point Unit (FPU),  $S$  – разрядность FPU. Теоретическое время выполнения представлено также в табл. 3.

Таблица 3

**Время выполнения вычислений для сетей VGG16 и VGG19 на МП Эльбрус**

	VGG16				VGG19			
количество совмещенных операций + *	15470264320				19632062464			
количество отдельных операций *	13547520				14852096			
количество отдельных операций +	0				0			
процессор	Эль-брус 8С	Эль-брус 8СВ	Эль-брус 16С	Эль-брус 2С3	Эль-брус 8С	Эль-брус 8СВ	Эль-брус 16С	Эль-брус 2С3
теоретическое время расчета прямого прохода сети (мс.)	137,9	59,7	22,4	179,2	174,9	75,8	28,4	227,4
теоретическое количество кадров в секунду	7,3	16,7	44,6	5,6	5,7	13,2	35,2	4,4

**Программная модель системы технического зрения на платформе «Эльбрус».** Т.к. большая часть задач технического зрения сводится к задачам обнаружения и классификации, то для исследования были выбраны именно эти задачи – для моделирования задачи обнаружения была разработана программа обнаружения объектов в видеопотоке методом Виолы-Джонса [19], для моделирования задачи классификации была разработана программа, реализующая вычисления нейронной сети с архитектурой VGG16. Также использованы модели других нейросетей, написанные с использованием «Платформы-ГНС» разработки ГосНИИАС, использующей оптимизированные для МП Эльбрус реализации некоторых нейронных сетей.

Для проведения эксперимента по решению задачи обнаружения объектов в видеопотоке была реализована программа на языке Си++ с использованием библиотеки OpenCV 3.2.0 оптимизированной для МП «Эльбрус-8С». Для проведения эксперимента по решению задачи классификации с помощью нейронной сети была реализована программа на языке программирования Си без внешних зависимостей для выполнения расчетов соответствующих нейронной сети с архитектурой VGG16. Использовались данные соревнования ImageNet, в том числе предобученные веса сети и база данных изображений. Для работы с реализациями нейронных сетей «Платформа-ГНС» также использовался язык программирования Си совместно с библиотекой разработанной ГосНИИАС. Результаты времени вычислений для реализации нейронной сети VGG16 представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Время выполнения вычислений на Эльбрус 8С для различных нейронных сетей с использованием «платформы» ГосНИИАС**

Архитектура сети	AlexNet	LeNet	ResNet18	ResNet34	ResNet50	VGG19	MobileNetV1
Время выполнения (мс.)	25,1	12,3	40,6	259,2	316,1	266,7	40,6
Кадров в секунду	39,8	81,3	24,6	3,9	3,2	3,7	24,6

Для проведения эксперимента с обнаружением был выбран один видеоряд со следующими разрешениями: 424 x 240, 640 x 360, 854 x 480, 1280 x 720, 1920 x 1080, 2560 x 1440, 3840 x 2160. В качестве входных данных для нейронных сетей были взяты изображения из базы данных ImageNet с разрешением 224x224x3.

В качестве испытательных стендов были выбраны различные процессоры семейства Эльбрус, в том числе 2, 8 и 16 ядерный, а также МП Intel core i7 2600k, серверные МП Intel Xeon 4110 и Xeon e5 2620, выпуска 2016-2017 года, 8 ядерные, 16 поточные и мобильный процессор Intel core i7-8565U производства 2018 года. В качестве спец. ускорителя была использована видеокарта NVidia GeForce GTX 960 совместно с МП Intel core i7 2600k. Результаты с временем выполнения для задачи обнаружения в видеопотоке представлены на рис. 4.

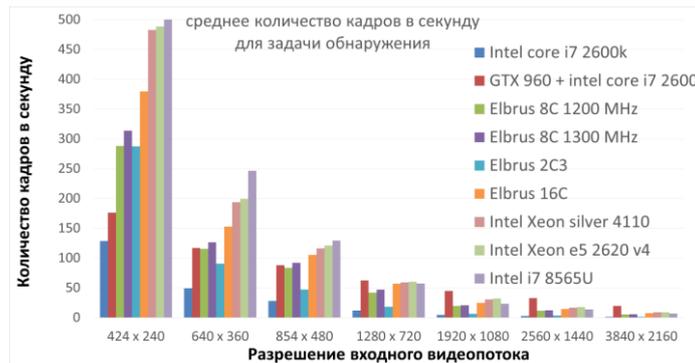


Рис. 4. Количество кадров в секунду при решении задачи обнаружения

Из полученных данных видно, что все протестированные процессоры семейства Эльбрус стабильно превосходят Intel core i7 2600k, в том числе 2х ядерный Эльбрус-2С3. Из результатов видно, что на малых разрешениях использование совместно с процессором ускорителя в виде видеокарты не только не дает выиг-

рыша по времени, но и обеспечивает худшие результаты в отличии от использования только процессора, что связано с особенностью распределенных вычислений с использованием спецускорителей, а именно с длительной и частой пересылкой маленьких для расчёта объемов данных между процессором и ускорителем. Однако, стоит заметить, что в ходе исследования использовалась относительно слабая видеокарта и при использовании современных спецускорителей типа Модуль [20], Элвис [21], Nvidia, разница в результатах будет отличаться. Также в ходе эксперимента установлено, что Эльбрус-8С превосходит вычислитель на основе intel core i7 2600k совместно с видеокартой gtx 960 на разрешениях вплоть до 854x480, а на разрешении 1280x720 Эльбрус-8С показал результат до 47 кадров в секунду, при этом Эльбрус-2С3 обеспечивает до 18, а Эльбрус-16С до 57 кадров в секунду в то время как Intel core i7 2600 – всего около 11 кадров, а совместно с видеокартой – 62 кадра в секунду. Эльбрус-16С показал сравнимый с серверными процессорами Intel Xeon результат на больших разрешениях входного видеопотока, а Эльбрус-8С показал отставание от них на около 10-30% при вдвое меньшем количестве потоков.

**Выводы.** В ходе данного исследования разработаны математические модели вычислений сверточных нейронных сетей с архитектурой VGG16 и VGG19, получено теоретическое обоснование минимального времени выполнения расчетов на процессорах Эльбрус 2С3, 8С, 8СВ и 16С. Разработаны программные модели для решения задачи поиска объектов в видеопотоке с использованием OpenCV и для решения задач классификации с использованием ПО «Платформа-ГНС». Проведены эксперименты по обнаружению объектов в видеопотоке с различным разрешением, а также по классификации изображений с разрешением 224x224x3. Результаты, полученные в ходе экспериментов согласуются с теоретическими результатами, основанными на разработанной математической модели.

В результате проведенных экспериментов показано, что использование микропроцессоров Эльбрус 2С3, 8С, 8СВ и 16С без дополнительных ускорителей обеспечивает достаточную производительность для использования в бортовых вычислителях и системах технического зрения автономных роботов вплоть до разрешения 2560 x 1440, где обеспечивается частота обработки до 14–15 кадров в секунду.

Были продемонстрированы результаты и потенциал МП «Эльбрус» для решения задач технического зрения, что позволило согласовать требования к вычислителям перспективных автономных роботов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Есенбаева Г.Б.* Техническое зрение для мобильных роботов // Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство. – 2019. – С. 73-75.
2. *Gondimalla A. [et al.].* Sparten: A sparse tensor accelerator for convolutional neural networks // Proceedings of the 52nd Annual IEEE/ACM International Symposium on Microarchitecture. – 2019. – P. 151-165.
3. *Deng L. [et al.].* Model compression and hardware acceleration for neural networks: A comprehensive survey // Proceedings of the IEEE. – 2020. – Vol. 108, No. 4. – P. 485-532.
4. *Auten A., Tomei M., Kumar R.* Hardware acceleration of graph neural networks // 2020 57th ACM/IEEE Design Automation Conference (DAC). – IEEE, 2020. – P. 1-6.
5. *Ким А.К. [и др.].* Микропроцессоры и вычислительные комплексы семейства "Эльбрус". – СПб.: Издательский дом "Питер", 2013.
6. *Лимонова Е.Е. [и др.].* Оценка быстродействия системы распознавания на VLIW архитектуре на примере платформы Эльбрус // Программирование. – 2019. – № 1. – С. 15-21.
7. *Бочаров Н.А., Зувев 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.

8. Бочаров Н.А. и др. Производительность вычислительной техники с процессором «Эльбрус-8С» на задачах робототехнического комплекса // *Наноиндустрия*. – 2018. – № 82. – С. 79.
9. Кожин А.С. Основные проектные решения для процессора «Эльбрус-16С» // *Наноиндустрия*. – 2020. – Т. 13, № S4. – С. 74-75.
10. Бычков И.Н., Лобанов И.Н., Молчанов И.А. Вычислительная техника на основе аппаратно-программной платформы «Эльбрус» для перспективных информационных систем // *Приборы*. – 2018. – №. 8. – С. 14.
11. Кожин А.С., Нейман-заде М.И., Тихорский В.В. Влияние подсистемы памяти восьмиядерного микропроцессора «Эльбрус-8С» на его производительность // *Вопросы радиоэлектроники*. – 2019. – №. 3. – С. 13-21.
12. Визильтер Ю.В. и др. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения. – 2010.
13. Визильтер Ю.В., Горбачевич В.С., Желтов С.Ю. Структурно-функциональный анализ и синтез глубоких конволюционных нейронных сетей // *Компьютерная оптика*. – 2019. – Т. 43, № 5. – С. 886-900.
14. Albawi S., Mohammed T.A., Al-Zawi S. Understanding of a convolutional neural network // 2017 international conference on engineering and technology (ICET). – Ieee, 2017. – P. 1-6.
15. O'Shea K., Nash R. An introduction to convolutional neural networks // *arXiv preprint arXiv:1511.08458*. – 2015.
16. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E. Imagenet classification with deep convolutional neural networks // *Advances in neural information processing systems*. – 2012. – Vol. 25.
17. Simonyan K., Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition // *arXiv preprint arXiv: 1409.1556*. – 2014.
18. Нейман-заде М.И., Королёв С.Д. Руководство по эффективному программированию на платформе "Эльбрус". – М.: АО «МЦСТ, 2020.
19. Viola P. [et al.]. Robust real-time object detection // *International journal of computer vision*. – 2001. – Vol. 4, No. 34-47. – P. 4.
20. Бирюков А.А., Таранин М.В., Таранин С.В. Процессор 1879ВМ6Я. Реализация глубоких свёрточных нейронных сетей // *DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов*. – 2018. – Т. 8, №. 4. – С. 191-195.
21. Петричкович Я. и др. RoboDeus-50-ядерная гетерогенная СнК для встраиваемых систем и робототехники // *Электроника: Наука, технология, бизнес*. – 2020. – № 7. – С. 52-63.

## REFERENCES

1. Esenbaeva G.B. Tekhnicheskoe zrenie dlya mobil'nykh robotov [Technical vision for mobile robots], *Peredovye innovatsionnye razrabotki. Perspektivy i opyt ispol'zovaniya, problemy vnedreniya v proizvodstvo* [Advanced innovative developments. Prospects and experience of use, problems of introduction into production], 2019, pp. 73-75.
2. Gondimalla A. [et al.]. Sparten: A sparse tensor accelerator for convolutional neural networks, *Proceedings of the 52nd Annual IEEE/ACM International Symposium on Microarchitecture*, 2019, pp. 151-165.
3. Deng L. [et al.]. Model compression and hardware acceleration for neural networks: A comprehensive survey, *Proceedings of the IEEE*, 2020, Vol. 108, No. 4, pp. 485-532.
4. Auten A., Tomei M., Kumar R. Hardware acceleration of graph neural networks, *2020 57th ACM/IEEE Design Automation Conference (DAC)*. IEEE, 2020, pp. 1-6.
5. Kim A.K. [i dr.]. Mikroprotssory i vychislitel'nye komplekсы semeystva " El'brus" [Microprocessors and computing complexes of the Elbrus family]. Saint Petersburg: Izdatel'skiy dom " Piter", 2013.
6. Limonova E.E. [i dr.]. Otsenka bystrodeystviya sistemy raspoznavaniya na VLIW arkhitekture na primere platformy El'brus [Evaluation of the performance of the recognition system on the VLIW architecture on the example of the Elbrus platform], *Programmirovaniye* [Programming], 2019, No. 1, pp. 15-21.
7. Bocharov N.A., Zuev A.G., Slavin O.A. Proizvoditel'nost' mikroprotssora 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.

8. *Bocharov N.A. i dr.* Proizvoditel'nost' vychislitel'noy tekhniki s protsessorom «El'brus-8S» na zadachakh robototekhnicheskogo kompleksa [The performance of computing equipment with the Elbrus-8C processor on the tasks of the robotic complex], *Nanoindustriya* [Nanoindustry], 2018, No. 82, pp. 79.
9. *Kozhin A.S.* Osnovnye proektnye resheniya dlya protsessora «El'brus-16S» [Basic design solutions for the processor "Elbrus-16S"], *Nanoindustriya* [Nanoindustry], 2020, Vol. 13, No. S4, pp. 74-75.
10. *Bychkov I.N., Lobanov I.N., Molchanov I.A.* Vychislitel'naya tekhnika na osnove apparatno-programmnoy platformy «El'brus» dlya perspektivnykh informatsionnykh sistem [Computer technology based on the hardware and software platform "Elbrus" for advanced information systems], *Pribory* [Devices], 2018, No. 8, pp. 14.
11. *Kozhin A.S., Neyman-zade M.I., Tikhorskiy V.V.* Vliyanie podsistemy pamyati vos'miyadernogo mikroprotsessora «El'brus-8S» na ego proizvoditel'nost' [The influence of the memory subsystem of the eight-core microprocessor "Elbrus-8S" on its performance], *Voprosy radioelektroniki* [Questions of radio electronics], 2019, No. 3, pp. 13-21.
12. *Vizil'ter Yu.V. i dr.* Obrabotka i analiz izobrazheniy v zadachakh mashinnogo zreniya [Image processing and analysis in machine vision tasks], 2010.
13. *Vizil'ter Yu.V., Gorbatshevich V.S., Zheltov S.Yu.* Strukturno-funktsional'nyy analiz i sintez glubokikh konvolutsionnykh neyronnykh setey [Structural and functional analysis and synthesis of deep convolution neural networks], *Komp'yuternaya optika* [Computer optics], 2019, Vol. 43, No. 5, pp. 886-900.
14. *Albawi S., Mohammed T.A., Al-Zawi S.* Understanding of a convolutional neural network, *2017 international conference on engineering and technology (ICET)*. Ieee, 2017, pp. 1-6.
15. *O'Shea K., Nash R.* An introduction to convolutional neural networks, *arXiv preprint arXiv:1511.08458*, 2015.
16. *Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E.* Imagenet classification with deep convolutional neural networks, *Advances in neural information processing systems*, 2012, Vol. 25.
17. *Simonyan K., Zisserman A.* Very deep convolutional networks for large-scale image recognition, *arXiv preprint arXiv: 1409.1556*, 2014.
18. *Neyman-zade M.I., Korolev S.D.* Rukovodstvo po effektivnomu programmirovaniyu na platforme "El'brus" [Guide to effective programming on the Elbrus platform]. Moscow: AO «MTSST», 2020.
19. *Viola P. [et al.]*. Robust real-time object detection, *International journal of computer vision*, 2001, Vol. 4, No. 34-47, pp. 4.
20. *Biryukov A.A., Taranin M.V., Taranin S.V.* Protsessor 1879VM6YA. Realizatsiya glubokikh svertochnykh neyronnykh setey [Processor 1879VM6YA. Implementation of deep convolutional neural networks], *DSPA: Voprosy primeneniya tsifrovoy obrabotki signalov* [DSPA: Issues of application of digital signal processing], 2018, Vol. 8, No. 4, pp. 191-195.
21. *Petrichkovich Ya. i dr.* RoboDeus-50-yadernaya geterogennaya SnK dlya vstraivaemykh sistem i robototekhniki [RoboDeus-50-nuclear heterogeneous SnC for embedded systems and robotics], *Elektronika: Nauka, tekhnologiya, biznes* [Electronics: Science, Technology, Business], 2020, No. 7, pp. 52-63.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.Б. Парамонов.

**Суминов Константин Александрович** – ПАО «ИНЭУМ им. И.С. Брука»; г. Москва, Россия; e-mail: suminov.ka@phystech.edu; тел.: +79263563020; инженер-программист.

**Бочаров Никита Алексеевич** – e-mail: bocharov.na@phystech.edu; тел.: +79167346437; к.т.н.; начальник отдела.

**Suminov Konstantin Alexandrovich** – PJSC «Brook INEUM»; e-mail: suminov.ka@phystech.edu; Moscow, Russia; phone: +79263563020; software engineer.

**Bocharov Nikita Alexeevich** – e-mail: bocharov.na@phystech.edu; phone: +79167346437; cand. of eng. sc.; chief of department.

**А.Е. Щелкунов, В.В. Ковалев, И.В. Сидько, Н.Е. Сергеев**

**УСКОРЕНИЕ ПРЯМОГО ПРОХОДА ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ СНС  
НА ОГРАНИЧЕННОМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОМ РЕСУРСЕ**

*Работа посвящена оптимизации архитектуры нейронной сети для ее запуска на ограниченном вычислительном ресурсе. Рассмотрено несколько подходов оптимизации, приведены оценки сложности и времени выполнения прямого прохода нейронной сети. Приведены сравнительные оценки сложности сети при применении разных подходов оптимизации. В работе представлен анализ выбранной архитектуры сети, получены оценки вычислительной сложности отдельных составных частей (модулей) архитектуры. Произведен анализ возможных методов оптимизации каждого модуля. Описаны параметры рассмотренных модулей, размеры входных и выходных тензоров. Для оптимизации модуля выделения признаков протестировано несколько архитектур, ResNet 50, ResNet 18, MobileNet v3 small, MobileNet v3 large. Представлен сравнительный анализ вычислительной сложности и времени выполнения прямого прохода для каждой архитектуры. Замеры времени выполнения прямого прохода осуществлялись на встраиваемом вычислительном устройстве Jetson AGX Xavier от компании Nvidia. Представлены оценки времени выполнения прямого прохода для каждого модуля рассматриваемых нейронных сетей. В работе приведены результаты сравнения оценок точности нейронной сети до и после оптимизации архитектуры. Набор данных для тестирования состоит из 100 видео записей. В тестовых видеозаписях участвует 5 различных типовых объектов, для каждого класса объекта записано 10 различных сценариев. Для каждой из разработанных архитектур получены оценки точности, произведен сравнительный анализ. В работе намечены пути для последующей оптимизации архитектуры сети.*

*Оптимизация выполнения прямого прохода сверточной нейронной сети; трекинг.*

**A.E. Shchelkunov, V.V. Kovalev, I.V. Sidko, N.E. Sergeev**

**ACCELERATION OF THE DIRECT PASSAGE IN THE IMPLEMENTATION  
OF CNN ON A LIMITED COMPUTING RESOURCE**

*The work is devoted to the optimization of the neural network architecture for its launch on a limited computing resource. Several optimization approaches are considered, estimates of the complexity and execution time of the forward pass of the neural network are given. Comparative estimates of the complexity of the network using different optimization approaches are given. The paper presents an analysis of the selected network architecture, and estimates of the computational complexity of individual components (modules) of the architecture are obtained. An analysis of possible optimization methods for each module was made. The parameters of the considered modules, the sizes of the input and output tensors are described. Several architectures were tested to optimize the feature extraction module, ResNet 50, ResNet 18, MobileNet v3 small, MobileNet v3 large. A comparative analysis of the computational complexity and execution time of the forward pass for each architecture is presented. Forward pass times were measured on Nvidia's Jetson AGX Xavier embedded computing device. Estimates of the execution time of the direct pass for each module of the considered neural networks are presented. The paper presents the results of comparing neural network accuracy estimates before and after architecture optimization. The test data set consists of 100 video recordings. 5 different typical objects are involved in test videos, 10 different scenarios are recorded for each object class. For each of the developed architectures, accuracy estimates were obtained, and a comparative analysis was made.*

*Optimization of the execution of the direct pass of the CNN; tracking.*

**Введение.** Решение задач с применением алгоритмов на основе методов глубокого машинного обучения необходимо при построении многих систем видео аналитики, во многих сферах жизнедеятельности человека. В настоящее время проходит большое количество международных соревнований, в которых разработ-

тики и исследователи соревнуются в точности и устойчивости разработанных ими алгоритмов. Самым популярным международным соревнованием является Visual Object Tracking Challenge (VOT) [1]. Одним из недостатков, применяемых в таких соревнованиях методов оценки алгоритмов является то, что в них не учитывается вычислительная сложность и время обработки кадра. В случае применения алгоритмов на основе методов глубокого машинного обучения во встраиваемых системах, из-за большой вычислительной сложности или неоптимальности некоторых математических операций, использование данных алгоритмов становится затруднительным или невозможным. Для устранения этих недостатков в статье представлены методы оптимизации алгоритма Dimp [2], который на протяжении нескольких лет был призером соревнований VOT [3, 4]

**Оптимизация архитектуры.** Реализация перспективных алгоритмов обработки данных во встраиваемых ЭВМ встречает ряд трудностей, обусловленных ограничениями, накладываемыми на состав аппаратных ресурсов, энергопотребление и массогабаритные характеристики. Для преодоления указанных трудностей, в настоящее время активно развиваются методы оптимизации нейросетевых алгоритмов обработки данных на различных аппаратных ресурсах.

Применяемые в настоящем способы оптимизации нейросетевой обработки данных условно могут быть разделены на 3 группы, представленные в табл. 1.

Таблица 1

**Пути оптимизации нейросетевых алгоритмов**

Математические	Определение базиса операций и поиск архитектуры (NAS)	Прореживание нейронных связей и нейронов (Pruning)	Декомпозиция слоёв (Low Rank Approximation)
Алгоритмические	Объединение нескольких слоёв СНС в один (Layer Fusion)	Быстрые алгоритмы вычисления множественных операций	Совместное использование весов. (Weights Sharing)
Программные	Квантование нейросети и переход к вычислениям в пониженной точности	Параллельные вычисления однотипных операций на доступных аппаратных ресурсах	Организация оптимального конвейера загрузки, обработки и выгрузки

В данной работе проработаны методы декомпозиции слоёв и архитектурный поиск NAS. На первом этапе оптимизации архитектура экстрактора признаков была заменяется с ResNet-18 на MobileNet v3. На втором этапе производится анализ наиболее вычислительно сложных слоёв остальных частей алгоритма и производится оптимизации этих слоёв путем замены вычислительно ёмких операций на их аппроксимированные аналоги. В перспективе планируется исследовать влияние на качество программных методов оптимизации.

**Анализ архитектуры сети.** Архитектура СНС представлена на рис. 1 [2].

Архитектура сети состоит из следующих блоков:

- ◆ Выделение признаков из исходного изображения или изображений (Feature extractor);
- ◆ Обучение прогностической модели объекта (Model Predictor);
- ◆ Модуль классификации (Conv 2d);
- ◆ Модуль определения размеров объекта (Optimize boxes).

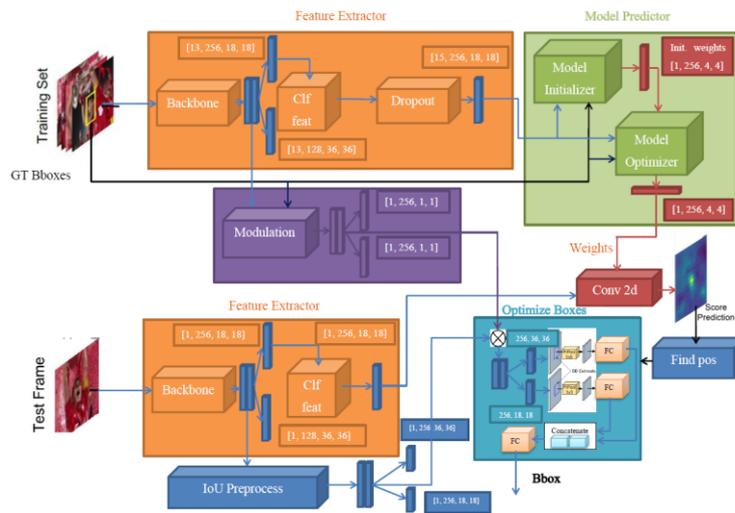


Рис. 1. Архитектура сети

Обучение или дообучение, модели выделения и сопоставления признаков объекта осуществляется в блоках: Feature extractor и Model Predictor. Реализация механизмов предсказания текущего местоположения объекта интереса осуществляется в блоках: Feature extractor, классификации и блоке определения размеров объекта.

**Оптимизация архитектуры блоков для уменьшения вычислительной сложности.** Для оптимизации блока Feature extractor были опробованы архитектуры ResNet 50, ResNet 18, MobileNet v3 large и small. Для остальных блоков применялся подход декомпозиции слоев. Блок Optimize boxes не подвергался оптимизации. Основная вычислительная сложность рассматриваемых блоков приходится на Residual блоки [4]. Из этого следует, что для оптимизации вычислительной сложности, в первую очередь необходимо оптимизировать трехмерную операцию сверки.

Для оптимизации сверточных слоев можно применить несколько подходов:

- ◆ Замена сверточного слоя на Depth Wise [5] свертку;
- ◆ Изменение количества каналов во входном тензоре;
- ◆ Изменение размеров ядра фильтра;
- ◆ Декомпозиция слоёв (применение BottleNeck блока).

В табл. 2 приведены оценки вычислительной сложности блока «Clf Feat» при различных размерах входных данных и количества каналов в функции свертки.

Таблица 2

**Вычислительная сложность блока «Clf Feat»**

Вх. кол. каналов	Вх. тензор	Батч	Ядро фильтра	Выходное кол. каналов	groups	Вычислительная сложность [GFlops]
256	18, 18	13	3x3	256	1	3.7297
256	18, 18	13	3x3	256	256	2.4924
128	18, 18	13	3x3	128	1	0.9332
128	18, 18	13	3x3	128	128	0.6251
64	18, 18	13	3x3	64	1	0.2337
64	18, 18	13	3x3	64	64	0.1573

Как видно из таблицы применение Depth Wise [5] свертки позволяет уменьшить вычислительную сложность. Изменение количества каналов приводит к большему уменьшению. Однако, стоит отметить, что уменьшение количества каналов может привести к существенному снижению оценок точности и устойчивости всей исследуемой модели.

Другим способом оптимизации является декомпозиция слоя (рис. 2,а) путем применения Bottle Neck блока (рис. 2,б). На рис. 2 представлены два блока, слева Residual Block справа Bottle Neck блок.

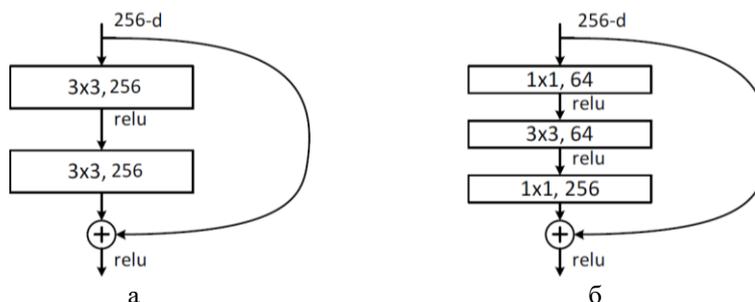


Рис. 2. Сравнение Residual блока и Bottle Neck блока

Архитектура рассматриваемого блока состоит из Residual блока [4] показали, что для оптимизации такого блока можно использовать Bottle Neck блок, архитектура которого показана на рис. 2. На основе этих данных предлагается использовать модифицированную архитектуру блока «Clf Feat». Применение данной архитектуры позволяет сократить вычислительную сложность до 0.2981 [GFlops], без изменения размеров входных и выходных данных. Вышеописанный подход применялся ко всем Residual блокам. В табл. 3 представлены данные вычислительной сложности рассматриваемых архитектур.

Таблица 3

**Вычислительная сложность алгоритмов различных модификаций алгоритма «Dimp»**

Архитектура / этап обработки	Вычислительная сложность [GFlops]				
	DIMP 50	PrDimp 18	PrDimp mobilenet v3 large	PrDimp mobilenet v3 large опт.	PrDimp mobileNet v3 small опт.
Инициализация	68.13	23.12	10.51	3.63	1.74
Обнаружение	10.92	2.33	1.36	0.44	0.4
Дообучение	1.73	0.15	0.15	0.075	0.075
Доопределение размеров объекта	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
Суммарная сложность	80.78	25.6	12.02	4.21	2.215

В табл. 4 представлены оценки времени выполнения рассматриваемых архитектур сети.

Таблица 4

## Время выполнения прямого прохода

Архитектура / этап обработки	Время выполнения [мс]				
	DIMP 50	PrDimp 18	PrDimp mobilenet v3 large	PrDimp mobilenet v3 large опт.	PrDimp mobileNet v3 small опт.
Выделение признаков (Feature extractor)	27.24	22.96	15.36	12.18	10.71
Определение центра объекта	25.71	20.34	12.84	5.78	5.73
Доопределение размеров объекта	15.37	15.28	15.12	15.12	15.12
Суммарное время	68.32	58.58	43.82	33.08	31.56

В табл. 3 и 4 представлены архитектуры:

DIMP 50 – исходная архитектура с backbone ResNet 50;

PrDimp 18 – архитектура с backbone ResNet 18;

PrDimp mobilenet v3 large – архитектура с замененным backbone с ResNet на MobileNet v3;

PrDimp mobilenet v3 large и small опт. – архитектура с замененным backbone с ResNet на MobileNet v3 и проведенной декомпозицией слоев.

Как видно из табл. 4 время выполнения прямого прохода блока уточнения размеров объекта вносит самый значительный вклад в общее время выполнения прямого прохода. Это связано с тем, что в данном блоке итеративно (10 раз) уточняются размеры объекта путем их корректировки за счет обратного распространения ошибки. Для уменьшения времени выполнения данного блока в дальнейшем планируется заменить его на другой, не итеративный метод.

**Тестирование алгоритмов.** Для оценки точности использовался тестовый набор данных, сгенерированный в 3D симуляторе. Набор данных состоит из 100 видео записей. В тестовых видеозаписях участвует 5 различных типовых объектов, для каждого класса объекта записано 10 различных сценариев:

- ◆ ускорение;
- ◆ замедление;
- ◆ остановка за препятствием;
- ◆ остановка;
- ◆ смена ракурса;
- ◆ смена направления;
- ◆ перекрытие другими классами;
- ◆ перекрытие другими классами;
- ◆ перекрытие аналогичным классом;

На рис. 3 представлен график оценки точности-устойчивости тестируемых алгоритмов [8].

На рис. 3 DIMP 50 – исходная архитектура с backbone ResNet 50, PrDimp 18 – архитектура с backbone ResNet 18, PrDimpMb – архитектура с замененным backbone с ResNet на MobileNet v3, PrDimpMbCut. – архитектура с замененным backbone с ResNet на MobileNet v3 large и проведенной декомпозицией слоев, PrDimpMbCut2 – архитектура с замененным backbone с ResNet на MobileNet v3

small и проведенной декомпозицией слоев. Из рисунка можно сделать вывод, что примененные методы оптимизации привели к снижению оценок точности и устойчивости. Архитектура DIMP 50 обладает наилучшими оценками устойчивости, а архитектура PrDimp18 лучшими оценками точности. При этом оценки точности и устойчивости версий архитектур с backbone MobileNet v3 large с декомпозицией и без нее существенно не снизились относительно архитектуры DIMP 50. Из этого следует, что оптимальной архитектурой по критерию соотношения оценок точности устойчивости к времени выполнения является архитектура с backbone MobileNet v3 large и примененной декомпозицией.

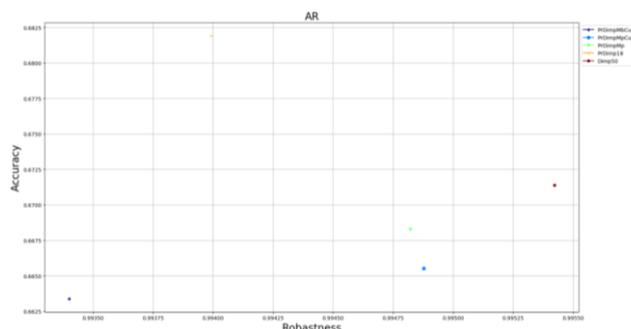


Рис. 3. Оценки точности-устойчивости

В табл. 5 представлены оценки тестируемых алгоритмов.

Таблица 5

Оценки тестируемых алгоритмов

Алгоритм / Метрика	$\sigma_{IoU}$	$M_{IoU}$	$\frac{\sigma_{Cerror}}{\overline{\sigma_{Cerror}}}$	$\frac{M_{Cerror}}{\overline{M_{Cerror}}}$	FP-Частота ложных обнаружений при видимости объекта меньше 50%	FN-Частота срывов
PrDimp mobilenet v3 large	0.159	0.704	4.687, 0.155	4.747, 0.179	0.641	0.005
PrDimp mobilenet v3 large опт.	0.164	0.707	4.696, 0.154	4.795, 0.180	0.737	0.005
PrDimp18	0.163	0.726	4.984, 0.160	4.702, 0.178	0.653	0.006
Dimp50	0.151	0.712	4.419, 0.150	4.525, 0.171	0.504	0.005
PrDimp mobilenet v3 small опт.	0.161	0.708	4.970, 0.171	4.927, 0.186	0.255	0.007

В табл. 5: Dimp50 – полная архитектура с backbone ResNet 50, PrDimp18 – полная архитектура с backbone ResNet 18, PrDimpMr – полная архитектура с backbone MobileNet v3 [5], PrDimpMrCut – оптимизированная архитектура с backbone MobileNet v3. В таблице представлены оценки СКО и МО коэффициента Жаккара,

СКО и МО ошибки определения центра, FP и FN [8]. Из полученных результатов можно сделать вывод, что примененные методы оптимизации не привели к существенному снижению оценок точности.

**Заключение.** Оптимизация архитектуры сети под встраиваемую платформу является важной частью в разработке системы с применением нейросетевых алгоритмов. Современные разработки в области архитектур нейронных сетей часто опираются только на метрики точности, что усложняет применение разработанных архитектур на встраиваемых платформах с ограниченным вычислительным ресурсом. В работе представлены методы позволяющие оптимизировать архитектуру сети, с целью ее запуска на системе на модуле в условиях профиля ограниченного энергопотребления. Полученные оценки точности позволяют говорить, что оптимизация существенно не повлияла на точность и устойчивость сети. Представленные методы оптимизации позволили сократить вычислительную сложность сети и время выполнения прямого прохода, однако, время выполнения блока уточнения размеров объекта не изменилось. Для дальнейшей оптимизации архитектуры предполагается заменить этот блок. В качестве альтернативы рассматриваются подход, описанный в статье [7]. Также предполагается применить методы оптимизации, основанные на квантовании нейросети и переход к вычислениям с ограниченной точностью. В результате оптимизации время прямого прохода сократилось с 68.32 до 31.56 [мс], вычислительная сложность снизилась с 80.78 до 2.21 [GFlops]. Исходя из всех полученных оценок, для дальнейшей доработки была выбрана архитектура с backbone MobileNet v3 large и примененной декомпозицией.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. <https://www.votchallenge.net/vot2021/>.
2. *Bhat G., Danelljan M., Luc Van Gool Radu Timofte.* Learning Discriminative Model Prediction for Tracking // IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). – 2019.
3. *Kristan M., Matas J., Leonardis A., et. all.* The Ninth Visual Object Tracking VOT2021 Challenge Results. VOT2021 challenge workshop, ICCV workshops, 2021.
4. *Kristan M., Matas J., Leonardis A., et. all.* The Eighth Visual Object Tracking VOT2020 Challenge Results. ECCV2020 workshops, 2020.
5. *Howard et al A.* Searching for MobileNetV3 // 2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). – 2019. – P. 1314-1324. – DOI: 10.1109/ICCV.2019.00140.
6. *Jiang B., Luo R., Mao J., Xiao T.* Acquisition of Localization Confidence for Accurate Object Detection. ECCV 2018.
7. *Bhat G., Danelljan M., Khan F.* IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2019.
8. *Щелкунов А.Е., Ковалев В.В., Морев К.И., Сидько И.В.* Метрики оценки алгоритмов автоматического сопровождения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 1. – С. 233-245.
9. *Kasturi R., Goldgof D., Soundararajan P., Manohar V., Garofolo J., Bowers R., Boonstra M., Korzhova V., Zhang J.* Framework for performance evaluation of face, text, and vehicle detection and tracking in video: data, metrics, and protocol // TPAMI. – 2009. – Vol. 31, No. 2. – С. 319-326.
10. *Vencel E.S., Ovcharov L.A.* Probability theory and its engineering applications. Handbook for universities. – 2-nd. – М.: High school, 2000. – 480 p.
11. *Nawaz T., Cavallaro A.* A protocol for evaluating video trackers under real-world conditions // Image Processing IEEE. – 2013. – Vol. 22, No. 4. – P. 1354-1361
12. *Yang M., Wu Y., Hua G.* Context-aware visual tracking // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 2006. – No. 31. – P. 1195-1209.
13. *Stauffer C., Grimson W.* Learning patterns of activity using real-time tracking // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2000. – P. 747-757.
14. *Sundaresan A., Chellappa R.* Multi-camera tracking of articulated human motion using shape and motion cues // IEEE Transactions on Image Processing. – 2009. – P. 2114-2126.

15. *Henriques F., Caseiro R., Martins P., Batista J.* High-Speed Tracking with Kernelized Correlation Filters // *TPAMI*. – 2014. – Vol. 42, No. 5. – P. 345-362.
16. *Frey J. Dueck D.* Clustering by Passing Messages Between Data Points // *Science Today*. – 2007. – Vol. 315. – P. 972-976.
17. *Smith K., Gatica-Perez D., Odobez J.* Evaluating Multi-Object Tracking // *CVPR Work.* – IEEE, 2005. – Vol. 3. – P. 32-36.
18. *Black J., Ellis T., Rosin P.* A novel method for video tracking performance evaluation // *VS-PETS*. – 2003. – P. 125-132.
19. *Kao E., Daggett M., Hurley M.* An information theoretic approach for tracker performance evaluation // *CVPR*. – 2009. – P. 1523-1529.
20. *Bashir F. Porikli F.* Performance Evaluation of Object Detection and Tracking Systems // *PETS*. – 2006. – P. 190-203.
21. *Checka N., Wilson K., Rangarajan V., Darrell T.* A probabilistic framework for multi-modal multi-person tracking // *Proceedings of the IEEE Workshop on Multi-Object Tracking (WOMOT '03)*. – 2003. – P. 203-212.

## REFERENCES

1. Available at: <https://www.votchallenge.net/vot2021/>.
2. *Bhat G., Danelljan M., Luc Van Gool Radu Timofte.* Learning Discriminative Model Prediction for Tracking, *IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2019.
3. *Kristan M., Matas J., Leonardis A., et. all.* The Ninth Visual Object Tracking VOT2021 Challenge Results. VOT2021 challenge workshop, ICCV workshops, 2021.
4. *Kristan M., Matas J., Leonardis A., et. all.* The Eighth Visual Object Tracking VOT2020 Challenge Results. ECCV2020 workshops, 2020.
5. *Howard et al A.* Searching for MobileNetV3, *2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2019, pp. 1314-1324. DOI: 10.1109/ICCV.2019.00140.
6. *Jiang B., Luo R., Mao J., Xiao T.* Acquisition of Localization Confidence for Accurate Object Detection. *ECCV 2018*.
7. *Bhat G., Danelljan M., Khan F.* IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2019.
8. *Shchelkunov A.E., Kovalev V.V., Morev K.I., Sid'ko I.V.* Metriki otsenki algoritmov avtomaticheskogo soprovozhdeniya [Metrics for evaluating automatic tracking algorithms], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences,] 2020, No. 1, pp. 233-245.*
9. *Kasturi R., Goldgof D., Soundararajan P., Manohar V., Garofolo J., Bowers R., Boonstra M., Korzhova V., Zhang J.* Framework for performance evaluation of face, text, and vehicle detection and tracking in video: data, metrics, and protocol, *TPAMI*, 2009, Vol. 31, No. 2, pp. 319-326.
10. *Vencel E.S., Ovcharov L.A.* Probability theory and its engineering applications. Handbook for universities. 2-nd. Moscow: High school, 2000, 480 p.
11. *Nawaz T., Cavallaro A.* A protocol for evaluating video trackers under real-world conditions, *Image Processing IEEE*, 2013, Vol. 22, No. 4, pp. 1354-1361
12. *Yang M., Wu Y., Hua G.* Context-aware visual tracking, *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2006, No. 31, pp. 1195-1209.
13. *Stauffer C., Grimson W.* Learning patterns of activity using real-time tracking, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, pp. 747-757.
14. *Sundaresan A., Chellappa R.* Multi-camera tracking of articulated human motion using shape and motion cues, *IEEE Transactions on Image Processing*, 2009, pp. 2114-2126.
15. *Henriques F., Caseiro R., Martins P., Batista J.* High-Speed Tracking with Kernelized Correlation Filters, *TPAMI*, 2014, Vol. 42, No. 5, pp. 345-362.
16. *Frey J. Dueck D.* Clustering by Passing Messages Between Data Points, *Science Today*, 2007, Vol. 315, pp. 972-976.
17. *Smith K., Gatica-Perez D., Odobez J.* Evaluating Multi-Object Tracking, *CVPR Work.* IEEE, 2005, Vol. 3, pp. 32-36.
18. *Black J., Ellis T., Rosin P.* A novel method for video tracking performance evaluation, *VS-PETS*, 2003, pp. 125-132.
19. *Kao E., Daggett M., Hurley M.* An information theoretic approach for tracker performance evaluation, *CVPR*, 2009, pp. 1523-1529.

20. *Bashir F. Porikli F.* Performance Evaluation of Object Detection and Tracking Systems, *PETS*, 2006, pp. 190-203.
21. *Checka N., Wilson K., Rangarajan V., Darrell T.* A probabilistic framework for multi-modal multi-person tracking, *Proceedings of the IEEE Workshop on Multi-Object Tracking (WOMOT '03)*, 2003, pp. 203-212.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Я.Е. Ром.

**Щелкунов Александр Евгеньевич** – Акционерное общество Научно–конструкторское бюро вычислительных систем (АО НКБ ВС); e-mail: alexandrshcelkunov@mail.ru; г. Таганрог, Россия; программист.

**Ковалев Владислав Владимирович** – e-mail: vlad.kovalev94@mail.ru; программист.

**Сидько Иван Владимирович** – e-mail: ivan.brokenroll@gmail.com; к.т.н.; зав. отделом.

**Сергеев Николай Евгеньевич** – e-mail: nesergeev@sfedu.ru; д.т.н.; профессор.

**Shchelkunov Alexander Evgen'evich** – Joint Stock Company «Scientific Design Bureau of Computing Systems» (JSC SDB CS); e-mail: alexandrshcelkunov@mail.ru; Taganrog, Russia; programmer.

**Kovalev Vladislav Vladimirovich** – e-mail: vlad.kovalev94@mail.ru; programmer.

**Sidko Ivan Vladimirovich** – e-mail: ivan.brokenroll@gmail.com; cand. of eng. sc.; department head.

**Sergeev Nikolay Evgenievich** – e-mail: nesergeev@sfedu.ru; dr. of eng. sc., professor.

## ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ

1. Объем статьи должен быть не менее 12 и не более 18 страниц. Формат (А 4). Редактор **Word 7 for Windows**, шрифт Times New Roman, размер 14, интервал 1,5. Авторы представляют в редакцию 1 экз. статьи и идентичный электронный вариант.

2. Названию статьи предшествует индекс УДК, соответствующий заявленной теме.

3. Текст статьи начинается с названия статьи (на русском и английском языках), фамилии, имени и отчества автора (полностью) и снабжается аннотацией на русском и английском языках объемом **не менее 250-300 слов**. В тексте аннотации указывается цель, задачи исследования и краткие выводы. В аннотации **не следует** давать ссылку на номер публикации в списке литературы к статье. После аннотаций приводятся ключевые слова (словосочетания), несущие в тексте основную смысловую нагрузку (на русском и английском языках).

4. В тексте статьи следует использовать минимальное количество таблиц и иллюстраций. Рисунок должен иметь объяснения значений всех компонентов, порядковый номер, название, расположенное под рисунком. В тексте на рисунок дается ссылка. Таблица должна иметь порядковый номер, заголовок, расположенный над ней. Данные таблиц и рисунков не должны дублировать текст. Формулы должны быть набраны **в редакторе формул Word 7 for Windows**.

5. Цитаты тщательно сверяются с первоисточником и визируются автором на обратной стороне последней страницы: "Цитаты и фактический материал сверены". Подпись, дата.

6. Наличие пристатейного библиографического списка на русском и английском языках обязательно. **Ссылок должно быть не менее 20-ти**, из них на зарубежные источники – не менее 35 %. В тексте ссылки должны быть в квадратных скобках.

Примеры оформления литературы: а) для книг: фамилия, инициалы автора(ов), полное название книги, место, год издания, страницы; б) для статей: фамилия и инициалы автора(ов), полное название сборника, книги, газеты, журнала, где опубликована статья, место и год издания (сборника, книги), номер (для журнала), год и дата (для газеты), выпуск, часть (для сборника), страницы, на которых опубликована статья. Иностранная литература оформляется по тем же правилам.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

7. Рукопись должна быть тщательно вычитана. Редакционная коллегия оставляет за собой право при необходимости сокращать статьи, редактировать и отсылать авторам на доработку.

8. Статьи сопровождаются сведениями об авторе(ах) (фамилия, имя, отчество, ученое звание, должность, место работы, адрес, электронный адрес и номер телефона) на русском и английском языках.

9. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

Адрес журнала в Интернете: <http://izv-tn.tti.sfedu.ru/>.