



№4-2023

ISSN 1999-9429

ИЗВЕСТИЯ ЮФУ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Алгоритмы обработки информации
- Анализ данных и моделирование
- Электроника, нанотехнологии и приборостроение

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

№ 4 (234). 2023 г.

Тематический выпуск

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

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

Редакционный совет

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

Учредитель Южный федеральный университет.

Издатель Южный федеральный университет.

Ответственный за выпуск Курейчик В.В.

Технический редактор Ярошевич Н.В.

Оригинал-макет выполнен Ярошевич Н.В.

Дата выхода в свет 18.10. 2023 г. Формат 70×108 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная.

Офсетная печать. Усл. печ. л. – 23,2. Уч.-изд. л. – 17,7.

Заказ № . Тираж 250 экз.

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

Адрес типографии: Отпечатано в отделе полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции Издательско-полиграфического комплекса КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ. 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, тел. 8(863)243-41-66.

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

16+

Цена свободная

ISSN 1999-9429 (Print)

ISSN 2311-3103 (Online)

© Южный федеральный университет, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ I. АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Л.К. Бабенко, А.С. Шумилин ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ НА ОСНОВЕ СХЕМЫ ШАМИРА В МЕДИЦИНСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ.....	6
А.А. Егорчев, Д.Е. Чикрин, Д.М. Пашин, А.Ф. Фахрутдинов, П.А. Кокунин АЛГОРИТМ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ МЕЛКОЙ МОТОРИКИ НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИИ ОТ СЕНСОРОВ СМАРТФОНА	14
Л.К. Бабенко, И.Д. Русаловский ПОБИТОВЫЕ ГОМОМОРФНЫЕ ОПЕРАЦИИ НАД ЧИСЛАМИ С ПЛАВАЮЩЕЙ ТОЧКОЙ	26
Д.Е. Чикрин, А.А. Егорчев, Д.М. Пашин, Н.А. Сарамбаев ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТЫ ПОВЕРХНОСТНОГО ДЫХАНИЯ ПО ДАННЫМ ВИБРОМЕТРИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ СМАРТФОНА	35
К.А. Иваненко, Д.Б. Борзов, И.Е. Чернецкая, В.С. Титов, А.С. Сизов ПРИМЕНЕНИЕ УСТРОЙСТВ ПЛАНИРОВАНИЯ И ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА РАЗМЕЩЕНИЯ В МАТРИЧНЫХ МУЛЬТИПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМАХ ВЫСОКОЙ ГОТОВНОСТИ.....	42
В.С. Панищев, О.О. Хомяков, Д.В. Титов, С.И. Егоров МЕТОД РАСПОЗНАВАНИЯ ТЕКСТОВЫХ ДАННЫХ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ	57
К.С. Задиран НОВЫЙ МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ДАННЫХ С НЕОДНОРОДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ РАБОЧИХ ЦИКЛОВ	65
Е.А. Титенко, И.Е. Чернецкая, Л.А. Лисицын, М.А. Титенко, С.И. Егоров АППАРАТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ МЕТОД РЕКОНФИГУРАЦИИ ГРУППИРОВКИ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ	75
М.С. Анферова, А.А. Белевцев, А.М. Белевцев МЕТОДИКА АНАЛИЗА РАЗВИТИЯ ЗАРОЖДАЮЩИХСЯ ТЕХНОЛОГИЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФРОНТОВ.....	87
П.О. Никашина, А.В. Боженюк ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА НА ОСНОВЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ НЕЧЕТКИХ ГРАФОВ.....	97
Б.К. Лебедев, О.Б. Лебедев, М.А. Ганжур УПАКОВКА В ПОЛУБЕСКОНЕЧНУЮ ПОЛОСУ НА ОСНОВЕ ДЕКОМПОЗИЦИИ И ГИБРИДИЗАЦИИ БИОИСПИРИРОВАННЫХ МЕТОДОВ	109

РАЗДЕЛ II. АНАЛИЗ ДАННЫХ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

С.Г. Буланов КОМПЬЮТЕРНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ УСТОЙЧИВОСТИ ПО ЛЯПУНОВУ СИСТЕМ НЕЛИНЕЙНЫХ ОБЫКНОВЕННЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ.....	126
Е.В. Федорина, И.Ф. Дьяков, О.Г. Крупенников АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕГО РАСКРОЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕСУРС-СТОИМОСТНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ	137

В.А. Частикова, Д.А. Любич НЕЙРОСЕТЕВОЙ МЕТОД ПОВЕДЕНЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ДИНАМИКИ НАЖАТИЯ КЛАВИШ	151
С.М. Гушанский, В.С. Потапов РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫХ КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ, ПОДАВЛЕНИЯ И КОРРЕКЦИИ ОШИБОК В КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЯХ	162
Махмуд Хуссейн Ахмед Махмуд, К.Е. Румянцев, Аль-Бегат Адиль Хамид Шакир АНАЛИЗ ВОСХОДЯЩЕГО ЛАЗЕРНОГО КАНАЛА СПУТНИКОВОЙ КОММУНИКАЦИИ В УСЛОВИЯХ АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ	174

РАЗДЕЛ III. ЭЛЕКТРОНИКА, НАНОТЕХНОЛОГИИ И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

А.А. Кажаров ИСПОЛЬЗОВАНИЕ 3D-ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЛИТИЕВЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ	192
Б.М. Середин, В.П. Попов, А.В. Малибашев, А.А. Скиданов, М.Б. Зиненко ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА В НАГРЕВАТЕЛЬНОМ УСТРОЙСТВЕ ДЛЯ ТЕРМОМИГРАЦИИ ЖИДКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В КРЕМНИИ	200
А.В. Леонова, С.А. Синютин, О.Ю. Шпаковская, З.А. Коков РАЗРАБОТКА АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ ГОТОВНОСТИ ВСАДНИКА И ЛОШАДИ К ИППОТЕРАПИИ	210
А.С. Синюкин, Б.Г. Коноплев, А.В. Ковалев ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ-УМНОЖИТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ПИТАНИЯ МАЛОМОЩНЫХ БЕСПРОВОДНЫХ ПАССИВНЫХ МИКРОУСТРОЙСТВ	220
О.В. Дворников, В.А. Чеховский, Н.Н. Прокопенко, А.В. Кунц, В.Е. Чумаков СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДВУХ- И ОДНОКАСКАДНЫХ ВЛТ-JFET ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ	230
А.В. Бугакова, Д.В. Кузнецов, В.Е. Чумаков, Д.В. Клейменкин, М.А. Сергеенко ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ АНАЛОГОВЫХ МИКРОСХЕМ НА ШИКОРОЗОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ (ОБЗОР)	241
М.Р. Шарипов, А.Ф. Фахрутдинов, П.А. Кокунин МЕТОДЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ ЧАСТОТЫ СЕРДЕЧНЫХ СОКРАЩЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВСТРАИВАЕМЫХ В СМАРТФОНЫ СЕНСОРОВ	254

CONTENT

SECTION I. INFORMATION PROCESSING ALGORITHMS

L.K. Babenko, A.S. Shumilin USE OF PARALLEL COMPUTING FOR SECURITY METHOD IMPLEMENTATION BASED ON THE SHAMIR SCHEME IN A MEDICAL INFORMATION SYSTEM	7
A.A. Egorchev, D.E. Chickrin, D.M. Pashin, A.F. Fahrutdinov, P.A. Kokunin ALGORITHM FOR DETECTING FINE MOTOR DEFECTS BASED ON INFORMATION FROM SMARTPHONE SENSORS	14
L.K. Babenko, I.D. Rusalovsky BITWISE HOMOMORPHIC OPERATIONS ON FLOATING POINT NUMBERS.....	26
D.E. Chickrin, A.A. Egorchev, D.M. Pashin, N.A. Sarambaev DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR DETERMINING THE FREQUENCY OF SURFACE RESPIRATION ACCORDING TO SMARTPHONE BIOMETRIC SENSORS	35
K.A. Ivanenko, D.B. Borzov, I.E. Chernetskaya, V.S. Titov, A.S. Sizov APPLICATION OF DEVICES FOR PLANNING AND ASSESSMENT OF PLACEMENT QUALITY IN MATRIX MULTIPROCESSOR SYSTEMS OF HIGH AVAILABILITY	43
V.S. Panishchev, O.O. Khomyakov, D.V. Titov, S.I. Egorov METHOD FOR RECOGNIZING TEXT DATA IN IMAGES	57
K.S. Zadiran A NEW METHOD FOR PREDICTING THE REMAINING EQUIPMENT LIFE FOR HIGH-FREQUENCY DATA WITH NON-UNIFORM DUTY CYCLES	66
E.A. Titenko, I.E. Chernetskaya, L.A. Lisitsyn, M.A. Titenko, S.I. Egorov HARDWARE-ORIENTED METHOD FOR RECONFIGURING A GROUP OF MOBILE OBJECTS	75
M.S. Anferova, A.A. Belevtsev, A.M. Belevtsev METHODOLOGY FOR ANALYZING THE DEVELOPMENT OF EMERGING TECHNOLOGIES AND TECHNOLOGICAL FRONTS	88
P.O. Nikashina, A.V. Bozhenyuk TRAFFIC FLOW OPTIMIZATION BASED ON PERIODIC FUZZY GRAPHS.....	97
B.K. Lebedev, O.B. Lebedev, M.A. Ganzhur SEMI-INFINITE STRIP PACKAGING BASED ON DECOMPOSITION AND HYBRIDIZATION OF BIOINSPIRED METHODS	109

SECTION II. DATA ANALYSIS AND MODELING

S.G. Bulanov A COMPUTER-ORIENTED APPROACH TO THE ANALYSIS OF THE LYAPUNOV STABILITY OF NONLINEAR SYSTEMS OF ORDINARY DIFFERENTIAL EQUATIONS	126
E.V. Fedorina, I.F. Dyakov, O.G. Krupennikov AUTOMATED DESIGN OF RESOURCE-SAVING CUTTING USING RESOURCE-SAVING COEFFICIENT	138
V.A. Chastikova, D.A. Lyubich NEURAL NETWORK METHOD OF USER BEHAVIOR ANALYSIS BASED ON KEYSTROKE DYNAMICS	152

S.M. Gushanskiy, V.S. Potapov DEVELOPMENT AND STUDY OF A CONTROL MODEL BASED ON NOISE-RESISTANT QUANTUM COMPUTING, SUPPRESSION AND CORRECTION OF ERRORS IN QUANTUM COMPUTING	163
--	-----

Hussein Ahmed Mahmood, K.Y. Rummyantsev, Al-Begat Adil Hameed Shakir CHANNEL ANALYSIS OF OPTICAL SINGLE SIDEBAND QUADRATURE PHASE SHIFT KEYING WITH SUBCARRIER RADIO SIGNAL FOR LASER SATELLITE COMMUNICATIONS UNDER ATMOSPHERIC TURBULENCE	175
---	-----

SECTION III. ELECTRONICS, NANOTECHNOLOGY AND INSTRUMENTATION

A.A. Kazharov USING 3D TECHNOLOGY TO DESIGN LITHIUM BATTERIES	192
---	-----

B.M. Seredin, V.P. Popov, A.V. Malibashev, A.A. Skidanov, M.B. Zinenko INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER PROCESSES IN A HEATING DEVICE FOR THERMAL MIGRATION OF LIQUID INCLUSIONS IN SILICON	201
--	-----

A.V. Leonova, S.A. Sinyutin, O.Yu. Shpakovskaya, Z.A. Kokov DEVELOPMENT OF A HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEX FOR FUNCTIONAL DIAGNOSTICS OF RIDER AND HORSE READINESS FOR HIPPO THERAPY	211
--	-----

A.S. Sinyukin, B.G. Konoplev, A.V. Kovalev INTEGRATED VOLTAGE RECTIFIER-MULTIPLIER FOR SUPPLYING LOW-POWER WIRELESS PASSIVE MICRODEVICES	221
---	-----

O.V. Dvornikov, V.A. Tchekhovski, N.N. Prokopenko, A.V. Kunts, V.E. Chumakov COMPARATIVE ANALYSIS OF TWO- AND SINGLE-STAGE BJT-JFET OPERATIONAL AMPLIFIERS.....	230
--	-----

A.V. Bugakova, D.V. Kuznetsov, V.E. Chumakov, D.V. Kleimenkin, M.A. Sergeenko FUNDAMENTALS OF DESIGNING HIGH-TEMPERATURE ANALOGIC MICROCIRCUIT ON WIDE-GAP SEMICONDUCTORS (REVIEW)	241
---	-----

M.R. Sharipov, A.F. Fahrutdinov, P.A. Kokunin METHODS FOR OBTAINING INFORMATION FOR BIOMEDICAL MONITORING OF HEART RATE USING BUILT-IN SMARTPHONE SENSORS ...	255
--	-----

Раздел I. Алгоритмы обработки информации

УДК 004.056.55

DOI 10.18522/2311-3103-2023-4-6-13

Л.К. Бабенко, А.С. Шумилин

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ НА ОСНОВЕ СХЕМЫ ШАМИРА В МЕДИЦИНСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ*

В современном мире медицинские информационные системы становятся наиболее популярными инструментами для обработки, хранения, систематизации и передачи медицинских данных пациентов. Медицинские обследования могут быть представлены в виде файлов различных форматов и сильно варьироваться по размеру (от нескольких байт до сотен гигабайт). Например, некоторые двоичные файлы имеют малый размер поскольку содержат лишь заключения врачей в виде текстового описания, а файлы, записи ночного видеомониторинга пациента или DICOM-файлы компьютерной томограммы органов человека, содержащие несколько сотен слайсов могут достигать размера в сотни гигабайт. Соответственно, большие файлы требуют значительных вычислительных ресурсов при передаче с сервера на сервер. Кроме того, при использовании метода обеспечения безопасности, который представляет собой алгоритм разделения секрета (файла с обследованием) по схеме Шамира операции, операции по разделению секрета на части и слиянию частей воедино могут занимать большие времена при последовательном режиме работы, чем при параллельном. Поэтому, видится возможность ускорить процесс обработки больших данных без снижения уровня безопасности. Целью работы является подтверждение гипотезы уменьшения времени на выполнения операций разделения и слияния частей секрета с использованием средств параллельных вычислений при реализации метода обеспечения безопасности по схеме разделения секрета Шамира в медицинской информационной системе. Объектом исследования является метод обеспечения безопасности, который разработан авторами для внедрения в подсистемы защиты информации медицинской информационной системы. В рамках исследования проведен анализ наиболее эффективных средств для распараллеливания процессов (MPI и OpenMP) и выбран инструмент, подходящий под решение поставленной цели. Также проведены эксперименты (анализ времени в зависимости от количества параллельных потоков и количества символов, содержащихся в DICOM файле), которые подтвердили концепцию возможности распараллелить алгоритм обмена секретом на основе схемы Шамира, добившись почти линейного ускорения с помощью библиотеки MPI.

Безопасность данных; параллельные вычисления; медицинская информационная система; MPI; большие данные.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90138.

L.K. Babenko, A.S. Shumilin

**USE OF PARALLEL COMPUTING FOR SECURITY METHOD
IMPLEMENTATION BASED ON THE SHAMIR SCHEME IN A MEDICAL
INFORMATION SYSTEM**

Medical information systems currently are becoming the most popular tools for processing, storing, organizing, and transmitting patient medical data. Medical examinations can be presented in the form of files in various formats and vary greatly in terms of size (from a few bytes to hundreds of gigabytes). For example, some binary files are small and lightweight because they contain only doctors' conclusions in the form of a text description. However, records of night video monitoring of a patient or DICOM files of human organs CT scans containing several hundred slices, can reach hundreds of gigabytes in size. Accordingly, large files require significant computing resources when transferred from server to server. In addition, when using the security method, which is an algorithm of a secret sharing (medical output file) according to the Shamir sharing scheme, operations to split the secret into parts and merge the parts together may take longer in serial operation than in parallel way. Therefore, it seems possible to speed up the processing of big data without reducing the level of security. The main purpose of the work is to confirm the hypothesis of reducing time to perform the operation of splitting and merging parts of a secret based on parallel computing tools withing implementing the security method according to the Shamir secret sharing scheme in a medical information system. The object of the study is a security method developed by the author for implementation in the information security subsystems of a medical information system. As part of the study, author analyzed the most effective tools for parallelizing processes (like MPI and OpenMP). MPI has been used as a tool as much more suitable for the current purpose. Moreover, several waves of experiments have been run (analysis of time depending on the number of parallel streams and the number of characters contained in the DICOM file) and allowed us to prove a concept of parallelizing the secret exchange algorithm based on the Shamir scheme, achieving almost linear acceleration using the MPI library.

Data security; parallel computing; medical information system; MPI; big data.

Введение. На сегодняшний день процессы накопления и обработки информации в сфере здравоохранения набирают свою актуальность из-за масштабной информатизации как в рамках Российской Федерации, так и в целом в мире [1]. Задачи, связанные с хранением, систематизацией и обработкой больших объемов данных делают актуальным процесс разработки медицинских информационных систем (МИС). Благодаря электронному документообороту у медицинского персонала появляется возможность оперативно принимать решения о постановке диагноза и оказывать необходимую помощь [2]. В нашей стране медицинские организации участвуют в сборе, накоплении, хранении, изменении, распространении и уничтожении конфиденциальной информации.

Одной из проблем при проектировании медицинских информационных систем является **потребность в интеграции систем защиты** конфиденциальной информации, которая является основным объектом защиты внутри МИС. Соответственно, в медицинской информационной системе видится необходимость внедрения подсистемы **механизмов защиты**, который представляет собой метод обеспечения защиты конфиденциальных данных на основе схемы разделения секрета Шамира, предложенный, реализованный и исследованный авторами [3, 4].

Идея схемы Шамира заключается в том, что двух точек достаточно для задания прямой, трех точек – для задания параболы, четырёх точек – для кубической параболы, и так далее. Чтобы задать многочлен степени k , требуется $k+1$ точек [5].

Для того, чтобы после разделения секрет M могли восстановить только k участников, его скрывают в формулу многочлена степени $(k-1)$ над конечным полем $G(k)$. Для однозначного восстановления этого многочлена необходимо знать его значения в k точках, причем, используя меньшее число точек, однозначно восста-

новить исходный многочлен не получится. Количество же различных точек многочлена не ограничено (на практике оно ограничивается размером числового поля, в котором ведутся расчёты) [6, 7].

Алгоритм можно описать следующим образом: пусть дано конечное числовое поле, в котором зафиксировано n различных ненулевых несекретных элементов. Каждый из этих элементов приписывается определённому члену группы. Чтобы восстановить секрет, можно воспользоваться интерполяционной формулой, например формулой Лагранжа [8, 9].

Многочлен $L(x)$ минимальной степени, принимающий значения в заданном наборе точек, то есть решающий задачу интерполяции.

$$L(x) = \sum_{i=0}^n y_i l_i(x), \quad (1)$$

где y_i и l_i – базисные полиномы

Важным достоинством схемы Шамира является то, что она легко масштабируема. Чтобы увеличить число пользователей, необходимо лишь добавить соответствующее число несекретных элементов к существующим. В то же время компрометация одной части секрета переводит схему из (n, t) пороговой в $(n-1, t-1)$ -пороговую [10].

Анализ проблемы. Схема разделения секрета Шамира представляет собой метод разделения секрета между группами, где для воспроизведения секрета необходимо объединить определенный порог ключей. С большими секретами, такими как целый текстовый документ, этот процесс может быть медленным и дорогим, особенно если число участников и порог высоки. Возникает необходимость к использованию параллельных вычислительных систем для повышения безопасности и ускорения. Существующие в современном мире программные решения актуальны в сфере здравоохранения, в первую очередь для обеспечения безопасности конфиденциальных данных [11, 12].

В качестве примера можно выделить отчеты, изображения, DICOM и Nifti – файлы, как наиболее часто используемые артефакты из области медицины.

Основная часть. В данной работе приведены результаты исследования распараллеливания алгоритма Шамира с целью сокращения времени, затрачиваемого как на создание, так и на объединение общих ресурсов в масштабируемом виде.

Масштабирование в анализе высокопроизводительных программ делится на две категории: «сильное» и «слабое» масштабирование.

- ♦ сильное масштабирование описывает, как производительность изменяется по мере увеличения количества процессов или потоков при фиксированном размере задачи;

- ♦ слабое масштабирование исследует, как изменяется производительность по мере увеличения количества процессоров/потоков и размера задачи.

Как ранее упоминалось, алгоритм совместного использования секрета по схеме Шамира требует наличия двух параметров:

- ♦ желаемого количества общих ресурсов (n);
- ♦ порогового значения, необходимого для «разблокировки» секрета (t).

Алгоритм вычисляет доли, генерируя случайное полиномиальное уравнение степени $t-1$. Секрет становится постоянной величиной в полиномиальном уравнении.

$$\text{Пример: } 9x^3 + 2x^2 + 3x + \text{секрет}. \quad (2)$$

Требуемый порог для воспроизведения секрета функции, указанной в формуле 3, будет равен 4 долям, потому что $t = 4$ дает полином степени 3 ($t-1$). После генерации случайного полинома алгоритм вычисляет пары координат X и Y , генерируя случайное значение X и подставляя его в полиномиальную функцию для получения соответствующего значения Y .

$$Y = ax^3 + bx^2 + cx + \text{секрет}. \quad (3)$$

В представленной реализации делается дополнительный шаг, и весь полином вычисляется по модулю простого большого числа, например, 257. Это решает проблему получения злоумышленником информации о секрете с помощью каждого найденного ключа, используя арифметику конечных полей вместо целочисленной арифметики.

Проблема с таким подходом (при последовательном вычислении) заключается в том, что для каждого символа входных данных должна итерация должна выполняться n раз. Этот процесс медленный, а значит может быть представлена возможность реализовать параллельные вычисления.

Реализация алгоритма разделения секрета Шамира [13] с открытым исходным кодом на языке C позволила исследовать преимущества распараллеливания алгоритма. Общая цель заключалась в том, чтобы ускорить процесс разделения и слияния долей секрета для больших файлов с учетом большого количества взаимодействующих сторон без проигрыша в безопасности.

Был проведен анализ основных стандартов для распараллеливания программ, среди которых номинальными кандидатами оказались OpenMP и MPI [14].

OpenMP – представляет собой способ программирования на вычислительных мощностях с общей оперативной памятью [15]. Это означает, что параллелизм существует в том случае, когда каждый параллельный поток имеет доступ ко всем имеющимся данным – то есть в процессе выполнения определенного цикла «for» разделяя этот цикл между всеми потоками [16].

MPI – это библиотека для разработки и ускорения программного кода на устройствах с распределенной памятью. Параллелизм существует, в том случае если каждый процесс работает **в своем собственном пространстве памяти** изолированно от других [17]. Иначе говоря, каждый бит программного кода, выполняется независимо отдельным процессом. Параллелизм происходит потому, что каждому процессу абсолютно точно указывается, над какой частью конкретной задачи он должен работать, основываясь исключительно на идентификаторе процесса [18].

Таким образом для решения задачи в рамках распределенной медицинской системы наиболее оптимальным с точки зрения эффективного потребления ресурсов вариантом является способ на основе библиотеки MPI. Для подтверждения теории были проведены экспериментальные расчеты. Все эксперименты проводились на локальной рабочей станции: процессор Intel Core i7 – 11800H (8-ядер по 2,3 ГГц с гиперпоточностью), 16 ГБ ОЗУ с использованием максимального количества долей и порогового значения, которое исходная программа могла сгенерировать (255 долей ключа). В качестве тестовых наборов данных использовались DICOM-файлы, содержащие 500, 1000, 2000, 4000 и 8000 символов в случайных полях.

Эксперименты «слабого масштабирования» заключались в удвоении количества символов во входном файле при одновременном удвоении количества потоков. Были определены 2 функции в реализации, которые позволили существенно сократить время вычисления долей.

Во-первых, удалось распараллелить процесс генерации случайных коэффициентов, используемых в полиномиальной функции.

Во-вторых, удалось распараллелить генерацию общих долей ключей. Оставив функцию слияния долей нетронутой, реализована проверка корректности процесса распараллеливания, поскольку функция могла повторно собрать общие ресурсы в исходный файл. После реализации параллелизма на этапе генерации доли схемы разделения секрета Шамира и проверки корректности этого преобразования принято решение реализовать параллелизм и в функции слияния долей.

Проблема с распараллеливанием этапа соединения общих ресурсов в процессе совместного использования секрета Шамиром заключается в правильном определении области действия переменных MPI (т. е. выборе переменных, которые должны быть видны всем потокам), а также в определении и выделении критических областей. Наиболее важная область – это место, где каждый поток обновляет секрет после вычисления интерполяционных полиномов Лагранжа [19, 20]. Для этого пришлось синхронизировать доступ к такой области с помощью функционала библиотеки MPI, что позволило распараллелить цикл, вычисляющий интерполирующий полином Лагранжа функции, используемой при соединении долей обратно воедино.

Предлагаемый способ демонстрирует значительное ускорение при разделении и объединении долей секрета в схеме Шамира с помощью библиотеки MPI. Ниже приведены результаты.

В табл. 1 показано для «сильного масштабирования», что время создания общих ключей уменьшается почти вдвое каждый раз, когда мы удваиваем количество потоков, что означает, что такая реализация обеспечивает близкое к линейному ускорение.

Таблица 1

Время необходимое для генерации 255 долей секрета с порогом 255

Количество потоков	1000 – символьный файл
1	8.42 сек
2	4.24 сек
4	2.35 сек
8	1.3 сек
16	0.7 сек

Были получены аналогичные результаты масштабирования при повторном объединении общих ресурсов для восстановления исходного секрета, как показано в табл. 2. Здесь важно отметить, что происходит увеличение времени при 16 потоках при обратном объединении общих ресурсов. Это соответствует количеству физических ядер тестовой машины (восемь с шестнадцатью гиперпотоками). На этом этапе увеличение количества потоков становится контрпродуктивным, поскольку они не могут выполняться параллельно на таком оборудовании.

Таблица 2

Время необходимое на восстановление 255 долей секрета

Количество потоков	1000 – символьный файл
1	1.48 сек
2	0.75 сек
4	0.4 сек
8	0.29 сек
16	0.33 сек

Табл. 3 показывает результаты для «слабого масштабирования», а именно, что время не увеличивается пропорционально, поскольку были удвоены как размер входных данных, так и количество потоков.

Таблица 3

Изменение времени при генерации долей секрета с одновременным удвоением количества символов и потоков

Количество потоков	Количество символов	Время
1	500	4,53 сек
2	1000	4.65 сек
4	2000	5.07 сек
8	4000	5.66 сек
16	8000	7.13 сек

Закключение: в рамках исследования произведен процесс распараллеливания алгоритма обмена секретом на основе схемы Шамира, в предложенном авторами методе обеспечения безопасности в рамках медицинской информационной системы. Подход на основе подключения библиотеки MPI позволил добиться почти линейного ускорения и сократить время генерации долей секрета в 1,87 раза и в 1,74 раза для задачи восстановления долей – при увеличении вдвое количества потоков. Подход демонстрирует ускорение на локальной машине (Intel Core i7 – 11800H: 8-ядер по 2,3 ГГц с гиперпоточностью до 16, 16 ГБ ОЗУ). Можно сделать предположение, что в распределенной облачной системе удастся добиться большего ускорения поскольку будет использоваться значительное количество вычислительных ресурсов – количество ядер процессоров на распределенных серверах. Кроме того, использованная библиотека MPI для распараллеливания имеет большой функционал и поддержку облачных вычислений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карнаухов Н.С., Ильяхин Р.Г. Возможности технологий "Big Data" в медицине // Врач и информационные технологии. – 2019. – № 1.
2. Калугина Е.А. Система электронного документооборота, ее преимущества и переход на электронный документооборот // Вестник НИБ. – 2019. – № 37.
3. Алексеев Д.М., Бабенко Л.К., Шумилин А.С. Алгоритм обеспечения защиты конфиденциальных данных облачной медицинской информационной системы // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 5 (222). – С. 120-134.
4. Shumilin A., Babenko L., Alekseev D. Development of the algorithm to ensure the protection of confidential data in cloud medical information system // 2021 14th International Conference on Security of Information and Networks (SIN).
5. Сундуков Р.Ш., Королева В.В. Программное средство разделения секрета с использованием схемы Шамира // Безопасность информационного пространства: Сб. трудов XVIII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Магнитогорск, 28–29 ноября 2019 года. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2019. – С. 263-267. – EDN MGJHFO.
6. Схема разделения секрета Шамира. Хабр журнал. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/431392/> (дата обращения: 22.08.2023).
7. Cryptographic algorithms – Shamir Secret Sharing. – Режим доступа: https://cryptophy.fandom.com/wiki/Shamir%27s_Secret_Sharing (дата обращения: 22.08.2023).
8. Парватов Н.Г. Совершенные схемы разделения секрета // Прикладная дискретная математика. – 2008. – № 2 (2). – С. 41-47.
9. Червяков Н.И., Дерябин М.А. Новый метод порогового разделения секрета, основанный на системе остаточных классов // Информационные технологии. – 2016. – Т. 22, № 3. – С. 211-219.
10. Шенец Н.Н. Об идеальных модулярных схемах разделения секрета в кольцах многочленов от нескольких переменных. – 2019.

11. Мартышин С.А., Храпченко М.В., Шокур А.В. Исследование задачи обеспечения безопасности при хранении и обработке конфиденциальных данных // Тр. ИСП РАН. – 2021. – № 2.
12. Минаков В.Ф., Шепелёва О.Ю., Лобанов О.С. Многофакторная модель обеспечения безопасности конфиденциальных данных // Правовая информатика. – 2020. – № 1.
13. Basavegowda R., Seenapp S. Electronic Medical Report Security Using Visual Secret Sharing Scheme // 2013 UKSim 15th International Conference on Computer Modelling and Simulation.
14. Титов К.Е. Исследование поведения фреймворка openmp в программах с параллельными вычислениями // E-Scio. – 2021. – № 4 (55).
15. Мартыненко С.И., Бахтин В.А., Румянцев Е.В., Тарасов Г.А., Середкин Н.Н., Боярских К.А. Параллельное решение краевых задач с помощью технологии openmp // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. – 2022. – № 2 (101).
16. Аксенов С.В., Мальчуков А.Н., Мыцко Е.А. Применение технологии параллельных вычислений OpenMP для поиска образующих полиномов // Вестник евразийской науки. – 2013. – № 6 (19).
17. MPI. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/MPI> (дата обращения: 22.08.2023).
18. Тузко Я.Н., Соколова О.О., Акишин Б.А. Организация параллельных вычислений в многоядерных процессорах // Молодой исследователь Дона. – 2018. – № 5 (14).
19. Гервич Л.Р., Штейнберг Б.Я. Об автоматизации применения размещения данных с перекрытиями в распределенной памяти // Вестник ЮУрГУ. Серия: Математическое моделирование и программирование. – 2023. – № 1.
20. Листунов С.Б. Исследование метода решения задач интерполяции функции методом полинома Лагранжа // Научные междисциплинарные исследования. – 2021. – № 2.

REFERENC

1. Karnaukhov N.S., Il'yukhin R.G. Vozmozhnosti tekhnologiy "Big Data" v meditsine [Possibilities of "Big Data" technologies in medicine], *Vrach i informatsionnye tekhnologii* [Doctor and information technologies], 2019, No. 1.
2. Kalugina E.A. Sistema elektronnoy dokumentooborota, ee preimushchestva i perekhod na elektronnyy dokumentooborot [Electronic document management system, its advantages and the transition to electronic document management], *Vestnik NIB* [Bulletin of the National Institute of Business], 2019, No. 37.
3. Alekseev D.M., Babenko L.K., Shumilin A.S. Algoritm obespecheniya zashchity konfidentsial'nykh dannykh oblachnoy meditsinskoy informatsionnoy sistemy [Algorithm for ensuring the protection of confidential data of a cloud medical information system], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. 5 (222), pp. 120-134.
4. Shumilin A., Babenko L., Alekseev D. Development of the algorithm to ensure the protection of confidential data in cloud medical information system, *2021 14th International Conference on Security of Information and Networks (SIN)*.
5. Sundukov R.Sh., Koroleva V.V. Programmnoye sredstvo razdeleniya sekreta s ispol'zovaniem skhemy Shamira [A software tool for sharing a secret using the Shamir scheme], *Bezopasnost' informatsionnogo prostranstva: Sb. trudov XVIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh, Magnitogorsk, 28–29 noyabrya 2019 goda* [Security of the information space: Collection of proceedings of the XVIII All-Russian scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists, Magnitogorsk, November 28–29, 2019]. Magnitogorsk: Magnitogorskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiiy universitet im. G.I. Nosova, 2019, pp. 263-267. EDN MGJHFO.
6. Skhema razdeleniya sekreta Shamira. Khabr zhurnal [Shamir's secret sharing scheme. Habr magazine. – Access mode]. Available at: <https://habr.com/ru/post/431392/> (accesse 22 August 2023).
7. Cryptographic algorithms – Shamir Secret Sharing. Available at: https://cryptography.fandom.com/wiki/Shamir%27s_Secret_Sharing (accesse: 22 August 2023).
8. Parvatov N.G. Sovershennyye skhemy razdeleniya sekreta [Perfect secret sharing schemes], *Prikladnaya diskretnaya matematika* [Applied discrete mathematics], 2008, No. 2 (2), pp. 41-47.
9. Chervyakov N.I., Deryabin M.A. Novyy metod porogovogo razdeleniya sekreta, osnovanny na sisteme ostatochnykh klassov [A new threshold secret sharing method based on a system of residual classes], *Informatsionnye tekhnologii* [Information technologies], 2016, Vol. 22, No. 3, pp. 211-219.

10. *Shenets N.N.* Ob ideal'nykh modulyarnykh skhemakh razdeleniya sekreta v kol'tsakh mnogochlenov ot neskol'kikh peremennykh [On ideal modular secret sharing schemes in polynomial rings of several variables], 2019.
11. *Martishin S.A., Khrapchenko M.V., Shokurov A.V.* Issledovanie zadachi obespecheniya bezopasnosti pri khranении i obrabotke konfidentsial'nykh dannykh [Study of the problem of ensuring security during the storage and processing of confidential data], *Tr. ISP RAN* [Proceedings of ISP RAS], 2021, No. 2.
12. *Minakov V.F., Shepeleva O.Yu., Lobanov O.S.* Mnogofaktornaya model' obespecheniya bezopasnosti konfidentsial'nykh dannykh [Multifactor model for ensuring the security of confidential data], *Pravovaya informatika* [Legal informatics], 2020, No. 1.
13. *Basavegowda R., Seenapp S.* Electronic Medical Report Security Using Visual Secret Sharing Scheme, *2013 UKSim 15th International Conference on Computer Modelling and Simulation*.
14. *Titov K.E.* Issledovanie povedeniya freymvorka openmp v programmakh s parallel'nymi vychisleniyami [Study of the behavior of the openmp framework in programs with parallel computing], *E-Scio*, 2021, No. 4 (55).
15. *Martynenko S.I., Bakhtin V.A., Rumyantsev E.V., Tarasov G.A., Seredkin N.N., Boyarskikh K.A.* Parallelnoe reshenie kraevykh zadach s pomoshch'yu tekhnologii openmp [Parallel solution of boundary value problems using openmp technology], *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. Estestvennye nauki* [Bulletin of MSTU im. N.E. Bauman. Series Natural Sciences], 2022, No. 2 (101).
16. *Aksenov S.V., Mal'chukov A.N., Mytsko E.A.* Primenenie tekhnologii parallel'nykh vychisleniy OpenMP dlya poiska obrazuyushchikh polinomov [Application of OpenMP parallel computing technology to search for generating polynomials], *Vestnik evraziyskoy nauki* [Bulletin of Eurasian Science], 2013, No. 6 (19).
17. MPI. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/MPI> (accessed 22 August.2023).
18. *Tuzko Ya.N., Sokolova O.O., Akishin B.A.* Organizatsiya parallel'nykh vychisleniy v mnogoyadernykh protsessorakh [Organization of parallel computing in multi-core processors], *Molodoy issledovatel' Dona* [Young researcher of the Don], 2018, No. 5 (14).
19. *Gervich L.R., Shteynberg B.Ya.* Ob avtomatizatsii primeneniya razmeshcheniya dannykh s perekrytiyami v raspredelennoy pamyati [On automation of the application of data placement with overlaps in distributed memory], *Vestnik YuUrGU. Seriya: Matematicheskoe modelirovanie i programmirovaniye* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematical modeling and programming], 2023, No. 1.
20. *Listunov S.B.* Issledovanie metoda resheniya zadach interpolatsii funktsii metodom polinoma Lagranzha [Research of a method for solving problems of interpolation of a function using the Lagrange polynomial method], *Nauchnye mezhdistsiplinarnye issledovaniya* [Scientific interdisciplinary research], 2021, No. 2.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Г.Е. Веселов.

Бабенко Людмила Климентьевна – Южный федеральный университет; e-mail: lkbabenko@sfedu.ru; г. Таганрог, Роччия; тел.: +79054530191; кафедра безопасности информационных технологий; д.т.н.; профессор.

Шумилин Александр Сергеевич – e-mail: ashumilin@sfedu.ru; тел.: +79081773495; кафедра безопасности информационных технологий; программист.

Babenko Ludmila Klimentyevna – Southern Federal University; e-mail: lkbabenko@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79054530191; the department of information technologies security; dr. of eng. sc.; professor.

Shumilin Alexander Sergeevich – e-mail: ashumilin@sfedu.ru; phone: +79081773495; the department of information technologies security; programmer.

А.А. Егорчев, Д.Е. Чикрин, Д.М. Пашин, А.Ф. Фахрутдинов, П.А. Кокунин

**АЛГОРИТМ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ МЕЛКОЙ МОТОРИКИ
НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИИ ОТ СЕНСОРОВ СМАРТФОНА**

Цифровизация является ведущим трендом современности человечества. Она позволяет решать многие бытовые задачи с помощью устройств со специализированными алгоритмами облегчая быт, а также решать ряд задач, для которых еще вчера требовались квалифицированные специалисты. Одной из таких задач является самостоятельная предварительная диагностика пациентов в медицине. Возможность выполнять такую диагностику позволяет сократить время на выявление проблем при различных заболеваниях, в частности неврологических, в том числе таких случаях, как дефект мелкой моторики, как следствие такой вид диагностики позволяет уменьшить нагрузку на медицинских специалистов. Стоит отметить, что время играет решающую роль в процессе оказания медицинской помощи, и своевременное оказание медицинской помощи может спасти жизнь человека. Таким образом, разработка решения, позволяющего проводить самостоятельную предварительную диагностику дефектов мелкой моторики используя технические средства, которые имеются почти у всех, является актуальной задачей на сегодняшний день. Целью работы является расширение методов диагностики наличия дефектов мелкой моторики. Для достижения данной цели были поставлены задачи по исследованию имеющихся решений по теме и разработке специализированного алгоритма, предназначенного для использования в смартфонах в рамках системы биомедицинского мониторинга. В статье представлен алгоритм определения дефектов мелкой моторики человека по данным кинематического датчика смартфона – трехосевого акселерометра. Представленное решение основано на анализе углов отклонений, получаемых от акселерометра смартфона при выполнении пациентом поставленного задания (упражнения). Задание требует от пациента принять исходное положение в течение трех секунд и, затем, удерживать смартфон на вытянутой руке в течение 10 секунд, в течение которых выполняется измерение показаний трехосевого акселерометра. Результаты испытаний разработанного решения показали точность на уровне 0,05 для ошибок первого рода и 0,09 для ошибок второго рода. Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования решения для предварительной самодиагностики и может быть использовано как элемент модуля диагностики в крупных системах биомедицинского мониторинга.

Неинвазивный мониторинг; биомедицинский мониторинг; мелкая моторика; дефект мелкой моторики; обработка показаний акселерометра; неврологические расстройства; акселерометр.

A.A. Egorchev, D.E. Chickrin, D.M. Pashin, A.F. Fahrutdinov, P.A. Kokunin

**ALGORITHM FOR DETECTING FINE MOTOR DEFECTS BASED ON
INFORMATION FROM SMARTPHONE SENSORS**

Digitalization is the leading trend of modern humanity. It allows you to solve many everyday tasks with the help of devices with specialized algorithms, facilitating everyday life, as well as solving a number of tasks for which qualified specialists were needed yesterday. One of these tasks is the independent preliminary diagnosis of patients in medicine. The ability to perform such diagnostics allows you to reduce the time to identify problems with various diseases, in particular neurological disorders, including cases such as a defect of fine motor skills, this allows you to reduce the burden on medical specialists. It is worth noting that time plays a crucial role in the process of providing medical care, and the timely provision of medical care can save a person's life. Thus, the development of a solution that allows independent preliminary diagnosis of fine motor defects by using technical tools that almost everyone has is an urgent task today. The aim of the work is to expand the methods for diagnosing the presence of defects in fine motor skills. To achieve this goal, the tasks were set to study the available solutions on the topic and develop a specialized

algorithm intended for use in smartphones as part of a biomedical monitoring system. The article presents an algorithm for determining the defects of fine motor skills of a person according to the kinematic sensors of a smartphone – a three-axis accelerometer. The presented solution is based on the analysis of the deviation angles obtained from the smartphone accelerometer when the patient performs the assigned task (exercise). The task requires the patient to take a starting position for three seconds and then hold the smartphone at arm's length for 10 seconds, during which the readings of the three-axis accelerometer are measured. The test results of the solution showed the accuracy of the solution at the level of 0.05 of the alpha error and 0.09 of the beta error. The results obtained indicate the possibility of using the solution for preliminary self-diagnosis and can be used as an element of the diagnostic module in large biomedical monitoring systems.

Non-invasive monitoring; biomedical monitoring; fine motor skills; fine motor defect; smartphone diagnostics; processing of accelerometer readings; neurological disorders; accelerometer.

Введение. Мелкая моторика – совокупность скоординированных действий человека, направленных на выполнение точных мелких движений кистями и пальцами рук и ног. К мелкой моторике относится большое количество движений: жесты, захват и удержание объектов, а также мелкие и точные движения. В целом, нарушения мелкой моторики можно разделить на 3 типа:

- 1) нарушения подачи сигнала на выполнение действия (могут возникать при органических поражениях головного мозга, инсульте, а также травмах головы);
- 2) нарушения передачи сигнала (могут возникать при болезни Паркинсона, в постинсультном состоянии (в том числе в результате микроинсультов));
- 3) нарушения в приеме и выполнении сигнала (могут возникать при ДЦП, травмах конечностей, недостаточной степени развития ловкости).

Своевременное обнаружение дефектов мелкой моторики позволяет вовремя оказать помощь человеку, как для начала лечения, так и во избежание фатальных последствий, как, например, в случае с травмами головы или инсультом. Стоит отметить, что, когда речь идет об инсульте, каждая секунда на счету и необходимо всеми способами бороться за драгоценное время, чтобы спасти жизнь человека.

Активное развитие смартфонной техники и их повсеместная распространенность, позволяет использовать современные мобильные телефоны как инструмент предварительной диагностики состояния здоровья человека [3, 7, 10, 17], и, следовательно, у смартфонов есть потенциал для проведения предварительной диагностики симптомов наличия неврологических расстройств, в частности, наличия дефектов мелкой моторики. На сегодняшний день, кроме широкого распространения мобильной техники растет и количество пользователей устройств, имеющих доступ к интернету, это открывает возможность отправлять результаты предварительных обследований на централизованный сервер с базой данных пациентов в рамках большой системы биомедицинского мониторинга, где врач в удаленном режиме может контролировать показания метрик здоровья пациентов и вовремя реагировать в случае отклонений от нормы [1], что позволяет потенциально снижать уровень смертности. В [13] авторы подняли вопрос о, так называемом, стационаре на дому, где предлагается реализовать часть системы обслуживания населения в дистанционном режиме. На примере пациентов, страдающих нарушением углеводного обмена и гипертонией, которые, по результатам проведенного социологического опроса, нуждаются в более эффективном оказании медицинской помощи, авторы представили расчеты затрат, необходимых для усовершенствования системы на амбулаторно-поликлиническом уровне с помощью внедрения дистанционного мониторинга. Эти расчеты показали потенциал повышения медико-социальной и экономической эффективности. Таким образом, необходимость проведения самостоятельной диагностики дефектов мелкой моторики в системе биомониторинга состояния здоровья человека, делает расширение методов диагности-

ки наличия дефектов мелкой моторики актуальным, что и является целью данной работы. Для достижения поставленной цели рамках данной статьи решается задача по разработке алгоритма, предназначенного для проведения самостоятельной предварительной диагностики дефектов мелкой моторики кистей рук.

В первой части рассмотрены исследования по теме работы. Во второй части представлен метод и описание алгоритма определения дефектов мелкой моторики. В третьей части представлены результаты испытаний разработанного алгоритма. В четвертой проводится обсуждение результатов. В заключении приведены выводы и обозначено направление дальнейших исследований.

Обзор литературы. Основные работы по теме мелкой моторики посвящены различным видам терапии, необходимым для правильного развития мелкой моторики у человека [11, 14]. В целом тема определения дефектов мелкой моторики хорошо исследована. Основные исследования посвящены самим дефектам, которые возникают при заболеваниях. Авторы [9] описывают возникающие проблемы мелкой моторики, которые имеют место при наличии центрального и периферического пареза верхних конечностей. Пациент с данной патологией теряет возможность работы двумя руками, которая в основном необходима для манипуляций предметами и множества социальных и профессиональных функций. Авторы сообщают, что одним из методов оценки измерения функционирования кисти и подвижности суставов является динамометрия и углометрия. В патенте [20] предлагается решение по оценке состояния двигательной функции с помощью анализа видеоданных с частотой кадров 120 Гц получаемых с камер, на которых запечатлена двигательная функция кисти с 23 светоотражающими полусферическими маркерами. Данное решение в большей степени предназначено для оценки объема движений кисти. В работе [2] авторы предложили пространственно-временную сеть для точной регрессии трехмерного положения суставов рук используя видеосъемку в инфракрасном диапазоне. Оценка работы предложенного решения по критерию Пирсона находится диапазоне от 0,82 до 0,86. В статье [5] авторы применяли магнитные датчики для оценки мелкой моторики у развивающихся детей. Участники экспериментов получали задание постукивать большими и указательными пальцами левой и правой руки друг о друга в течение 10 секунд. Авторами был использован двусторонний дисперсионный анализ для оценки влияния возраста на развитие мелкой моторики. Авторы заключили, что данный способ потенциально может быть использован для оценки нарушений мелкой моторики. В работе [4] авторы применили анализ изображений для отслеживания выполнения заданий для мелкой моторики у детей. При анализе полученных данных использовался сверточный тип нейронных сетей, метод К-ближайших соседей, метод опорных векторов, а также решающие деревья. Результаты испытаний показали самую высокую точность 82.5% по метрике ассигасу среди рассмотренных решений. В работе [8] авторы предлагают перечень заданий, которые должны выполнять пациенты – дети для развития мелкой моторики. Авторы предлагают выполнять следующие задания (упражнения): под счет сжимать пальцы в кулак; под счет соединять и разъединять пальцы, держа ладони на столе; под счет попеременно соединять пальцы в кольцо, при этом раскрыв ладонь; под счет попеременно соединять все пальцы руки с большим пальцем, как отдельно каждой рукой, так и одновременно двумя; под счет на обеих руках одновременно показать второй и третий пальцы, второй и пятый пальцы по подражанию и по словесной инструкции; под счет на обеих руках одновременно положить вторые пальцы на третьи и, наоборот, третьи на вторые. Авторы определяют дефекты путем выявления таких ошибок, как ошибки синхронного выполнения задания обеими руками, замедленное либо ускоренное выполнение задания, количество движений.

Анализ представленных решений показал потенциальную возможность использования различных технических средств, таких как видеосъемка для оценки состояния мелкой моторики, при этом использование решений на основе смартфонов с инерциальными датчиками широко не представлено. Стоит отметить, что при диагностике дефектов мелкой моторики обычно пациент должен выполнить определенные упражнения, по результатам выполнения которых делаются выводы о развитии мелкой моторики, данный подход может быть реализован основе смартфона с инерциальными датчиками, данные от которых будут проанализированы, а результаты анализа могут использоваться в системе биомониторинга.

Основная часть. Современные смартфоны в своем составе имеют большое количество датчиков: акселерометры, гироскопы, видеокамеры, лидары и т.д. Для решения поставленной в данной работе задачи могут быть использованы данные, получаемые от акселерометра мобильного телефона. Акселерометры, устанавливаемые на мобильных телефонах, работают с частотой дискретизации порядка 100 Гц. Однако не все устройства поддерживают работу с такой частотой дискретизации. Более того, особенность работы мобильного программиста с акселерометрами на мобильных телефонах с операционной системой Android, имеет несколько нюансов, согласно официальной документации, предоставляемой в открытом виде от компании разработчика Google [6]. *Во-первых*, программист мобильных приложений не может напрямую задавать любую частоту считывания данных с акселерометра и быть уверенным, что устройство будет выполнять чтение данных с заданной частотой, ввиду ограничений по частоте различных акселерометров. Google представляет на выбор программиста следующие опции по выбору частоты считывания данных сенсора:

- ♦ **SENSOR_DELAY_NORMAL** – используемая по умолчанию настройка считывания данных, которая подразумевает считывание показателей с 200000 микросекундной задержкой между измерениями.

- ♦ **SENSOR_DELAY_UI** – настройка, как правило рекомендуемая к использованию, в случае отображения данных в реальном времени на экране графического интерфейса приложения. Данная настройка подразумевает чтение показателей датчиков с 60000 микросекундной задержкой, что в частотной диапазоне соответствует частоте 16,6 Гц.

- ♦ **SENSOR_DELAY_GAME** – настройка, как правило рекомендуемая для использования в таких типах приложений как игры. Данная настройка подразумевает чтение показателей датчиков с 20000 микросекундной задержкой, что в частотном диапазоне соответствует частоте 50 Гц.

- ♦ **SENSOR_DELAY_FASTEST** – настройка, рекомендуемая для получения данных сенсорики с максимально возможной частотой. Данная настройка подразумевает чтение показателей с нулевой задержкой (0 микросекунд).

Во-вторых, верхняя частота ничем не ограничивается и зависит от аппаратного датчика, в случае использования **SENSOR_DELAY_FASTEST**, что создает необходимость выполнения процедуры передискретизации сигнала. Эта проблема решается путем применения сглаживающего фильтра, например, фильтра Чебышева, АЧХ которого представлена в формуле (1):

$$|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 T_n^2\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)}}, \quad (1)$$

где ω – частота сигнала,

ω_c – частота среза фильтра,

ε – показатель пульсаций,

$T_n(x)$ – многочлен Чебышева n-го порядка.

С учетом вышеописанного, в предлагаемом решении принято выполнять чтение данных с частотой 50 Гц, используя опцию `SENSOR_DELAY_GAME`.

Система определения дефектов мелкой моторики, предлагаемая в данной работе, строится на решении, которое может работать на смартфоне пользователя, а также пригодно для встраивания в систему биомедицинского мониторинга. Решение основано на анализе данных акселерометра смартфона, реализация выполнена на языке Kotlin [12] для устройств, работающих на операционной системе Android. Система представляет собой программный модуль, который используется в мобильном приложении для проведения измерения биомедицинских показателей. Приложение разработано по принципу объектно-ориентированного программирования с применением шаблона проектирования MVP (Model-View-Presenter (Модель-Отображение-Представление)) [15, 18], а также методы реактивного программирования из библиотеки RxKotlin [19]. Схема решения представлена на рис. 1.

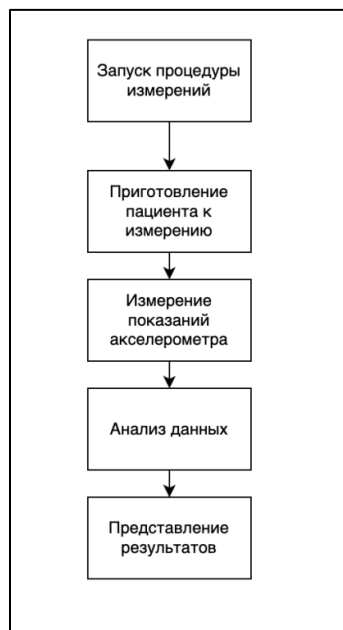


Рис. 1. Схема системы определения наличия дефектов мелкой моторики

Система определения дефектов мелкой моторики, выполнена в виде модуля и состоит из блока запуска процедуры измерений, блока приготовления пациента к измерению, блока измерения показаний акселерометра, блока анализа данных и блока представления результатов.

Блок запуска процедуры измерений работает следующим образом. Он обрабатывает нажатие пациентом кнопки запуска процедуры на графическом интерфейсе смартфона. Кнопка изображена на рис. 2.

Далее для определения дефектов мелкой моторики, пациенту предлагается выполнить следующее задание по удержанию смартфона:

- 1) пациент должен вытянуть руку со смартфоном вперед на уровне плеч, при этом он должен находиться либо в положении стоя, либо в положении сидя;
- 2) пациент должен расположить смартфон перпендикулярно полу, лицом к себе – это положение является исходным для проведения измерений;
- 3) пациент должен принять исходное положение в течение 3 секунд;
- 4) в течение 10 секунд пациент должен не изменять свое положение.

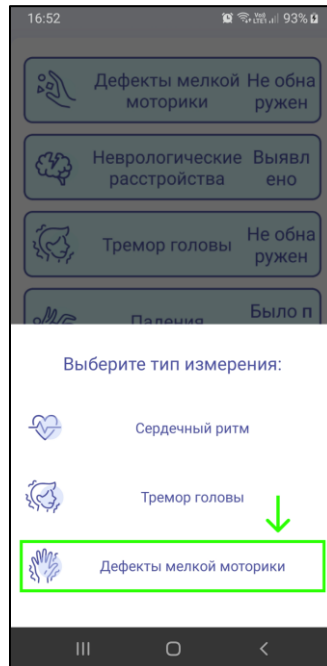


Рис. 2. Кнопка запуска процедуры измерений

Блок приготовления пациента к измерению дает пациенту время на принятие необходимого исходного положения для начала процедуры измерений, в соответствии с вышеописанным заданием, а именно в течении трех секунд.

Блок измерений показаний акселерометра выполняет чтение данных трехосевого акселерометра и предоставляет данные блоку анализа данных.

Блок анализа данных выполняет обработку результатов измерений, полученных с помощью трехосевого акселерометра при помощи алгоритма определения дефектов мелкой моторики. Структурная схема алгоритма определения дефектов мелкой моторики кистей рук по результатам выполнения задания представлена на рис. 3.

Алгоритм определения наличия дефектов мелкой моторики работает следующим образом:

1) данные акселерометра смартфона Android подаются на вход алгоритма, в них содержатся значения проекций ускорений по осям X, Y и Z, полученные с частотой 50 Гц, в соответствии с режимом SENSOR_DELAY_GAME;

2) выполняется корректировка значений проекций ускорений по оси Y: значения равные 0 заменяются на значения, близкие к нулю (0,000001), во избежания деления на ноль в формуле (2) и в формуле (3);

3) выполняется расчет отклонений вектора ускорения от оси Y акселерометра для всех показаний по формуле (2):

$$\alpha Y = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{a_x^2 + a_z^2}}{a_{y*}} \right), \quad (2)$$

где a_x – проекция ускорения на ось X акселерометра,
 a_z – проекция ускорения на ось Z акселерометра,
 a_{y*} – скорректированное значение проекции ускорения на ось Y.

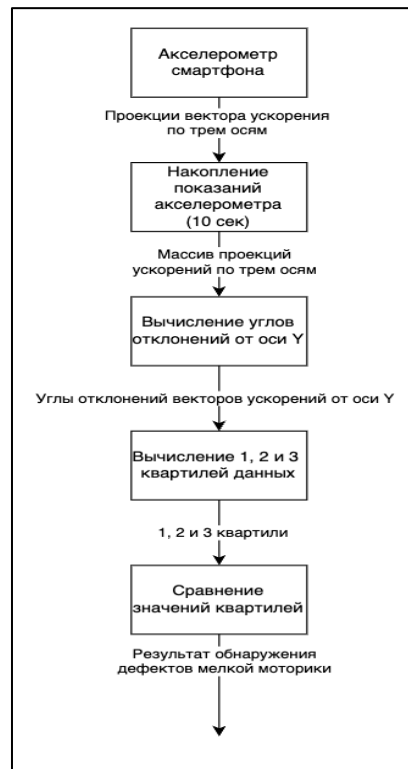


Рис. 3. Структурная схема алгоритма определения наличия дефектов мелкой моторики

Если значение проекции ускорения на ось X больше или равна 0, то расчет угла выполняется по формуле (3):

$$\alpha Y = -\tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{a_x^2 + a_z^2}}{a_y} \right). \quad (3).$$

Выбор оси Y обусловлен расположением датчиков акселерометра на смартфонах с ОС Android, который изображен на рис. 4.

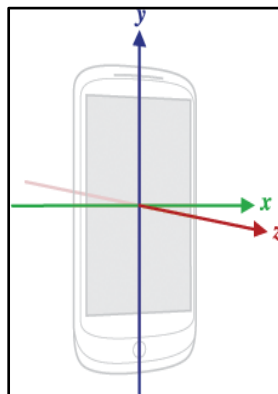


Рис. 4. Ориентация осей акселерометра смартфонов с ОС Android [6]

4) для полученных значений вычисляются 1, 2 и 3 основные квартили [16]. Для этого данные упорядочиваются в порядке возрастания.

5) для полученных квартилей выполняется проверка отклонений от пороговых значений. Если модуль разницы между значением первого основного квартиля и второго основного квартиля больше 20 или модуль разницы между значением третьего квартиля и второго квартиля больше 20, то фиксируется наличие дефектов мелкой моторики. В противном случае считается, что дефектов обнаружено не было. Пороговое значение определено эмпирическим путем.

Блок представления результата отображает на экране смартфона результат диагностики пользователя, а также выполняет отправку результатов на сервер хранения данных, который используется в рамках системы биомедицинского мониторинга.

Результаты испытаний. Для определения качества разработанного решения был проведен ряд испытаний. В качестве испытуемых приглашено 20 человек. Для испытаний использовалась клиент-серверная система. В качестве сервера выступал персональный компьютер Forsite (Intel® Core™ i9-9920X, NVIDIA Quadro RTX 6000; ОП 64 Гб; SSD 1Тб; клавиатура; мышь; монитор). Серверный персональный компьютер работал с СУБД PostgreSQL, в таблицы базы данных которого записывались результаты измерений посредством выполнения SQL запросов, получаемых от клиентского устройства. В качестве клиентских устройств использовались смартфоны моделей: Huawei nova 8i, Samsung A8 (2018), Xiaomi Mi 9 Lite, Redmi Note 9S, POCO X3 Pro, Samsung SM-A515F. На клиентских устройствах было установлено разработанное в рамках настоящей работы приложение. Каждый испытуемый проводил не менее 10 испытаний на обнаружение дефектов мелкой моторики. Результаты испытания представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты испытаний по метрике – ошибки 1 и 2 рода.

Показатель	α (ошибки 1 рода)	β (ошибки 2 рода)
Не обнаружен	0.05	0.09
Обнаружен	0.09	0.05

Обсуждение. Результаты испытаний разработанного алгоритма и его программной реализации позволяют сделать вывод о пригодности его использования для определения дефектов мелкой моторики. Стоит отметить, что в рамках данной работы рассматривались лишь дефекты с точки зрения выполнения задачи на удержание предмета в определенном неподвижном положении (удержание смартфона на вытянутой руке перпендикулярно полу, лицом к пациенту, в ладони) и скорости реакции для принятия исходного положения до начала проведения измерений. Полученное решение дает возможность самостоятельной предварительной (доврачебной) диагностики наличия дефектов мелкой моторики, в соответствии с разработанной методикой проведения измерений.

Выводы. Рассмотрев тему определения наличия дефектов мелкой моторики кисти, разработан алгоритм определения наличия дефектов мелкой моторики. Результаты испытаний показали, что при работе полученного решения уровень ошибок 1 рода составляет 0,05, а ошибок 2 рода 0,09. Предлагаемое решение может использоваться в качестве предварительного осмотра, результат которого помогает принять решение о необходимости обращения к специалисту в рамках системы биомедицинского мониторинга. Полученное решение так же может быть реализовано

вано на устройствах, работающих на операционной системе iOS. Дальнейшее развитие решения возможно в направлении использования других типов датчиков, при этом в ходе работы могут использоваться данные, как отдельно каждого датчика, так и в совокупности с использованием подходов sensor fusion, например, совместная обработка данных таких датчиков как гироскоп и видекамера. Также следующим этапом развития проекта предполагается разработка более сложных комплексов упражнений, направленных на проверку других аспектов мелкой моторики человека. Стоит отметить, что предложенное решение может служить базисом для разработки системы, выполняющей задачу развития мелкой моторики у пациентов и лечения после неврологических заболеваний.

Благодарность. Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета ("ПРИОРИТЕТ-2030").

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Axak N.* Разработка мультиагентной системы нейросетевой диагностики и удаленного мониторинга пациента // ВЕЖПТ. – 2016. – № 9 (82). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-multiagentnoy-sistemy-neyrosetevoy-dagnostiki-i-udalennogo-monitoringa-patsienta> (дата обращения: 22.04.2023).
2. A hand motion capture method based on infrared thermography for measuring fine motor skills in biomedicine // ScienceDirect. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0933365722002263> (дата обращения: 08.04.2023).
3. *Chandrasekaran V., Dantu R., Jonnada S., Thiagaraja S., Subbu K.* Cuffless Differential Blood Pressure Estimation Using Smart Phones // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 2013. – No. 60. – P. 1080-1089.
4. Image Classification Methods Applied in Immersive Environments for Fine Motor Skills Training in Early Education // EBSCO. – URL: <https://web.s.ebscohost.com/abstract?site=ehost&scope=site&jml=19891660&AN=140078842&h=b9CK%2f78tXjJg%2fm5DrFr6Df07B%2bbrUDwK4%2ftlx5aagyZ7wpshADB%2fgPhsVR6oZ%2bK3yBe%2bpaogj7A rpC8KNWg%3d%3d&crl=c&resultLocal=ErrCrlNoResults&resultNs=Ehost&crlhashurl=logi n.aspx%3fdirect%3dtrue%26profile%3dehost%26scope%3dsite%26authtype%3dcrawler%26j rnl%3d19891660%26AN%3d140078842> (дата обращения: 30.04.2023).
5. Quantitative assessment of fine motor skills in children using magnetic sensors // ScienceDirect. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0387760420301108> (дата обращения: 08.04.2023).
6. Sensors Overview // Developer Android. – URL: https://developer.android.com/guide/topics/sensors/sensors_overview (дата обращения: 08.04.2023).
7. *Богомолов А.И., Невежин В.П.* Мобильная персональная медицинская система для выявления предвестников кризиса сердечно-сосудистой системы // Хроноэкономика. – 2018. – № 4 (12). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mobilnaya-personalnaya-meditsinskaya-sistema-dlya-vyyavleniya-predvestnikov-krizisa-serdechno-sosudistoy-sistemy> (дата обращения: 22.04.2023).
8. *Блинова А.К., Добря М.Я.* Диагностика развития связной речи и мелкой моторики у детей старшего дошкольного возраста с общим недоразвитием речи III уровня // Форум молодых ученых. – 2018. – № 6-1 (22). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/diagnostika-razvitiya-svyaznoy-rechi-i-melkoy-motoriki-u-detey-starshego-doshkolnogo-vozrasta-s-obschim-nedorazvitiem-rechi-iii> (дата обращения: 30.04.2023).
9. *Бут-Гусаим В.В., Ярош А.С.* Методы оценки мелкой моторики и силы кисти у пациентов с центральными и периферическими парезами, возможности их использования // Журнал ГрГМУ. – 2017. – № 3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-otsenki-melkoy-motoriki-i-sily-kisti-u-patsientov-s-tsentralnymi-i-perifericheskimi-parezami-vozmozhnosti-ih-ispolzovaniya> (дата обращения: 29.09.2022).
10. *Гайдина Т.А., Дворникова Е.Г.* Эффективность использования оптической системы смартфона для оценки злокачественности меланоцитарных невусов // Вестник РГМУ. – 2020. – № 5. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/effektivnost-ispolzovaniya-opticheskoy-sistemy-smartfona-dlya-otsenki-zlokachestvennosti-melanotsitarnyh-nevusov> (дата обращения: 22.04.2023).

11. Гришкина Д.А. Оценка степени развития крупной моторики у детей первых трёх лет жизни по мюнхенской системе функциональной диагностики развития ребёнка // Кронос. – 2022. – № 4 (66). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-stepeni-razvitiya-kрупnoy-motoriki-u-detey-pervyh-tryoh-let-zhizni-po-myunhenskoy-sisteme-funktsionalnoy-diagnosticski> (дата обращения: 10.10.2022).
12. Гриффитс Д. Head First. Kotlin. – СПб.: Питер, 2020. – 464 с.
13. Калинин А.В., Борцов В.А., Симонов Д.С., Куликовская И.В., Романенко М.Ю., Зулин Я.В. Организация системы дистанционного мониторинга пациентов в условиях стационара на дому // Journal of Siberian Medical Sciences. – 2013. – № 6. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/organizatsiya-sistemy-distantsionnogo-monitoringa-patsientov-v-usloviyah-statsionara-na-domu> (дата обращения: 01.05.2023).
14. Маслешов Л.А. Разработка программной системы для тренировки двигательной активности и идентификации жестов мелкой моторики рук, считываемых с перчатки виртуальной реальности // Решетневские чтения. – 2015. – № 19. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-programmnoy-sistemy-dlya-trenirovki-dvigatelnoy-aktivnosti-i-identifikatsii-zhestov-melkoy-motoriki-ruk-schityvaemyh-s> (дата обращения: 20.09.2022).
15. Могу – реализация MVP под Android с щепоткой магии // Habr. – URL: <https://habr.com/ru/post/276189/> (дата обращения: 11.09.2022).
16. Сальникова К.В. Анализ массива данных с помощью инструмента визуализации «ящик с усами» // Universum: экономика и юриспруденция. – 2021. – № 6 (81). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiza-massiva-dannyh-s-pomoschyu-instrumenta-vizualizatsii-yaschik-s-usami> (дата обращения: 10.10.2022).
17. Федорович А.А., Горшков А.Ю., Королев А.И., Драпкина О.М. Смартфон в медицине – от справочника к диагностической системе. Обзор современного состояния вопроса // КВТиП. – 2022. – № 9. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/smartfon-v-meditsine-ot-spravochnika-k-diagnosticskoy-sisteme-obzor-sovremennogo-sostoyaniya-voprosa> (дата обращения: 17.04.2023).
18. Хаменюк В. Android Architecture Comparison: MVP vs. VIPER // KB URN resolver. – URL: <http://um.kb.se/resolve?um=um:nbn:se:lnu:diva-80819> (дата обращения: 11.09.2022).
19. Чакраборти Д. Reactive Programming in Kotlin. – Бирмингем: Packt Publishing, 2017. – 299 с.
20. Шавловская О.А. Способ оценки состояния двигательной функции кисти // Национальная электронная библиотека. – URL: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002371088_20091027_C1_RU/ (дата обращения: 08.04.2020).

REFERENCES

1. Axak N. Razrabotka mul'tiagentnoy sistemy neyrosetevoy diagnostiki i udalennogo monitoringa patsienta [Development of a multi-agent system for neural network diagnostics and remote patient monitoring], *VEZhPT* [East European Journal of Advanced Technologies], 2016, No. 9 (82). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-multiagentnoy-sistemy-neyrosetevoy-diagnosticski-i-udalennogo-monitoringa-patsienta> (accessed 22 April 2023).
2. A hand motion capture method based on infrared thermography for measuring fine motor skills in biomedicine, *ScienceDirect*. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0933365722002263> (accessed 08 April 2023).
3. Chandrasekaran V., Dantu R., Jonnada S., Thiagaraja S., Subbu K. Cuffless Differential Blood Pressure Estimation Using Smart Phones, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2013, No. 60, pp. 1080-1089.
4. Image Classification Methods Applied in Immersive Environments for Fine Motor Skills Training in Early Education, *EBSCO*. Available at: <https://web.s.ebscohost.com/abstract?site=ehost&scope=site&jrnl=19891660&AN=140078842&h=b9CK%2f78tXjJg%2fm5DrFr6Df07B%2brpUDwK4%2ft%2ftlx5aagyZ7wpshADB%2fgPhsVR6oZ%2bK3yBe%2bpaojg7ArpC8KNGw%3d%3d&url=c&resultLocal=ErrCrlNoResults&resultNs=Ehost&crlhashurl=logi n.aspx%3fdirect%3dtrue%26profile%3dehost%26scope%3dsite%26authype%3dcrawler%26j rnl%3d19891660%26AN%3d140078842> (accessed 30 April 2023).
5. Quantitative assessment of fine motor skills in children using magnetic sensors, *ScienceDirect*. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0387760420301108> (accessed 08 April 2023).

6. Sensors Overview, *Developer Android*. Available at: https://developer.android.com/guide/topics/sensors/sensors_overview (accessed 08 April 2023).
7. Bogomolov A.I., Nevezhin V.P. Mobil'naya personal'naya meditsinskaya sistema dlya vyavleniya predvestnikov krizisa serdechno- sosudistoy sistemy [Mobile personal medical system for identifying precursors of a crisis in the cardiovascular system], *Khronoekonomika* [Chronoeconomics], 2018, No. 4 (12). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/mobilnaya-personalnaya-meditsinskaya-sistema-dlya-vyyavleniya-predvestnikov-krizisa-serdechno-sosudistoy-sistemy> (accessed 22 April 2023).
8. Blinova A.K., Dobrya M.Ya. Diagnostika razvitiya svyaznoy rechi i melkoy motoriki u detey starshego doshkol'nogo vozrasta s obshchim nedorazvitiem rechi III urovnya [Diagnosis of the development of coherent speech and fine motor skills in children of senior preschool age with general speech underdevelopment of level III], *Forum molodykh uchenykh* [Forum of young scientists], 2018, No. 6-1 (22). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/diagnostika-razvitiya-svyaznoy-rechi-i-melkoy-motoriki-u-detey-starshego-doshkol'nogo-vozrasta-s-obshchim-nedorazvitiem-rechi-iii> (accessed 30 April 2023).
9. But-Gusaim V.V., Yarosh A.S. Metody otsenki melkoy motoriki i sily kisti u patsientov s tsentral'nymi i perifericheskimi parezami, vozmozhnosti ikh ispol'zovaniya [Methods for assessing fine motor skills and hand strength in patients with central and peripheral paresis, the possibilities of their use], *Zhurnal GrGMU* [Journal of GrSMU], 2017, No. 3. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-otsenki-melkoy-motoriki-i-sily-kisti-u-patsientov-s-tsentralnymi-i-perifericheskimi-parezami-vozmozhnosti-ih-ispolzovaniya> (accessed 29 September 2022).
10. Gaydina T.A., Dvornikova E.G. Effektivnost' ispol'zovaniya opticheskoy sistemy smartfona dlya otsenki zlokachestvennosti melanotsitarnykh nevusov [The effectiveness of using the optical system of a smartphone to assess the malignancy of melanocytic nevi], *Vestnik RGMU* [Bulletin of the Russian State Medical University], 2020, No. 5. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/effektivnost-ispolzovaniya-opticheskoy-sistemy-smartfona-dlya-otsenki-zlokachestvennosti-melanotsitarnykh-nevusov> (accessed 22 April 2023).
11. Grishkina D.A. Otsenka stepeni razvitiya krupnoy motoriki u detey pervykh trekh let zhizni po myunkhenskoy sisteme funktsional'noy diagnostiki razvitiya rebenka [Assessment of the degree of development of gross motor skills in children of the first three years of life according to the Munich system of functional diagnostics of child development], *Kronos* [Kronos], 2022, No. 4 (66). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-stepeni-razvitiya-kрупnoy-motoriki-u-detey-pervykh-trekh-let-zhizni-po-myunkhenskoy-sisteme-funktsional'noy-diagnostiki> (accessed 10 October 2022).
12. Griffiths D. Head First. Kotlin. Saint Petersburg: Piter, 2020, 464 p.
13. Kalinichenko A.V., Bortsov V.A., Simonov D.S., Kulikovskaya I.V., Romanenko M.Yu., Zulin Ya.V. Organizatsiya sistemy distantsionnogo monitoringa patsientov v usloviyakh statsionara na domu [Organization of a remote monitoring system for patients in a hospital setting at home], *Journal of Siberian Medical Sciences*, 2013, No. 6. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/organizatsiya-sistemy-distantsionnogo-monitoringa-patsientov-v-usloviyah-statsionara-na-domu> (accessed 01 May 2023).
14. Masleshov L.A. Razrabotka programmnoy sistemy dlya trenirovki dvigatel'noy aktivnosti i identifikatsii zhestov melkoy motoriki ruk, schityvaemykh s perchatki virtual'noy real'nosti [Development of a software system for training motor activity and identifying fine motor hand gestures read from a virtual reality glove], *Reshetnevskie chteniya* [Reshetnev Readings], 2015, No. 19. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-programmnoy-sistemy-dlya-trenirovki-dvigatel'noy-aktivnosti-i-identifikatsii-zhestov-melkoy-motoriki-ruk-schityvaemykh-s> (accessed 20 September 2022).
15. Moxy – realizatsiya MVP pod Android s shchepotkoy magii [Moxy – MVP implementation for Android with a pinch of magic], *Habr*. Available at: <https://habr.com/ru/post/276189/> (accessed 11 September 2022).
16. Sal'nikova K.V. Analiz massiva dannykh s pomoshch'yu instrumenta vizualizatsii «yashchik s usami» [Analysis of a data array using a “box with a mustache” visualization tool], *Universum: ekonomika i yurisprudentsiya* [Universum: экономика и юриспруденция], 2021, No. 6 (81). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiza-massiva-dannykh-s-pomoschyu-instrumenta-vizualizatsii-yashchik-s-usami> (accessed 10 October 2022).

17. *Fedorovich A.A., Gorshkov A.Yu., Korolev A.I., Drapkina O.M.* Smartfon v meditsine – ot spravochnika k diagnosticheskoy sisteme. Obzor sovremennogo sostoyaniya voprosa [Smartphone in medicine – from a reference book to a diagnostic system. Review of the current state of the issue], *KVTiP* [Cardiovascular therapy and prevention], 2022, No. 9. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/smartfon-v-meditsine-ot-spravochnika-k-diagnosticheskoy-sisteme-obzor-sovremennogo-sostoyaniya-voprosa> (accessed 17 April 2023).
18. *Khamenyuk V.* Android Architecture Comparison: MVP vs. VIPER, *KB URN resolver*. Available at: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:lnu:diva-80819> (accessed 11 September 2022).
19. *Chakraborti D.* Reactive Programming in Kotlin [Reactive Programming in Kotlin]. Birmingham: Packt Publishing, 2017, 299 p.
20. *Shavlovskaya O.A.* Sposob otsenki sostoyaniya dvigatel'noy funktsii kisti [Method for assessing the state of motor function of the hand], *Natsional'naya elektronnyaya biblioteka* [National Electronic Library]. Available at: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002371088_20091027_C1_RU/ (accessed 08 April 2020).

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

Егорчев Антон Александрович – Казанский (Приволжский) федеральный университет; e-mail: eanton090@gmail.com; г. Казань, Россия; тел.: +78432337609; к.т.н.; зам. директора по общим вопросам Института вычислительной математики и информационных технологий.

Чикрин Дмитрий Евгеньевич – e-mail: dmitry.kfu@ya.ru; тел.: +78432337037; д.т.н.; директор Института вычислительной математики и информационных технологий.

Пашин Дмитрий Михайлович – e-mail: dmitry.m.pashin@gmail.com; тел.: +78432337871; д.т.н., проректор по цифровой трансформации и инновационной деятельности.

Фахрутдинов Адель Фердинандович – e-mail: timvaz@yandex.ru; тел.: +79872934153; ведущий инженер-программист сектора высокоуровневой разработки Научно-исследовательского центра «Центр превосходства Специальная робототехника и искусственный интеллект» Института вычислительной математики и информационных технологий.

Кокунин Петр Анатольевич – e-mail: pkokunin@mail.ru; тел.: +79178732217; к.т.н.; ведущий научный сотрудник лаборатории медицинского интернета вещей Института вычислительной математики и информационных технологий.

Egorchev Anton Aleksandrovich – Kazan (Volga Region) Federal University; e-mail: eanton090@gmail.com; Kazan, Russia; phone: +78432337609; cand. of eng. sc., deputy director for general affairs of the Institute of computer mathematics and information technologies.

Chickrin Dmitry Evgenevich – e-mail: dmitry.kfu@ya.ru; phone: +78432337037; dr. of eng. sc. director of the Institute of computer mathematics and information technologies.

Pashin Dmitry Mikhailovich – e-mail: dmitry.m.pashin@gmail.com; phone: +78432337871; dr. of eng. sc.; vice-rector for digital transformation and innovation.

Fahrutdinov Adel Ferdinandovich – e-mail: timvaz@yandex.ru; phone: +79872934153; Leading engineer-programmer of the high-level development sector of the Research center "Center of excellence special robotics and artificial intelligence" of the Institute of computer mathematics and information technologies.

Kokunin Petr Anatolevich – e-mail: pkokunin@mail.ru; phone: +79178732217; cand. of eng. sc.; leading researcher at the Laboratory of the medical internet of things of the Institute of computer mathematics and information technologies.

Л.К. Бабенко, И.Д. Русаловский

ПОБИТОВЫЕ ГОМОМОРФНЫЕ ОПЕРАЦИИ НАД ЧИСЛАМИ С ПЛАВАЮЩЕЙ ТОЧКОЙ*

Гомоморфная криптография – это особый вид криптографии, который позволяет выполнять операции над зашифрованными данными без их предварительной расшифровки. Благодаря этим особенностям гомоморфная криптография может эффективно применяться для выполнения безопасных облачных вычислений. Для решения различных прикладных задач требуется поддержка всех математических операций, а также поддержка рациональных чисел, чтобы эффективно реализовать операцию деления и снизить потери точности во время округлений результата. Также для повышения точности вычислений необходимо использовать числа в формате с плавающей точкой, однако эта тема недостаточно проработана. Поддержка всех арифметических и логических операций в рамках одной схемы гомоморфного шифрования позволит выполнить гомоморфную реализацию практически любого алгоритма обработки данных, а представление чисел в формате с плавающей точкой позволит повысить точность вычислений и максимальную размерность обрабатываемых данных при том же объеме потребляемой памяти, если сравнивать с побитовым гомоморфным алгоритмом над целыми числами. К примеру, для решения СЛАУ методом Гаусса необходима поддержка операций разности, умножения, деления и сравнения чисел, а также необходимо представлять числа в формате с плавающей точкой, иначе во время обратного хода после каждой операции деления будет возникать округление результата, и ошибка будет накапливаться. В данной статье рассматривается возможность выполнения гомоморфных побитовых операций над числами в формате с плавающей точкой. Рассматривается наиболее распространенный формат представления чисел в формате с плавающей точкой – IEEE 754. Рассматриваются альтернативные решения для гомоморфной обработки рациональных чисел. Выполнен анализ возможности реализации побитовых гомоморфных арифметических операций – сложения, разности, умножения и деления, над зашифрованными гомоморфно числами в формате с плавающей точкой. Анализируются сложности, возникающие при реализации гомоморфных арифметических операций, рассматриваются способы их решения и приводятся результирующие алгоритмы над гомоморфно зашифрованными данными. Выполняется анализ полученных результатов и даются рекомендации касательно выбора способа представления гомоморфно зашифрованных данных в зависимости от решаемой задачи.

Гомоморфное шифрование; криптографическая защита; методы и алгоритмы; числа в формате с плавающей точкой; стандарт IEEE 754.

L.K. Babenko, I.D. Rusalovsky

BITWISE HOMOMORPHIC OPERATIONS ON FLOATING POINT NUMBERS

Homomorphic cryptography is a special kind of cryptography that allows you to perform operations on encrypted data without first decrypting it. Due these features, homomorphic cryptography can be effectively used to perform secure cloud computing. To solve various applied problems, support for all mathematical operations is required, as well as support for rational numbers in order to effectively implement the division operation and reduce the loss of accuracy during rounding of the result. Also, to improve the accuracy of calculations, it is necessary to use numbers in floating point format, but this topic has not been sufficiently researched. Support for all arithmetic and logical operations within a single homomorphic encryption scheme will allow us to perform a homomorphic implementation of almost any data processing algorithm, and the representation of numbers in floating point format will improve the accuracy of calculations and the maximum dimension of the processed data with the same amount of memory consumed, when compared with bitwise homomorphic

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90140.

algorithm over integers. For example, to solve SLAE by the Gaussian method, it is necessary to support the operations of difference, multiplication, division, and comparison of numbers, and it is also necessary to represent numbers in floating point format, otherwise, during the back substitution after each division operation, rounding of the result will occur, and the error will accumulate. This article discusses the possibility of performing homomorphic bitwise operations on numbers in floating point format. The most common floating-point representation format, IEEE 754, is considered. Alternative solutions for homomorphic processing of rational numbers are considered. An analysis is made of the possibility of implementing bitwise homomorphic arithmetic operations - addition, difference, multiplication and division, over homomorphically encrypted numbers in floating point format. Difficulties arising in the implementation of homomorphic arithmetic operations are analyzed, methods for solving them are considered, and the resulting algorithms for homomorphically encrypted data are presented. The analysis of the results obtained is carried out and recommendations are given regarding the choice of a method for representing homomorphically encrypted data, depending on the problem being solved.

Homomorphic encryption; cryptographic protection; methods and algorithms; floating point numbers; IEEE 754 standard.

Введение. Гомоморфная криптография – это особый вид криптографии, позволяющий выполнять операции над зашифрованными данными без их предварительной расшифровки [1–11]. В общем виде гомоморфную криптографию можно представить следующим образом. Пусть $E(m)$ – некоторая функция шифрования, $D(c)$ – функция расшифрования, обратная функции E , где m – открытые данные, c – зашифрованные данные. Функция E называется гомоморфной относительно некоторой операции op над открытыми данными, если существует эффективный алгоритм M , который удовлетворяет условию:

$$m_1 \text{ op } m_2 = D(M(E(m_1), E(m_2))). \quad (1)$$

Благодаря своим особенностям гомоморфная криптография может эффективно использоваться в следующих сферах:

- ◆ Облачные вычисления.
- ◆ Облачная обработка изображений.
- ◆ Электронное голосование (выборы).
- ◆ Защищенный поиск информации.

Применение гомоморфного шифрования в облачных сервисах [12–17] гарантирует, что данные не будут перехвачены даже в случае подмены сервера, т.к. они остаются зашифрованными на протяжении всего процесса передачи и обработки, а к секретному ключу имеет доступ только пользователь. Благодаря этому повышается уровень защищенности конфиденциальных данных и, как следствие, повышается уровень доверия пользователей к облачным технологиям.

На данный момент гомоморфная криптография только начинает свое развитие, для эффективного применения на практике необходима разработка методов и средств гомоморфной криптографии, с помощью которых будет возможно выполнение гомоморфных реализаций для различных алгоритмов обработки данных, применяемых для решения прикладных задач. К примеру, одной из таких задач в вычислительной алгебре является задача решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Для эффективного решения многих прикладных задач необходима поддержка чисел с плавающей точкой для повышения точности вычислений, а также необходима поддержка всех возможных арифметических и логических операций, что позволит выполнить гомоморфную реализацию практически любого алгоритма. Однако существующие схемы гомоморфного шифрования не предоставляют эффективное решение данной проблемы, поэтому актуальна разработка схемы шифрования или метода, который позволит эффективно выполнять арифметические и логические операции над числами в формате с плавающей точкой.

Альтернативные решения. Битовые операции над целыми. Как было рассмотрено в предыдущей статье [18–19], возможно преобразовать алгоритм над целыми числами в алгоритм над дробными числами с низкой точностью вычислений. Предположим, что дано целое число m , алгоритм шифрования Enc , алгоритм расшифрования Dec , гомоморфная реализация операций сложения, разности, умножения и деления. Тогда для поддержки дробных чисел можно ввести дополнительный коэффициент k , равный 10^n , где n - число знаков после запятой, определяющее точность вычислений. Перед шифрованием число умножается на этот коэффициент, а также после каждой операции результат корректируется с учетом этого коэффициента.

Умножение:

$$c_1 \otimes c_2 = \frac{Enc(m_1 * k) \otimes Enc(m_2 * k)}{Enc(k)} = Enc(m_1 * m_2 * k). \quad (2)$$

Сумма и разность:

$$c_1 \oplus c_2 = Enc(m_1 * k) \oplus Enc(m_2 * k) = Enc((m_1 + m_2) * k). \quad (3)$$

Деление:

$$c_1 / c_2 = \frac{Enc(m_1 * k)}{Enc(m_2 * k)} * Enc(k) = Enc\left(\frac{m_1}{m_2} * k\right). \quad (4)$$

После расшифровки необходимо разделить полученный результат на коэффициент и будет получен результат выполнения операций в виде рационального числа. Это достаточно простой в реализации и гибкий подход, подходящий для любого полностью гомоморфного алгоритма над целыми числами, однако точность вычислений намного ниже, чем в случае использования представления чисел с плавающей точкой.

Альтернативные решения. Схемы с поддержкой рациональных чисел. На данный момент разработаны различные схемы полностью гомоморфного шифрования, а на их базе выполнены программные реализации [8]. Рассмотрим наиболее популярные из них:

- ◆ BGV, поддерживает обработку целых чисел.
- ◆ BFV, поддерживает обработку целых чисел.
- ◆ CKKS, поддерживает обработку вещественных чисел.

Наибольший интерес в нашем анализе представляет схема CKKS, так как поддерживает обработку вещественных чисел. Кроме того, схема позволяет вычислять и трансцендентные функции (экспонента, логарифм и т.д.) с помощью разложения в ряд Тейлора. Однако получаемый после расшифровки результат является приближенным и имеет достаточно большую погрешность, что не позволяет использовать данную схему в задачах, где требуется высокая точность вычислений. Также использование вышеописанных алгоритмов не позволяет выполнять логические операции над шифротекстами, что может быть необходимо в рамках решения прикладных задач.

Представление чисел в ЭВМ. В современных ЭВМ числа с плавающей точкой, как правило, представляются в прямом коде в виде мантиссы и порядка. Перед записью в память числа нормализуются, а для экономии места первая значащая единица мантиссы не записывается, но подразумевается. Один из наиболее распространенных форматов представления чисел с плавающей точкой – IEEE 754 [20]. Кроме представления самих чисел стандарт имеет несколько особых значений, отражающих ошибки при выполнении вычислений. Как правило в программных комплексах используются форматы представления чисел одинарной точности (32 бита) и двойной точности (64 бита). Однако также встречаются кратные реализации – половинная точность (16 бит), четверная точность (128 бит) и так далее.

Рассмотрим в качестве примера представление числа в половинной точности. Другие форматы представляются абсолютно аналогично, однако имеют другую размерность составляющих. Стандарт определяет для числа с плавающей точкой половинной точности следующий формат:

- ◆ Общая размерность – 16 бит.
- ◆ Знаковый бит – 1 бит.
- ◆ Смещенный порядок – 5 бит.
- ◆ Мантисса – 10 бит. При этом за счет неявной единицы точность составляет 11 бит.
- ◆ Знаковый бит определяет знак числа. 0 – положительное число, 1 – отрицательное.

Смещенный порядок – это значение порядка минус смещение. Смещение вводится специально, чтобы не вводить еще один бит знака. Смещение порядка равно половине максимального значения, например для числа половинной точности оно равно 01111_2 . При этом значения смещенного порядка 00000_2 и 11111_2 – это специальные значения, используемые для представления специальных чисел (табл. 1).

Таблица 1

Значения чисел в формате половинной точности в стандарте IEEE 754

Порядок	Мантисса = 0	Мантисса $\neq 0$
00000_2	+0 и -0	Денормализованные числа
$00001_2 \dots 11110_2$	Нормализованные числа	
11111_2	$\pm\infty$	NaN («не число»)

Мантисса имеет неявный старший бит равный 1, если только смещенный порядок не равен 0. Это позволяет дополнительно увеличить точность до 11 бит, в то время как явно в памяти хранятся только 10 бит.

К примеру, представим числа 1.99 и -2.5 в данном формате:

$$1.99_{10} = 1.1111110101_2 = 1.1111110101_2 * 100 = 0\ 01111\ 1111110101.$$

$$-2.5_{10} = -10.1_2 = -1.01 * 101 = 1\ 10000\ 0100000000.$$

Рассмотрим выполнение основных арифметических операций над числами в формате с плавающей точкой.

Сложение и вычитание. Пусть m – мантисса, e – смещенный порядок, тогда сложение и вычитание чисел в формате с плавающей точкой выполняется по следующему алгоритму:

1. Вычисляем разницу порядков $p = p_1 - p_2$.
2. Если порядки равны и разность равна 0, переходим к следующему шагу, иначе выполняем выравнивание порядков. Для выравнивания порядков нужно мантиссу числа с меньшим порядком сдвинуть вправо на абсолютное значение разницы порядков $|p|$. Сдвинутые младшие разряды при этом теряются.
3. После выравнивания порядков можно выполнить требуемую операцию над мантиссами с учетом знака числа.
4. Полученное значение мантиссы нормализуется при необходимости.
5. Порядок результата берется равным большему порядку чисел.
6. Нормализовать результат при необходимости.

Умножение и деление. Пусть m – мантисса, e – смещенный порядок, тогда сложение и вычитание чисел в формате с плавающей точкой выполняется по следующему алгоритму:

1. При делении необходимо найти разницу порядков, при умножении – сумму.
2. Мантиссы необходимо умножить/разделить.
3. Нормализовать результат при необходимости.

Гомоморфная реализация. Ввиду того, что числа с плавающей точкой представляются в виде целочисленных мантиссы и порядка, их можно реализовать гомоморфно, зашифровав побитно с помощью полностью гомоморфного алгоритма шифрования над битами. Выполним анализ данного подхода.

Шифрование. Для шифрования представим шифруемое число в двоичном виде в формате с плавающей точкой. Каждый бит исходного числа шифруется с помощью полностью гомоморфного алгоритма шифрования над битами. Полученный массив зашифрованных битов является шифротекстом.

Расшифрование. Чтобы расшифровать шифротекст, необходимо применить к нему обратное преобразование. Каждый зашифрованный бит расшифровать с помощью полностью гомоморфного алгоритма шифрования над битами, полученный массив битов и будет открытым текстом в двоичном виде в формате с плавающей точкой. При необходимости полученный результат можно перевести в десятичную дробь.

Логические операции. Так как мантиссы нормализованы, определить равенство чисел можно сравнив все биты между собой. Сравнить числа на больше/меньше также возможно, если сравнить раздельно их порядки и мантиссы как целые числа [18–19].

Арифметические операции. Все операции над числами в формате с плавающей точкой состоят из операций над целочисленными порядком и мантиссой, следовательно, легко могут быть реализованы через битовые операции. Однако сложности возникают с операциями нормализации и приведения чисел к одной степени. Сложность заключается в том, что данные обрабатываются в зашифрованном виде, а управляющий алгоритм не имеет к ним доступа. Из-за этого он должен обрабатывать данные “вслепую” и должен корректно обработать любой возможный результат. Можно получить, к примеру, разницу степеней двух чисел, но эта разница будет в зашифрованном виде и воспользоваться ей для определения величины сдвига или числа итераций не получится. Рассмотрим каждую из этих операций подробнее.

Приведение чисел к одной степени. Данная операция осложнена тем, что и мантиссы, и порядки зашифрованы и управляющий алгоритм не знает, сколько раз ему нужно повторить сдвиг или в какой момент нужно остановиться. Поэтому понадобится найти модуль разницы степеней, а после этого циклически сдвигать меньшее из чисел вправо на один разряд и уменьшать разницу степеней на 1, пока степень не достигнет нуля. Так как значение разницы степеней неизвестно, необходимо рассматривать худший вариант - сдвиг мантиссы на максимальное число ее разрядов. Чем больше бит выделено на мантиссу, тем выше сложность данной операции.

Нормализация результата вычислений. В результате выполнения операций над мантиссами может получиться ненормализованный результат. Так как данные зашифрованы, мы не можем определить факт возникновения ненормализованного результата, поэтому нужно выполнять нормализацию после каждой операции. Однако можно предугадать диапазон отклонения числа после выполнения операции и упростить нормализацию для некоторых арифметических операций. Известно, что нормализованное число имеет формат 1.xxx в двоичном виде, а также может быть нулевым, т.е. находится в диапазоне 0 ИЛИ $[1...2)$ в десятичном виде.

Сложение и разность. Обе данные операции в результате сводятся к операции суммы чисел, которые могут иметь одну из четырех комбинаций знаков. В случае, если суммируются два числа с одним знаком, результат не может уменьшиться, а может только увеличиться на один разряд за счет переноса в старший разряд, а модуль результата будет в диапазоне 0 ИЛИ $[1...4)$. Если же склады-

ваются числа с разными знаками, то модуль результата может быть в диапазоне $[0...2)$. Таким образом, при выполнении операции необходимо учитывать возможное переполнение на 1 бит. Для нормализации необходимо проверить, что она требуется, сравнив старший бит с единицей – если старший бит равен единице, а бит переполнения равен нулю, то число уже нормализовано. Иначе его необходимо либо сдвинуть вправо на 1 разряд, либо влево на n разрядов, пока в старший разряд не будет смещена единица. Над зашифрованными данными алгоритм будет иметь следующий вид. Пусть мантисса имеет n бит в памяти, старший единичный бит не записывается явно, бит переноса p . Тогда для нормализации числа необходимо:

1. Вычисляем бит, указывающий на необходимость нормализации $e = p$.
2. Сдвигаем число вправо на 1 разряд. Записываем в результат $(\gg t \wedge e) \vee (t \wedge \bar{e})$. Прибавляем к степени e . Обнуляем бит переноса.
3. Устанавливаем индекс цикла $i = 0$
4. Вычисляем бит, указывающий на необходимость нормализации $e = \overline{m_n}$
5. Сдвигаем число влево на 1 разряд. Записываем в число $(\ll t \wedge e) \vee (t \wedge \bar{e})$. Вычитаем из степени e .
6. Если $i < n$, возвращаемся к шагу 3, иначе завершаем алгоритм.

Умножение. Модуль произведения будет находиться в диапазоне 0 ИЛИ [1, 4). Поэтому при нормализации достаточно учесть бит переноса. Алгоритм нормализации будет иметь вид:

1. Вычисляем бит, указывающий на необходимость нормализации $e = p$.
2. Сдвигаем число вправо на 1 разряд. Записываем в число $(\gg t \wedge e) \vee (t \wedge \bar{e})$. Прибавляем к степени e . Обнуляем бит переноса.

Деление. Модуль частного будет находиться в диапазоне 0 или $(0,5...2)$ или бесконечность. Таким образом, если в результате деления не была получена бесконечность или ноль, то результат достаточно сдвинуть 1 раз вправо, чтобы нормализовать. Ноль и бесконечность – особые значения, при которых мантисса равна нулю. Таким образом алгоритм нормализации будет иметь вид:

1. Вычисляем бит, указывающий на необходимость нормализации $e = \overline{m_n} \wedge M \neq 0$.
2. Сдвигаем число влево на 1 разряд. Записываем в число $(\ll t \wedge e) \vee (t \wedge \bar{e})$. Вычитаем из степени e .

Заключение. В данной статье была рассмотрена возможность выполнения побитовых гомоморфных операций над числами в формате с плавающей точкой. Так как число в формате с плавающей точкой представляется в виде целочисленных мантиссы и порядка, его можно побитно зашифровать гомоморфно с применением полностью гомоморфного алгоритма шифрования над битами. Данное представление чисел позволит:

- ♦ расширить диапазон обрабатываемых чисел при той же размерности в битах.
- ♦ повысить точность вычислений.

Однако подобное представление чисел значительно увеличит сложность вычислений, особенно сложность сложения и разности, так как для выполнения этих операций необходимо выполнять две трудоемких операции – приведение чисел к одному порядку и нормализацию. Операции же умножения и деления будут усложнены незначительно, так как результат этих операций может незначительно отклоняться от нормализованного значения и операция нормализации достаточно проста. Поэтому имеет смысл выбирать представление чисел на основе задачи, которую необходимо решить. Если в процессе вычислений потребуются большое число операций сложения и разности, а точность вычислений не очень важна, то стоит воспользоваться целочисленным представлением чисел. Также можно добавить сдвиг к целочисленному представлению, если требуется поддержка дробных

чисел. В обратном случае, если требуется высокая точность, большая размерность обрабатываемых чисел, то имеет смысл воспользоваться представлением с плавающей точкой, несмотря на повышение трудоемкости выполнения операций сложения и разности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бабенко М.Г., Голимблевская Е.И., Ширяев Е.М.* Сравнительный анализ алгоритмов гомоморфного шифрования на основе обучения с ошибками // Тр. института системного программирования РАН. – 2020. – Т. 8, № 2. – С. 37-52.
2. *Бабенко Л.К., Русаловский И.Д.* Библиотека полностью гомоморфного шифрования целых чисел // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 2. – С. 79-88.
3. *Бабенко Л.К., Русаловский И.Д.* Метод реализации гомоморфного деления // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 4. – С. 212-221.
4. *Бабенко Л.К., Трепачева А.В.* О нестойкости двух симметричных гомоморфных криптосистем, основанных на системе остаточных классов // Труды Института системного программирования РАН. – 2019. – Т. 18, № 1. – С. 230-262.
5. *Аракелов Г.Г.* Вопросы применения прикладной гомоморфной криптографии // Вопросы кибербезопасности. – 2019. – № 5 (33). – С. 70-74.
6. *Шачина В.А.* Гомоморфная криптография в базах данных // Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук: Матер. V Международной научно-практической конференции (школы-семинара) молодых ученых, Тольятти, 22–24 апреля 2019 года. – 2019. – С. 468-473.
7. *Трусова Ю.О., Вовк Н.Н., Анисимов Ю.А.* Увеличение скорости гомоморфного шифрования на основе криптосистемы Эль-Гамала // Математика и математическое моделирование: Сб. материалов XIII Всероссийской молодежной научно-инновационной школы, Саратов, 02–04 апреля 2019 года. – 2019. – С. 97-98.
8. *Гаража А.А., Герасимов И.Ю., Николаев М.В., Чижов И.В.* Об использовании библиотек полностью гомоморфного шифрования // International Journal of Open Information Technologies. – 2021. – Т. 9, № 3. – С. 11-22.
9. *Волянский Ю.* Усовершенствование системы поиска опасных слов с использованием гомоморфного шифрования // Инновации. Наука. Образование. – 2021. – № 38. – С. 687-695.
10. *Аракелов Г.Г., Михалев А.В.* Комбинация частично гомоморфных схем // Электронные информационные системы. – 2020. – № 3 (26). – С. 83-92.
11. *Ширяев Е.М., Сотникова Н.А., Ващенко И.С., Кучуков В.А.* Исследование производительности полностью гомоморфного шифрования для задач видеобработки // Наука и инновации в XXI веке: актуальные вопросы, открытия и достижения: Сб. статей XXII Международной научно-практической конференции, Пенза, 12 декабря 2020 года. – 2020. – С. 57-59.
12. *Петренко А.С.* О реализации полностью гомоморфной криптосистемы Джентри-Халеви-Смарт // The 2019 Symposium on Cybersecurity of the Digital Economy - CDE'19: Третья международная научно-техническая конференция, Казань, 22–24 мая 2019 года. – 2019. – С. 272-275.
13. *Петренко А.С.* О реализации частично гомоморфной криптосистемы Пэйе // The 2019 Symposium on Cybersecurity of the Digital Economy - CDE'19: третья международная научно-техническая конференция, Казань, 22–24 мая 2019 года. – 2019. – С. 269-271.
14. *Минаков С.С.* Основные криптографические механизмы защиты данных, передаваемых в облачные сервисы и сети хранения данных // Вопросы кибербезопасности. – 2020. – № 3 (37). – С. 66-75.
15. *Дерябин М.А., Кучеров Н.Н.* Обзор безопасных методов шифрования для облачных вычислений // Новости науки в АПК. – 2019. – № 3 (12). – С. 298-303.
16. *Бабенко Л.К., Шумилин А.С., Алексеев Д.М.* Алгоритм обеспечения защиты конфиденциальных данных облачной медицинской информационной системы // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 5 (222). – С. 120-134.
17. *Мартишин С.А., Храпченко М.В.* Основные подходы к работе с конфиденциальными данными в облачных вычислениях // Образование. Технологии. Качество: Матер. V Всероссийской научно-практической конференции, Саратов, 26 марта 2021 года. – 2021. – С. 125-129.

18. Babenko Liudmila, Rusalovsky Ilya. Homomorphic operations on integers via operations on bits // Proceedings - 2022 15th International Conference on Security of Information and Networks, SIN 2022. – 2022.
19. Русаловский И.Д., Бабенко Л.К., Макаревич О.Б. Разработка методов гомоморфного деления // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 4 (228). – С. 103-112.
20. IEEE Standard for Floating-Point Arithmetic, IEEE Computer Society, IEEE Std 754, 2019.

REFERENCES

1. Babenko M.G., Golimblevskaya E.I., Shiryayev E.M. Sravnitel'nyy analiz algoritmov gomomorfnoy shifrovaniya na osnove obucheniya s oshibkami [Comparative analysis of homomorphic encryption algorithms based on learning with errors], *Tr. instituta sistemnogo programmirovaniya RAN* [Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS], 2020, Vol. 8, No. 2, pp. 37-52.
2. Babenko L.K., Rusalovskiy I.D. Biblioteka polnost'yu gomomorfnoy shifrovaniya tselykh chisel [Library of fully homomorphic encryption of integer numbers], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 2, pp. 79-88.
3. Babenko L.K., Rusalovskiy I.D. Metod realizatsii gomomorfnoy deleniya [Method for implementing homomorphic division], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 4, pp. 212-221.
4. Babenko L.K., Trepacheva A.V. O nestoykosti dvukh simmetrichnykh gomomorfnykh kriptosistem, osnovannykh na sisteme ostatochnykh klassov [On the instability of two symmetric homomorphic cryptosystems based on a system of residual classes], *Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN* [Proceedings of the Institute of System Programming of the Russian Academy of Sciences], 2019, Vol. 18, No. 1, pp. 230-262.
5. Arakelov G.G. Voprosy primeneniya prikladnoy gomomorfnoy kriptografii [Issues of application of applied homomorphic cryptography], *Voprosy kiberbezopasnosti* [Cybersecurity issues], 2019, No. 5 (33), pp. 70-74.
6. Shachina V.A. Gomomorfnaia kriptografiya v bazakh dannykh [Homomorphic cryptography in databases], *Prikladnaya matematika i informatika: sovremennyye issledovaniya v oblasti estestvennykh i tekhnicheskikh nauk: Mater. V Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (shkoly-seminara) molodykh uchennykh, Tol'yatti, 22–24 aprelya 2019 goda* [Applied mathematics and computer science: modern research in the field of natural and technical sciences: Proceedings of the V International scientific and practical conference (school-seminar) of young scientists, Tolyatti, April 22–24, 2019], 2019, pp. 468-473.
7. Trusova Yu.O., Vovk N.N., Anisimov Yu.A. Uvelichenie skorosti gomomorfnoy shifrovaniya na osnove kriptosistemy El'-Gamalya [Increasing the speed of homomorphic encryption based on the El-Gamal cryptosystem], *Matematika i matematicheskoe modelirovanie: Sb. materialov XIII Vserossiyskoy molodezhnoy nauchno-innovatsionnoy shkoly, Sarov, 02–04 aprelya 2019 goda* [Mathematics and mathematical modeling: Collection of materials of the XIII All-Russian Youth Scientific and Innovation School, Sarov, April 02–04, 2019], 2019, pp. 97-98.
8. Garazha A.A., Gerasimov I.Yu., Nikolaev M.V., Chizhov I.V. Ob ispol'zovanii bibliotek polnost'yu gomomorfnoy shifrovaniya [On the use of fully homomorphic encryption libraries], *International Journal of Open Information Technologies*, 2021, Vol. 9, No. 3, pp. 11-22.
9. Volyanskiy Yu. Uovershenstvovanie sistemy poiska opasnykh slov s ispol'zovaniem gomomorfnoy shifrovaniya [Improving the search system for dangerous words using homomorphic encryption], *Innovatsii. Nauka. Obrazovanie* [Innovations. The science. Education], 2021, No. 38, pp. 687-695.
10. Arakelov G.G., Mikhalev A.V. Kombinatsiya chastichno gomomorfnykh skhem [Combination of partially homomorphic schemes], *Elektronnyye informatsionnyye sistemy* [Electronic information systems], 2020, No. 3 (26), pp. 83-92.
11. Shiryayev E.M., Sotnikova N.A., Vashchenko I.S., Kuchukov V.A. Issledovanie proizvoditel'nosti polnost'yu gomomorfnoy shifrovaniya dlya zadach videoobrabotki [Study of the performance of fully homomorphic encryption for video processing tasks], *Nauka i innovatsii v XXI veke: aktual'nye voprosy, otkrytiya i dostizheniya: Sb. statey XXII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Penza, 12 dekabrya 2020 goda* [Science and innovation in the 21st century: current issues, discoveries and achievements: Collection of articles of the XXII International Scientific and Practical Conference, Penza, December 12, 2020], 2020, pp. 57-59.

12. Petrenko A.S. O realizatsii polnost'yu gomomorfnoy kriptosistemy Dzhentri-Khalevi-Smarta [On the implementation of a fully homomorphic Gentry-Halevi-Smart cryptosystem], *The 2019 Symposium on Cybersecurity of the Digital Economy - CDE'19: Tret'ya mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya, Kazan', 22–24 maya 2019 goda* [The 2019 Symposium on Cybersecurity of the Digital Economy - CDE'19: Third International Scientific and Technical Conference, Kazan, May 22–24, 2019], 2019, pp. 272-275.
13. Petrenko A.S. O realizatsii chastichno gomomorfnoy kriptosistemy Payeu [On the implementation of the partially homomorphic Payeu cryptosystem], *The 2019 Symposium on Cybersecurity of the Digital Economy - CDE'19: tret'ya mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya, Kazan', 22–24 maya 2019 goda* [The 2019 Symposium on Cybersecurity of the Digital Economy - CDE'19: third international scientific and technical conference, Kazan, May 22–24, 2019], 2019, pp. 269-271.
14. Minakov S.S. Osnovnye kriptograficheskie mekhanizmy zashchity dannykh, peredavaemykh v oblachnyye servisy i seti khraneniya dannykh [Basic cryptographic mechanisms for protecting data transmitted to cloud services and data storage networks], *Voprosy kiberbezopasnosti* [Issues of cybersecurity], 2020, No. 3 (37), pp. 66-75.
15. Deryabin M.A., Kuchеров N.N. Obzor bezopasnykh metodov shifrovaniya dlya oblachnykh vychisleniy [Review of secure encryption methods for cloud computing], *Novosti nauki v APK* [Science news in agro-industrial complex], 2019, No. 3 (12), pp. 298-303.
16. Babenko L.K., SHumilin A.S., Alekseev D.M. Algoritм obespecheniya zashchity konfidentsial'nykh dannykh oblachnoy meditsinskoy informatsionnoy sistemy [Algorithm for ensuring the protection of confidential data of a cloud medical information system], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. 5 (222), pp. 120-134.
17. Martishin S.A., Khrapchenko M.V. Osnovnye podkhody k rabote s konfidentsial'nymi dannymi v oblachnykh vychisleniyakh [Basic approaches to working with confidential data in cloud computing], *Obrazovanie. Tekhnologii. Kachestvo: Mater. V Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Saratov, 26 marta 2021 goda* [Education. Technologies. Quality: Materials of the V All-Russian Scientific and Practical Conference, Saratov, March 26, 2021], 2021, pp. 125-129.
18. Babenko Liudmila, Rusalovsky Ilya. Homomorphic operations on integers via operations on bits, *Proceedings - 2022 15th International Conference on Security of Information and Networks, SIN 2022*, 2022.
19. Rusalovskiy I.D., Babenko L.K., Makarevich O.B. Razrabotka metodov gomomorfnoy deleniya [Development of homomorphic division methods], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 4 (228), pp. 103-112.
20. IEEE Standard for Floating-Point Arithmetic, IEEE Computer Society, IEEE Std 754, 2019.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Г.Е. Веселов.

Бабенко Людмила Климентьевна – Южный федеральный университет; e-mail: blk@tsure.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79054530191; кафедра безопасности информационных технологий; д.т.н.; профессор.

Русаловский Илья Дмитриевич – e-mail: ilya.rusalovskiy@mail.ru; тел.: +79885526701; кафедра безопасности информационных технологий; аспирант.

Babenko Liudmila Kliment'evna – Southern Federal University; e-mail: blk@tsure.ru; Taganrog, Russia; phone: +79054530191; the department of information technologies security; dr. of eng. sc.; professor.

Rusalovsky Ilya Dmitrievich – e-mail: ilya.rusalovskiy@mail.ru; phone: +79885526701; the department of information technologies security; postgraduate student.

Д.Е. Чикрин, А.А. Егорчев, Д.М. Пашин, Н.А. Сарамбаев**ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТЫ
ПОВЕРХНОСТНОГО ДЫХАНИЯ ПО ДАННЫМ ВИБРОМЕТРИЧЕСКИХ
СЕНСОРОВ СМАРТФОНА**

Современные реалии ставят человечеству задачи по цифровизации в различных областях работы и быта, ускоряя срок выполнения задач и облегчая их. Современная техника, оснащенная датчиками, которые можно использовать для предварительной диагностики, позволяет выявлять различные симптомы, которые могут являться причиной посещения медицинских учреждений. Это позволяет выиграть время – очень ценный ресурс, когда речь идет о жизни человека. Поэтому возможность выполнять такую диагностику, в частности, определение частоты дыхания, является актуальной задачей на сегодняшний день. В статье представлен метод определения частоты дыхания с использованием трехосевого акселерометра на мобильном устройстве. Данный метод может быть использован в приложении мониторинга состояния здоровья пользователя при отсутствии смарт-часов. Метод позволяет пользователю измерять частоту дыхания человека только при условии того, что пользователь находится в сидячем положении и мобильное устройство, оснащенное необходимым датчиком, расположено в верхней передней области бедра (область кармана). Алгоритм по определению частоты дыхания реализован на двух языках программирования: Python и MatLab. В алгоритме используется стабилизатор частоты дыхания, т.к. с мобильного устройства на базе Android частота дискретизации акселерометра не постоянна. Далее сигнал нормируется методом z-нормирования. Для выделения частотного промежутка, в котором вычисляется частота дыхания, используется фильтр Баттерворта 1-ого порядка. Анализ независимых компонент позволяет получить из смеси сигналов его независимые компоненты. Были протестированы несколько реализаций данного метода на языке Python и Matlab. Наилучшие по качеству результаты показал алгоритм, реализованный на языке MatLab с использованием встроенного восстановительного анализа независимых компонент (RICA) из набора инструментов статистики и машинного обучения. По скорости работы лучшие результаты показала реализация алгоритма на языке Python с методом быстрого анализа независимых компонент (FastICA). Среднеквадратичная ошибка для диапазона 10–20 вдоха в мин составила 2,14 вдоха в мин. Среднеквадратичная ошибка для 20–30 вдоха в мин составила 3,46 вдоха в мин.

Частота дыхания; мобильное приложение; трёхосевой акселерометр; полосовой фильтр Баттерворта; анализ независимых компонент (ICA); спектральный анализ.

D.E. Chickrin, A.A. Egorchev, D.M. Pashin, N.A. Sarambaev**DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR DETERMINING THE FREQUENCY
OF SURFACE RESPIRATION ACCORDING TO SMARTPHONE BIOMETRIC
SENSORS**

Modern realities set digitalization tasks for humanity in various areas of work and life, speeding up the deadline for completing tasks and facilitating them. Modern technology equipped with sensors that can be used for preliminary diagnosis allows you to identify various symptoms that may be the reason for visiting medical institutions. This allows you to gain time – a very valuable resource when it comes to human life. Therefore, the ability to perform such diagnostics the determination of respiratory rate, is an urgent task today. The article presents a method for determining the respiratory rate using a three-axis accelerometer on a mobile device. This method can be used in a user health monitoring application in the absence of smart watches. The method allows the user to measure the respiratory rate of a person only if the user is in a sitting position and a mobile device equipped with the necessary sensor is in the upper anterior thigh area (pocket area). The algorithm for determining the respiratory rate is implemented in two programming languages: Python and MatLab. The algorithm uses a respiratory rate stabilizer, because the ac-

celerometer sampling rate is not constant from an Android-based mobile device. Next, the signal is normalized by the z-normalization method. To isolate the frequency interval in which the respiratory rate is calculated, the Butterworth filter of the 1st order is used. The analysis of independent components makes it possible to obtain its independent components from a mixture of signals. Several implementations of this method have been tested in Python and Matlab. The best quality results were shown by an algorithm implemented in MatLab using the built-in reconstructive analysis of independent components (RICA) from a set of statistics and machine learning tools. In terms of speed, the best results were shown by the implementation of the algorithm in Python with the method of fast analysis of independent components (FastICA). The MSE for the range of 10-20 breaths per minute was 2.14 breaths per minute. The MSE for 20-30 breaths per minute was 3.46 breaths per minute.

Respiratory rate; mobile application; three-axis accelerometer; Butterworth band-pass filter; independent component analysis (ICA); spectral analysis.

Введение. На сегодняшний день практически у каждого человека есть мобильное устройство, оснащенное множеством датчиков, таких как акселерометр, гироскоп, геомагнитный датчик, датчик приближения и другие.

Измерение частоты дыхания широко используется в медицинской практике для проверки нормального функционирования дыхательных и сердечных систем. Подобные измерения могут быть использованы для определения интенсивности физических нагрузок, регистрации поверхностного дыхания и отдышки.

В медицинской практике для определения частоты дыхания могут быть использованы следующие инструменты и методики: капнограф, дыхательный индуктивный плетизмограф, электроимпедансная томография, термистор, как термоанемометр для измерения расхода воздуха и другие.

Для определения частоты дыхания может быть использованы различные методы (инструменты).

Акселерометр также, как и остальные типы датчиков может быть использован для определения частоты дыхания. Для этого от акселерометра получают данные измерений в течении некоторого времени, на основе анализа этих данных получают частоту дыхания. Например, в исследованиях [1–4] оценивается частота дыхания поиском доминантной частоты в спектре сигнала одноосного акселерометра, закрепленного в верхней части живота для трех типов дыхания: медленного, нормального и быстрого. В работах [5–8] измерения проводились с использованием трехосевого акселерометра, расположенного на ремне во время различных видов деятельности таких как сидение, ходьба, бег и сон. В исследовании [9] для расчета частоты дыхания используется значения косинуса угла поворота вектора ускорения трехосевого акселерометра. Интересными являются задачи, которые решаются с применением акселерометров в работах [10–12], здесь рассматривается оценка затрачиваемой человеком энергии, оценка вентиляции воздуха у детей, а также использование нескольких акселерометров для оценки формы сигнала, формируемого в процессе дыхания. В [13] исследуемый сигнал был получен с использованием трехосевого акселерометра, расположенного на спине и трехосевого акселерометра, расположенного на груди во время бега испытуемого, для определения частоты дыхания были использованы методы оптимальных поворотов трехосевых акселерометров, адаптивные полосовые фильтры, основанные на доминантной частоте и алгоритмы определения пиков. В работе [14] проводится анализ исследований в части контроля сердечного ритма, который связан с частотой дыхания, при этом рассматриваются учащение сердечного ритма в отдельных видах спорта, также в работе рассматривается подход объединения данных от различных датчиков, так называемый *sensor fusion*, позволяющий повышать точность оценки исследуемого параметра. В работе [15] представлено устройство компании Smartlifeinc Limited для контроля ряда биометрических параметров, среди них из-

мерение объема расхода воздуха при дыхании, оценка проводится с помощью умной одежды, оснащенной системой датчиков. В [16, 17] смартфон со встроенным трехосевым акселерометром был расположен в кармане брюк, в сумке и руке. Сигнал акселерометра был отфильтрован полосовым фильтром Баттерворта [22, 23] и затем очищен от шума с использованием анализа независимых компонент (ICA) из работ [24, 25].

Основная часть. В настоящей статье представлена видоизмененная реализация алгоритма [16] по определению частоты дыхания.

Предполагается, что мобильное устройство находится в верхне-передней области бедра (рис. 1).

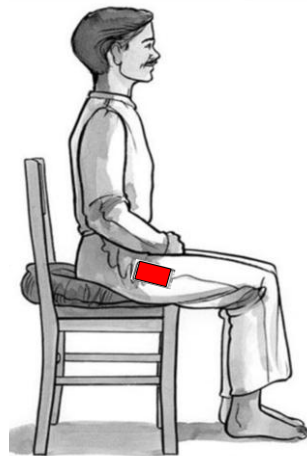


Рис. 1. Место расположения мобильного устройства

Алгоритм определения частоты дыхания основан на методе определения частоты дыхания, описанный в статье [16]. На вход алгоритму подается сигнал длиной 17 с. с трехосевого акселерометра, который представим в виде таблицы размером $4 * n$ (n – длина сигнала), со столбцами соответствующими временному отсчету, ускорению по оси x , по оси y и по оси z (рис. 2).

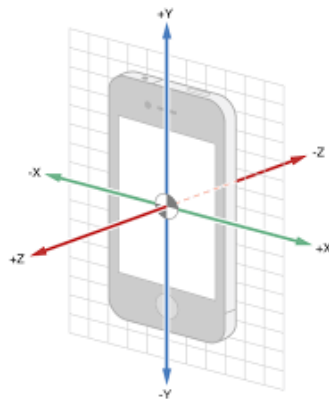


Рис. 2. Направления осей x , y , z мобильном телефоне

Для определения частоты дыхания производятся следующие шаги:

- 1) приведение сигнала к частоте дискретизации 100 Гц;

- 2) z-нормирование сигнала;
- 3) фильтрация сигнала полосовым фильтром Баттерворта с полосой пропускания $[0.13, 0.66]$ Гц;
- 4) применение анализа независимых компонент (ICA) для получения 3-х независимых сигналов;
- 5) получение трех доминантных частот в частотной области для трех сигналов;
- 6) вычисление медианы для трех доминантных частот.

Блок схема алгоритма представлена на рис. 3.

В статье [16] частота дискретизации входного сигнала 100 Гц, но на устройствах, используемых в эксперименте частоты дискретизации больше 100 Гц, что получается в результате опытов по считыванию сигналов на исследуемых устройствах. Сигнал частотой 100 Гц получается путем вычисления математического ожидания входного сигнала на отрезках $[0k, 10k]$ мс для натурального числа k по формуле (1):

$$\mu = \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{N}. \quad (1)$$

Для сигнала рассчитывается математическое ожидание (1), среднеквадратичное отклонение (2), выполняется z-нормирования сигнала по формуле (3) (z – нормирование сигнала это приведение сигнала к 0-ому мат-ожиданию и 1-ому среднеквадратичному отклонению). Среднеквадратичное отклонение сигнала рассчитывается по формуле (2):

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(x_i - \mu)^2}{N}}, \quad (2)$$

а z – нормирование сигнала x осуществляется по формуле (3):

$$x_i = \frac{x_i - \mu}{\sigma}, \quad (3)$$

для всех отсчетов x_i сигнала x .

Для удаления шума используется анализ независимых компонент [18–21]. Алгоритм анализа независимых компонент преобразует сигнал размера $3 * n$ в сигнал размера $l * n$, где l – число компонент, а n – длина сигнала.

Частоты, на которых практически невозможно наблюдать сигнала дыхания, исключаются применением полосового фильтра (как комбинации высокочастотного и низкочастотного фильтра) Баттерворта 1-ого порядка для частотного диапазона $[0.13, 0.66]$ Гц с передаточной функцией, которая может быть представлена в виде (4):

$$F(x) = \frac{(1-x)^L}{(1-x)^L + cx^N}. \quad (4)$$

В частотной области отфильтрованного сигнала находятся доминантный частоты для сигнала. В результате для l компонент сигнала длиной n получаются доминантных частот, которые соответствуют возможным частотам дыхания. Для того, чтобы получить результирующую частоту дыхания для выборки из l доминантных частот сигнала берется медиана сигнала. Медиана med для сигнала x длиной N вычисляется по формуле (5):

$$\begin{cases} med = \frac{x_{j+1} + x_j}{2}, j = \frac{N}{2}, \text{ если } N - \text{четное} \\ med = x_j, j = \frac{N+1}{2}, \text{ если } N - \text{нечетное} \end{cases}. \quad (5)$$

Блок схема алгоритма представлена на рис. 3.

Реализация алгоритма в системе мониторинга состояния здоровья.

Алгоритм был реализован на двух языках программирования: matlab и python. Скорость работы алгоритмов на языке matlab была ниже чем на языке python. Однако matlab аналог алгоритма анализа независимых компонент (RICA), который может быть настроен так, чтобы он возвращал большее число $n > 3$ независимых компонент, чем подается на вход (3 независимых компонент). В реализации на python может быть использован другой аналог анализа независимых компонент (FastICA) [18] из библиотеки scipy, которая, если требовать на выходе больше 3 компонент, вернет такие компоненты, для которых определение частоты дыхания дальнейшими шагами алгоритма становится крайне неточным.

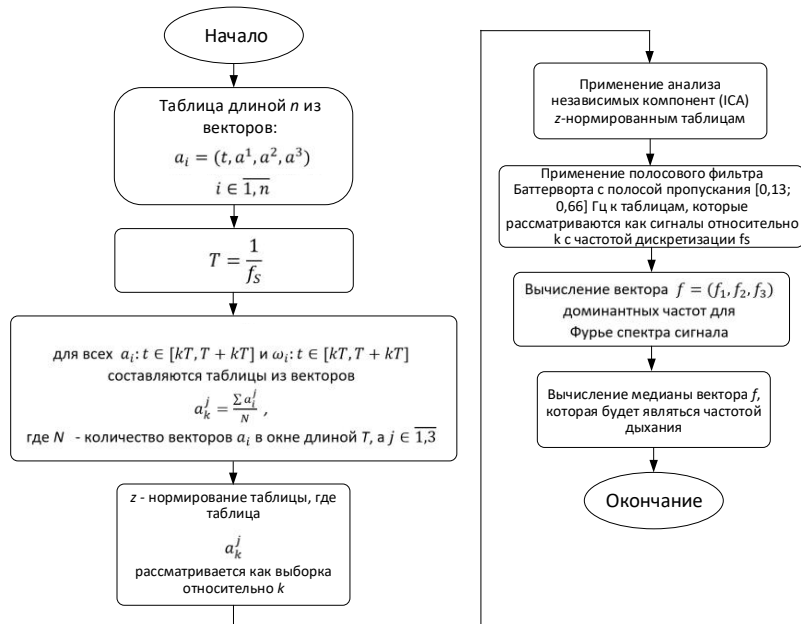


Рис. 3. Блок-схема алгоритма

Эксперимент. Для проверки правильности работы алгоритма был проведен следующий эксперимент. У испытуемого, находящегося в сидячем положении, мобильное устройство с трехосевым акселерометром было размещено в верхней передней области бедра. Во это же время для верификации алгоритма была измерена частота дыхания путем подсчета количества вдохов в минуту. Всего было проведено 100 таких опытов для диапазона дыхания [10, 20] вдохов/мин, и для диапазона дыхания [20, 30] вдохов/мин. Эксперимент был проведен с использованием следующих устройств:

1) клиентского: смартфон Xiaomi

характеристики:

- ◆ RAM: 4 Гб;
- ◆ CPU: 2,3 ГГц;
- ◆ акселерометр и гироскоп.

2) серверного: ноутбук

характеристики:

- ◆ GPU: NVIDIA Quadro RTX 6000;
- ◆ оперативная память: 64 Гб;
- ◆ процессор: Intel® Core™ i9-9920X;
- ◆ постоянная память: SSD Intel SSDPEKKW010T8(004C) 1Тб.

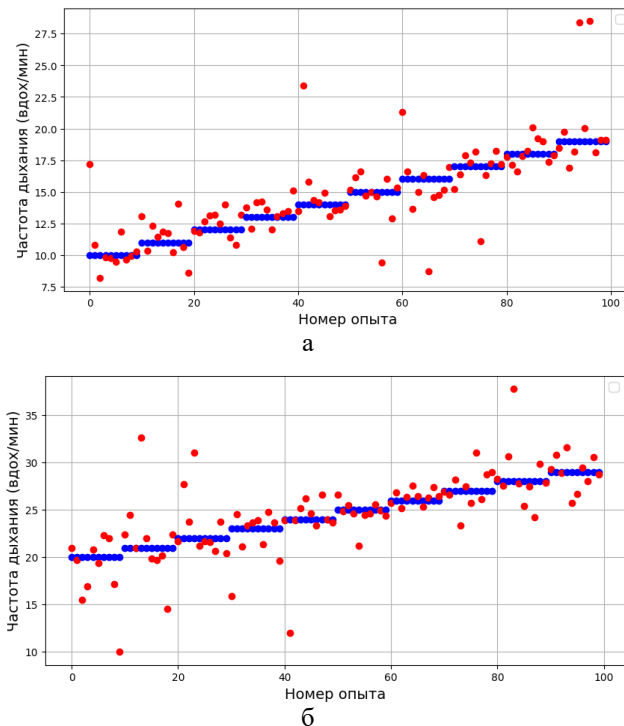


Рис. 4. Результаты измерения частоты дыхания: а – для диапазона [10, 20] вдохов/мин, б – для диапазона [20, 30] вдохов/мин, синим цветом – значения, измеренные вручную, красным цветом – значения измеренные, разработанным ПО

По результатам эксперимента был проведен анализ на выбросы графическим методом для определения выбросов и ошибки метода. Ошибка метода E_{method} была рассчитана по следующей формуле. N_{out} – число выбросов.

$$E_{method} = \frac{N_{out}}{N}, \quad (6)$$

где N – общее число испытаний, N_{out} – число выбросов.

Результаты эксперименты представлены на графиках (рисунок 4а и 4б).

Среднеквадратичная ошибка для диапазона [10, 20] составила 2,14. Среднеквадратичная ошибка для диапазона [20, 30] составила 3,46. Ошибка метода на отрезке [10, 20] составила 0,1. Ошибка метода на отрезке [20, 30] составила 0,09.

Выводы. Разработанный алгоритм и его программная реализация могут использоваться в приложениях мониторинга здоровья человека, разворачиваемых на смартфонах на базе платформы Android. Полученная реализация позволяет с высокой точностью анализировать частоту дыхания для работников, которые большую часть своего рабочего дня сидя в офисе. Ошибки метода можно устранить путем увеличения времени задержки перед запуском алгоритма, например, методом скользящего окна, минимизируя вероятность ошибок. В связи с этим рекомендуемое время эксперимента для определения поверхностного дыхания должно составлять 1 мин. Точность алгоритма можно повысить путем подбора различных вариаций метода анализа независимых компонент (ICA) и параметров метода. Полученный сигнал после анализа независимых компонент позволяет анализировать помимо частоты дыхания, паттерны дыхания, что предоставляет возможности расширения диагностических возможностей реализации.

Благодарность: Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета ("ПРИОРИТЕТ-2030").

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Mansour K.B., Guesneau M., Mansour K.B. Monitoring of various breathing rate with an accelerometer, *JETSAN 2021-Colloque en Télésanté et dispositifs biomédicaux-8ème edition*, 2021.
2. Biró Attila & Szilagyi Sandor Miklos & Szilagyi Laszlo & Martin-Martin Jaime & Cuesta-Vargas Antonio. Machine Learning on Prediction of Relative Physical Activity Intensity Using Medical Radar Sensor and 3D Accelerometer, *Sensors*, 2023, 23, 3595. 10.3390/s23073595.
3. Markovic A. Use of a MEMS Accelerometer to Monitor Breathing Motion, *Medical Physics*, 2013, 40, 287. 10.1118/1.4814796.
4. Ali, Shan & Khan, Ali & Zia, Shafaq. (2022). Cough Detection Using Mobile Phone Accelerometer and Machine Learning Techniques. 10.1007/978-3-031-10031-4_19.
5. Liu G.Z. et al. Estimation of respiration rate from three-dimensional acceleration data based on body sensor network, *Telemedicine and e-health*, 2011, Vol. 17, No. 9, pp. 705-711.
6. Simonetti Emeline & Bergamini Elena & Bascou Joseph & Vannozzi Giuseppe & Pillet Helene. Three-dimensional acceleration of the body center of mass in people with transfemoral amputation: Identification of a minimal body segment network, *Gait & Posture*, 2021, 90, pp. 129-136. 10.1016/j.gaitpost.2021.08.017.
7. Hasan Kareeb & Pour Ebrahim, Malikeh & Xu Hongqiang & Yuce Mehmet. Analysis of Spectral Estimation Algorithms for Accurate Heart Rate and Respiration Rate Estimation Using an Ultra-Wideband Radar Sensor, *IEEE reviews in biomedical engineering*, 2022, PP. 10.1109/RBME.2022.3212695.
8. Sato Hiroya & Kawaharazuka Kento & Makabe Tasuku & Okada Kei & Inaba Masayuki. Online Estimation of Self-Body Deflection With Various Sensor Data Based on Directional Statistics, 2023.
9. Bates A. et al. Respiratory rate and flow waveform estimation from tri-axial accelerometer data, *2010 International Conference on Body Sensor Networks*. IEEE, 2010, pp. 144-150.
10. Koizumi Nao & Ogata Hitomi & Negishi Yutaro & Nagayama Hisashi & Kaneko Miki & Kiyono Ken & Omi Naomi. Energy Expenditure of Disaster Relief Operations Estimated Using a Tri-Axial Accelerometer and a Wearable Heart Rate Monitor, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023, 20, 5742. 10.3390/ijerph20095742.
11. Tsai Junko & Tanaka Chiaki & Tanaka Shigeo. Estimation of minute respiratory ventilation rate of preschool children using tri-axial accelerometer, *Journal of Japan Society for Atmospheric Environment*, 2010, 45, pp. 235-245. 10.11298/taiki.45.235.
12. Siqueira Ailton & Spirandeli Amanda & Moraes Raimes & Zarzoso Vicente. Respiratory Waveform Estimation From Multiple Accelerometers: An Optimal Sensor Number and Placement Analysis, *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 2018. PP. 1-1. 10.1109/JBHI.2018.2867727.
13. Vertens J. et al. Measuring Respiration and Heart Rate using Two Acceleration Sensors on a Fully Embedded Platform, *icSPORTS*, 2015, pp. 15-23.
14. Griffiths Benjamin & Preece Stephen. A New Wearable Device For Free-Living Measurement of Respiration Rate, 2017.
15. Chang Bu. Application of Heart Rate Acceleration Motion Wireless Sensor Fusion in Individual Special Competitive Sports, *Journal of Sensors*, 2021, 1-11. 10.1155/2021/5723567.
16. Hernandez J., McDuff D.J., Picard R.W. Biophone: Physiology monitoring from peripheral smartphone motions, *2015 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*. IEEE, 2015, pp. 7180-7183.
17. Creighton Catherine. Monitoring During Anesthesia: Physiology, 2023. 10.1007/978-3-031-22805-6_1.
18. Oja E., Yuan Z. The FastICA algorithm revisited: Convergence analysis, *IEEE transactions on Neural Networks*, 2006, Vol. 17, No. 6, pp. 1370-1381.
19. Karmuse Sachin & Kakhandki Arun & Anandhalli Mallikarjun. Video-Based Heart Rate Measurement Using FastICA Algorithm, 2022. 10.1007/978-981-16-7011-4_42.
20. Wei Tianwen. Asymptotic analysis of the generalized symmetric FastICA algorithm, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 63. 10.1109/SSP.2014.6884675.

21. *Shahshahani, Seyed Mohammad Reza & Mahdiani Hamid*. FiCA: A Fixed-point Custom Architecture FastICA for Real-time and Latency-Sensitive Applications, *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering: a publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2022, pp. 10.1109/TNSRE.2022.3213010.
22. *Selesnick I.W., Burrus C.S.* Generalized digital Butterworth filter design, *IEEE Transactions on signal processing*, 1998, Vol. 46, No. 6, pp. 1688-1694.
23. *Elitis S.* A computer aided design of digital filters. NASA STI/Recon Technical Report No. 11304-, 1977.
24. *Le Q. et al.* ICA with reconstruction cost for efficient overcomplete feature learning, *Advances in neural information processing systems*, 2011, Vol. 24.
25. *Livezey Jesse & Bujan Alejandro & Sommer Friedrich*. On degeneracy control in overcomplete ICA, 2016.

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

Чикрин Дмитрий Евгеньевич – Казанский (Приволжский) федеральный университет; e-mail: dmitry.kfu@ya.ru; г. Казань, Россия; тел.: +78432337037; д.т.н.; директор Института вычислительной математики и информационных технологий.

Егорчев Антон Александрович – e-mail: eanton090@gmail.com; тел.: +78432337609; к.т.н.; зам. директора по общим вопросам Института вычислительной математики и информационных технологий.

Пашин Дмитрий Михайлович – e-mail: dmitry.m.pashin@gmail.com; тел.: +78432337871; д.т.н., проректор по цифровой трансформации и инновационной деятельности.

Сарамбаев Никита Андреевич – e-mail: sarambaev@gmail.com; инженер-программист сектора высокоуровневой разработки Научно-исследовательского центра «Центр превосходства Специальная робототехника и искусственный интеллект» Института вычислительной математики и информационных технологий.

Chickrin Dmitry Evgenevich – Kazan (Volga Region) Federal University; e-mail: dmitry.kfu@ya.ru; Kazan, Russia; phone: +78432337037; dr. of eng. sc. director of the Institute of computer mathematics and information technologies.

Egorchev Anton Aleksandrovich – e-mail: eanton090@gmail.com; phone: +78432337609; cand. of eng. sc.; deputy director for general affairs of the Institute of computer mathematics and information technologies.

Pashin Dmitry Mikhailovich – e-mail: dmitry.m.pashin@gmail.com; phone: +78432337871; dr. of eng. sc. vice-rector for digital transformation and innovation.

Sarambaev Nikita Andreevich – e-mail: sarambaev@gmail.com; phone: +79179029352; engineer-programmer of the high-level development sector of the Research Center "Center of excellence special robotics and artificial intelligence" of the Institute computer mathematics and information technologies.

УДК 004.31(075.8)

DOI 10.18522/2311-3103-2023-4-42-56

К.А. Иваненко, Д.Б. Борзов, И.Е. Чернецкая, В.С. Титов, А.С. Сизов

ПРИМЕНЕНИЕ УСТРОЙСТВ ПЛАНИРОВАНИЯ И ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА РАЗМЕЩЕНИЯ В МАТРИЧНЫХ МУЛЬТИПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМАХ ВЫСОКОЙ ГОТОВНОСТИ

Рассматривается тема мультипроцессорных систем высокой готовности, применяющихся в таких задачах, как геолокация, прицеливание, атомные системы, прогнозирование наблюдения, слежение и другие. При возникновении таких внештатных ситуаций, как неисправность или отказ отдельных процессорных модулей системы, а также ситуаций, связанных с оперативным воздействием на мультипроцессорную систему, возникает необходимость сроч-

ного реагирования. Мультипроцессорная система может реагировать на внештатные ситуации определенным способом, который заключается в планировании размещения или перераспределения параллельных задач. Задача планирования размещения формально определяется как процесс отображения вершин и дуг взвешенного орграфа, описывающего выполняемые задачи, на нерегулярный граф, который в свою очередь представляет физическую структуру мультипроцессорной системы. При выборе оптимального преобразования особое внимание направлено на минимизацию общего веса дуг, которые отражают связи между завершёнными задачами. Этот процесс, по сути, представляет собой более сложную версию задачи поиска на графе. Важно подчеркнуть, что такой вид поиска является классической NP-полной задачей в теории графов. Алгоритмы пчелиного улья, генетическая эволюция, муравьиные колонии и метод гильотинного разреза – все эти популярные методы поиска оптимального размещения не подходят для данной задачи, так как основанно выполняют поиск на уровне программного обеспечения. Для того чтобы система оперативно реагировала на внештатные ситуации, она должна быстро выполнять вычисления, чего данные методы позволить не могут. Следовательно, актуальной задачей является разработка метода и алгоритма планирования размещения задач в матричных гиперкубических мультипроцессорных системах высокой готовности. Эта работа продолжает идеи, представленные в ранее опубликованных работах по данному направлению в части совмещения поисковых и расчетных шагов для проверки промежуточных вариантов. Дополнительная информация в виде отношений расстояний между элементами графа позволяет сократить перебор, что подтверждается проверкой на типовых графах.

Размещение; задача; метод; алгоритм; матричная система; гиперкуб.

K.A. Ivanenko, D.B. Borzov, I.E. Chernetskaya, V.S. Titov, A.S. Sizov

APPLICATION OF DEVICES FOR PLANNING AND ASSESSMENT OF PLACEMENT QUALITY IN MATRIX MULTIPROCESSOR SYSTEMS OF HIGH AVAILABILITY

The article discusses the topic of high-availability multiprocessor systems used in tasks such as geolocation, targeting, atomic systems, forecasting, surveillance, tracking and others. When emergency situations arise, such as a malfunction or failure of individual processor modules of the system, as well as situations associated with operational impact on a multiprocessor system, there is a need for an urgent response. A multiprocessor system can respond to emergency situations in a certain way, which consists of scheduling the placement or relocation of parallel tasks. The placement planning problem is formally defined as the process of mapping the vertices and arcs of a weighted digraph describing the tasks being performed onto an irregular graph, which in turn represents the physical structure of a multiprocessor system. When choosing the optimal transformation, special attention is paid to minimizing the total weight of the arcs that reflect the relationships between completed tasks. This process is essentially a more complex version of the graph search problem. It is important to emphasize that this type of search is a classical NP-complete problem in graph theory. Beehive algorithms, genetic evolution, ant colonies, and guillotine cutting are all popular methods for finding optimal placements that are not suitable for this task because they mostly perform the search at the software level. In order for the system to quickly respond to emergency situations, it must quickly perform calculations, which these methods cannot allow. Therefore, an urgent task is to develop a method and algorithm for planning the placement of tasks in matrix hypercubic multiprocessor systems of high availability. This work continues the ideas presented in previously published works in this area in terms of combining search and calculation steps to test intermediate options. Additional information in the form of relations of distances between graph elements allows us to reduce the search, which is confirmed by testing on typical graphs.

Placement; problem; method; algorithm; matrix system; hypercube.

Введение. Мультипроцессорные системы (МС) в настоящее время являются широко распространенным классом вычислительных комплексов и систем. При этом они имеют высокую степень параллелизма [1, 2]. Очевидно, что в системах высокой готовности (слежение, наблюдение, прицеливание, метеосистемы и т.п.) требуется снижение времени межпроцессорного обмена в МС. Типологически такие МС, как правило, имеют матричную организацию.

Возникновение дефекта на кристалле процессора МС, либо его отказа или сбоя приводит к необходимости оперативной реакции со стороны МС. Одним из вариантов такой реакции может быть планирование размещения или переразмещения выполняемых параллельных программ. Причем желательно, чтобы такой план размещения строился с учетом не только возможных дефектов процессорных модулей, но и дефектных каналов связи, через которые нельзя передавать данные между процессорами. Так как число процессоров современных ММ приближается к 100, задача планирования размещения становится программно неразрешимой за приемлемое для практики время. С учетом вышесказанного актуальной является разработка устройств планирования размещения параллельных программ в матричных мультимикропроцессорных системах.

Постановка задачи. Исходная задача (процесс, алгоритм, программа) представляется в виде двунаправленного взвешенного графа $G=\langle X, E \rangle$ (рис. 1), вершины $x_i \in X$ которого соответствуют подзадачам (подалгоритмам, подпрограммам и т.п.), а дуги $e_{ij} \in E \subseteq X \times X$ задают управляющие и/или информационные связи между подзадачами и фактически являются каналами передачи данных [3].

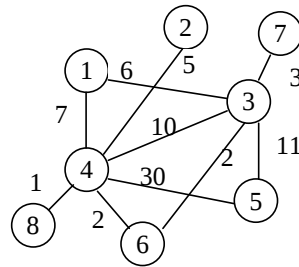


Рис. 1. Граф задачи

Граф G (рис. 1) может быть описан матрицей смежности $W = \|w_{ij}\|_{N \times N}$ (рис. 2), где $N = n^2 = |X|$; w_{ij} — объем передаваемых данных между i -м и j -м процессорным модулем.

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0		6	7				
2		0		5				
3	6		0	10	11	2	3	
4	7	5	10	0	30			1
5			11	30	0			
6			2			0		
7			3					
8				1				

Рис. 2. Матрица смежности графа G

Топологическая модель (область размещения) задается матрицей расстояний (МР) D . Элементы матрицы расстояний $D = \|d_{ij}\|_{n \times n}$ ($N = n^2 = |H|$) для графа (см. рис. 1), представлена на рис. 3.

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	1	2	1	3	2	1	3
2	1	0	1	2	3	4	1	3
3	2	1	0	1	1	3	2	2
4	3	2	1	0	2	1	2	2
5	1	3	1	2	0	1	2	1
6	2	4	3	1	1	0	3	1
7	1	1	2	2	2	3	0	1
8	3	3	2	2	1	1	1	0

Рис. 3. Матрица расстояний графа G

Мультипроцессорная система представляется топологической моделью в виде графа

$$H = \langle P, V \rangle, \text{ где } P = \begin{Bmatrix} p_{1,1} & p_{1,2} & \dots & p_{1,n} \\ p_{2,1} & p_{2,2} & \dots & p_{2,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{n,1} & p_{n,2} & \dots & p_{n,n} \end{Bmatrix} - \text{множество идентификаторов про-}$$

цессорных модулей MC, организованных в матрицу $|P|_{n \times n}$, где мощность $|P| = N = n^2$ – число соответствующих процессорных модулей; V – множество межмодульных связей, задаваемых матрицей смежности $\|W\|_{N \times N}$ размером $n^2 \times n^2$.

Матрица расстояний D строится по матрице смежности $\|W\|_{N \times N}$ графа H. Если непосредственной связи между модулями в базовом блоке нет, то элемент M_{ij} : d_{ij} – минимальное межмодульное топологическое расстояние, которое вычисляется как кратчайший путь от вершины p_i до вершины p_j в графе H, измеренный числом последовательно соединенных каналов.

Тогда, размещение пакета программ (комплекса задач), описываемых графом G в параллельной системе (ПС), может быть аналитически описано отображением

$$\beta_s = \begin{Bmatrix} x_{s_{1,1}} & x_{s_{1,2}} & \dots & x_{s_{1,k}} & \dots & x_{s_{1,n}} \\ x_{s_{2,1}} & x_{s_{2,2}} & \dots & x_{s_{2,k}} & \dots & x_{s_{2,n}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{s_{q,1}} & x_{s_{q,1}} & \dots & x_{s_{q,k}} & \dots & x_{s_{q,n}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{s_{n,1}} & x_{s_{n,2}} & \dots & x_{s_{n,k}} & \dots & x_{s_{n,n}} \end{Bmatrix} \rightarrow \begin{Bmatrix} p_{1,1} & p_{1,2} & \dots & p_{1,k} & \dots & p_{1,n} \\ p_{2,1} & p_{2,2} & \dots & p_{2,k} & \dots & p_{2,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{q,1} & p_{q,2} & \dots & p_{q,k} & \dots & p_{q,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{n,1} & p_{n,2} & \dots & p_{n,k} & \dots & p_{n,n} \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

где $s = \overline{1, N!}$, $k = \overline{1, n}$, $q = \overline{1, n}$.

Здесь s – это номер очередной перестановки, соответствующий S -му варианту размещения.

Матрица смежности и расстояний, реализованная в [3] позволяет сформулировать задачу размещения [5–7].

Пусть Ψ – множество всевозможных отображений вида (1). Тогда задачу размещения, можно сформулировать как поиск отображения $\beta^* \in \Psi$, такого, что

$$T_{\beta^*} = \min_{\Psi} \{ \max_{\beta_s \in \Psi} \{ T_{\beta_s}(p_{a,b}, p_{x,y}) \} \}, \quad (2)$$

где $T_{\beta_s}(p_{a,b}, p_{x,y})$ – коммутационная задержка при передаче данных между модулями $p_{a,b}$ и $p_{x,y}$, соответствующая отображению β_s , которая рассчитывается как произведение

$$T_{\beta_s}(p_{a,b}, p_{x,y}) = d_{ij} \cdot m_{ij}, \quad (3)$$

где $i = (a-1) \cdot n + b$ и $j = (x-1) \cdot n + y$

Так как мощность множества $\psi = \{\beta_s\}$ возможных отображений (1) равна числу всевозможных перестановок задач $\{x_{qk}\}$ в матрице X : $|\psi| = N!$, поиск наилучшего варианта размещения β^* по критерию (2) является сложной переборной задачей [8–9].

Метод решения. В целом, поиск варианта размещения, по мнению авторов, должно соответствовать устройству, структурная схема которого представлена на рис. 4 [10].

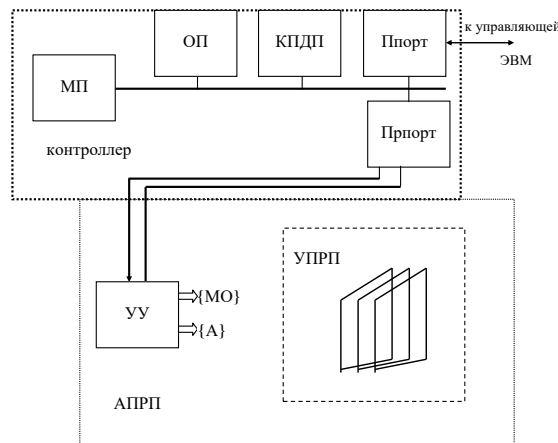


Рис. 4. Структурная организация устройства планирования размещения

На рис. 4 приняты следующие обозначения блоков и узлов: АПРП – акселератор планирования переразмещения подпрограмм; ОП – оперативная память; КПДП – контроллер прямого доступа в память; Ппорт – последовательный порт; Прпорт – параллельный порт; УУ – устройство управления; МО – микрооперации; А – адрес, УПРП – устройства планирования размещения подпрограмм.

В результате, применительно для МС высокой готовности было спроектированы устройства [13–16], соответствующие представленным выше этапам поиска минимальной нижней оценки. В данном случае авторы предполагают, что с помощью спроектированных УПРП (см. рис. 4) первоначально вычисляется минимальная нижняя оценка, то есть значение интенсивности, к которому необходимо стремиться при реальном варианте размещения.

Затем вычисляется степень близости начального варианта размещения T_n , соответствующей первичному варианту размещения, к нижней оценке T_{inf} в виде [11]:

$$\eta_n = \frac{T_n}{T_{inf}}. \quad (4)$$

На следующем этапе в зависимости от вида топологической организации МС (линейная, кольцевая, матричная, кубическая и т.д.) с помощью УПП выполняется поиск варианта размещения, после чего вычисляется степень близости величины интенсивности T_n , соответствующей первичному варианту размещения, к нижней оценке T_{inf} в виде:

$$\eta_n = \frac{T_n}{T_{inf}}. \quad (5)$$

После этого анализируем степень улучшения полученного варианта размещения по формуле

$$\sigma = \frac{T_n}{T}. \quad (6)$$

В итоге получаем матрицу смежности W , соответствующую лучшему варианту размещения, которую по параллельной шине передаем на управляющую ЭВМ (см. рис. 4) для принятия решения о дальнейших действиях.

Топологическая модель для размещения (область размещения), в свою очередь предложено задавать матрицей расстояний D . Элементы матрицы расстояний $D = \|d_{ij}\|_{n \times n}$ для кольцевой модели образуются по формуле $d_{i,j} = (j - i + n) \bmod n$, а для линейной модели – по формуле $d_{i,j} = |i - j|$. Критерием оптимальности размещения является минимум суммарной длины L межэлементных связей орграфа G при его размещении в заданной модели с учетом весов его дуг. Минимально возможная длина связей L^* для орграфа G независимо от топологической модели определяется по формуле [4]:

$$L^* = \sum_{k=1}^m a'_k d'_k, \quad (7)$$

где $\|a'_k\|$, $\|d'_k\|$ – векторы, первый из которых содержит ненулевые элементы матрицы смежности A , расположенные по убыванию, а второй – ненулевые элементы матрицы расстояний D , расположенные по возрастанию; k – порядковый номер элемента; $m = |E| \leq n^2 - n$ – мощность множества дуг E (количество дуг). Фактическая длина связей L для найденного размещения орграфа G всегда либо больше, либо равна длине L^* , и степень оптимальности размещения можно определить по формуле

$$\xi = L - L^*. \quad (8)$$

Для поиска нижней оценки интенсивности размещения в матричных системах было предложено устройство [12].

В нем было предположено, что исходная (размещаемая) задача (процесс, алгоритм) представляется в виде неориентированного невзвешенного графа $G = \langle X, E \rangle$, вершины $x_i \in X$ которого соответствуют подзадачам (подалгоритмам), а дуги $e_{ij} \in E \subseteq X \times X$ задают управляющие и/или информационные связи между подзадачами (рис. 5, а, б).

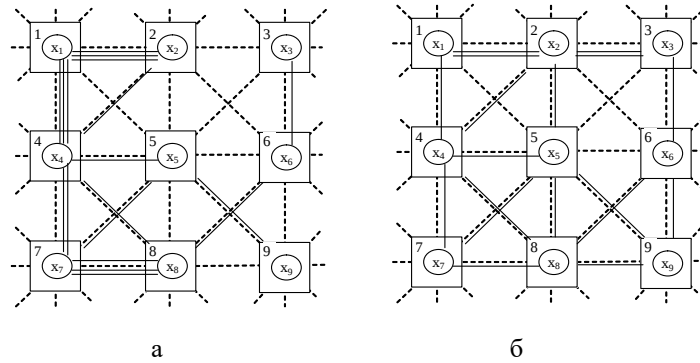


Рис. 5. Граф задачи

Матричная система (МС) отображается однородной средой, которой ставится в соответствие топологическая модель в виде графа $H = \langle U, V \rangle$, где

$$H = \left\{ \begin{array}{l} u_{1,1}, u_{1,2}, \dots, u_{1,n} \\ u_{2,1}, u_{2,2}, \dots, u_{2,n} \\ \dots \\ u_{n,1}, u_{n,2}, \dots, u_{n,n} \end{array} \right\} - \text{множество модулей ПС, организованных в матрицу}$$

$|U| = N = n$ и является количеством модулей ПС и количеством вершин графа G , V – множество межмодульных связей.

Размещение графа G в МС H будем задавать в виде отображения:

$$\beta = \left\{ \begin{array}{l} x_{S_{1,1}}, x_{S_{1,2}}, \dots, x_{S_{1,k}}, \dots, x_{S_{1,n}} \\ x_{S_{2,1}}, x_{S_{2,2}}, \dots, x_{S_{2,k}}, \dots, x_{S_{2,n}} \\ \dots \\ x_{S_{q,1}}, x_{S_{q,2}}, \dots, x_{S_{p,k}}, \dots, x_{S_{q,n}} \\ \dots \\ x_{S_{n,1}}, x_{S_{n,2}}, \dots, x_{S_{n,k}}, \dots, x_{S_{n,n}} \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} u_{0,1}, u_{0,2}, \dots, u_{0,k}, \dots, u_{0,n-1} \\ u_{1,1}, u_{1,2}, \dots, u_{1,k}, \dots, u_{1,n-1} \\ \dots \\ u_{q,1}, u_{q,2}, \dots, u_{p,k}, \dots, u_{q,n-1} \\ \dots \\ u_{n-1,1}, u_{n-1,2}, \dots, u_{n-1,k}, \dots, u_{n-1,n-1} \end{array} \right\}, \quad (9)$$

где $k = \overline{1, N}$, $p = \overline{1, N}$, $q = \overline{1, N}$, $S = \overline{1, N}$!

Полносвязная МС полностью аналогична обычной МС. Отличием является наличие у модуля $u_{p,k}$ не четырех инцидентных связей, как для обычной МС, а восьми (рис. 6, а, б). Такая МС может быть описана матрицей смежности $W = \| w_{ij} \|_{n \times n}$, где w_{ij} определяется интенсивностью взаимодействия (потока передачи данных, слов данных, кодовых слов передачи управления и т.п.) между подзадачами x_i и x_j .

В современном мире системы спутниковой связи, GPS-навигации, отслеживания, прицеливания и контроля приобретают особое значение, как в повседневной жизни, так и в областях военной, военно-технической науки, промышленности и производстве. В этом случае рассматривается область с тремя координатами X , Y и Z .

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	3		3					
2	3	0		1					
3			0			1			
4	3	1		0	1		2	1	
5				1	0		1		1
6			1			0		1	
7				2	1		0	3	
8				1		1	3	0	
9					1				0

a

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	2		1					
2	2	0	2	1	1				
3		2	0			1			
4	1	1		0	1		1	1	
5		1		1	0		1	1	1
6			1			0		1	1
7				1	1		0	1	
8				1	1	1	1	0	1
9					1	1		1	0

б

Рис. 6. Матрица смежности для графа на рис. 4.

В связи с вышесказанным в [17] была решена задача подсчета минимального значения интенсивности размещения в многопроцессорных кубических циклических системах при однонаправленной передаче информации. Многопроцессорную систему предложено представлять так, как показано на рис. 7, а на фигуре 8 показан циклический вариант многопроцессорной кубической циклической системы.

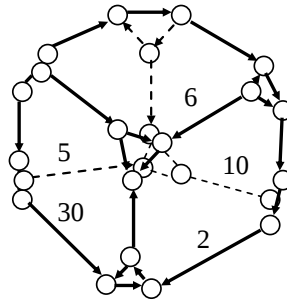


Рис. 7. Многопроцессорная кубическая циклическая система

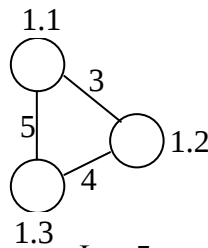


Рис. 8. Циклический вариант многопроцессорной кубической циклической системы

Исходная задача (процесс, алгоритм, программа) представляется в виде направленного взвешенного графа $G = \langle X, E \rangle$, вершины $x_i \in X$ которого соответствуют подзадачам (подалгоритмам, подпрограммам и т.п.), а дуги $e_{ij} \in E \subseteq X \times X$ задают управляющие и/или информационные связи между подзадачами и фактически являются каналами передачи данных. Граф G может быть описан матрицей смежности $W1 = \|w1_{ij}\|_{N \times N}$, где $N = n^2 = |X|$; $w1_{ij}$ – объем передаваемых данных между i -м и j -м процессорным модулем.

Топологическая модель (область размещения) задается матрицей расстояний $D1$. Элементы матрицы расстояний $D1 = \|d1_{ij}\|_{n \times n}$ для кубической системы образуются по формуле $d1_{i,j} = (j - i + n) \bmod n$.

Для математического описания циклического фрагмента кубической системы используется матрица смежности $W2 = \|w2_{ij}\|_{\alpha \times \alpha}$, где $\alpha = 3$; $w2_{ij}$ – объем передаваемых данных между i -м и j -м процессорным модулем (см. рис. 8). Топологическая модель цикла описывается матрицей расстояний $D2 = \|d2_{i,j}\|_{\alpha \times \alpha}$ для кубической системы образуются по формуле $d2_{i,j} = (j - i + \alpha) \bmod \alpha$.

В [18] предложено устройство для поиска минимального значения интенсивности размещения в тороидальных системах при направленной передаче информации. Его предлагается использовать в области проектирования ВС, например, при размещении процессов (алгоритмов, задач, данных, файлов и т.п.).

Исходная задача (процесс, алгоритм, программа) представляется в виде направленного взвешенного графа $G = \langle X, E \rangle$ (рис. 9), вершины $x_i \in X$ которого соответствуют подзадачам (подалгоритмам, подпрограммам и т.п.), а дуги $e_{ij} \in E \subseteq X \times X$ задают управляющие и/или информационные связи между подзадачами и фактически являются каналами передачи данных. Граф G может быть описан матрицей смежности $W = \|w_{ij}\|_{N \times N}$, где $N = n^2 = |X|$; w_{ij} – объем передаваемых данных между i -м и j -м процессорным модулем.

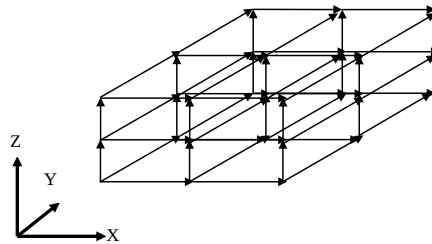


Рис. 9. Граф задачи размещения

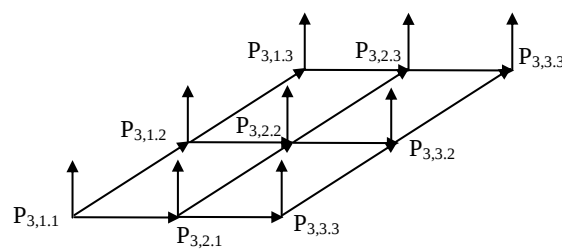


Рис. 10. Пример нижнего слоя ТС

На рис. 9 показан пример тора, состоящего из трех слоев с соответствующими координатными осями: X, Y и Z, а на рис. 10 пример нижнего (первого) слоя. Здесь процессорные модули обозначены точками с соответствующими им координатами. Так, процессорный модуль $P_{3,1,1}$ означает процессор, расположенный в третьем слое с координатами (1,1). При поиске минимального значения интенсив-

ности размещения предполагается, что наиболее интенсивно взаимодействующие участки исходной задачи (веса дуг с наибольшим объемом передаваемых данных) назначаются на смежные процессорные модули без учета топологии исходного графа G . Таким образом, реальное значение интенсивности размещения должно быть как можно ближе к ранее найденному минимальному значению.

На рис. 11 представлен вариант размещения, который не является минимальным значением, так как все вершины слоя $ТС$ имеют разные значения степени интенсивности, либо не обладают ими вовсе.

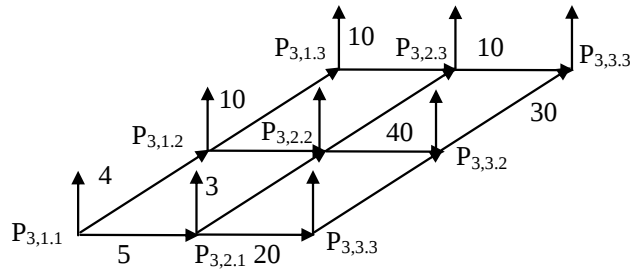


Рис. 11. Вариант размещения в $ТС$

Используя размещение и оценки согласно рис. 10, получаем количественное значение минимального значения интенсивности:

$$w' = 40, 30, 20, 15, 10, 10, 10, 5, 4, 3;$$

$$d' = 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 2, \dots;$$

$$L = 40 \cdot 1 + 30 \cdot 1 + 20 \cdot 1 + 15 \cdot 1 + 10 \cdot 1 + 5 \cdot 1 + 3 \cdot 1 = 123.$$

В примере для вектора d' приведены только начальные значения, влияющие на коэффициент L .

Таким образом, при поиске минимального значения интенсивности размещения веса дуг графа G назначаются в порядке убывания соответствующих значений. На рис. 12 представлен вариант размещения, одновременно являющийся минимальным значением интенсивности размещения.

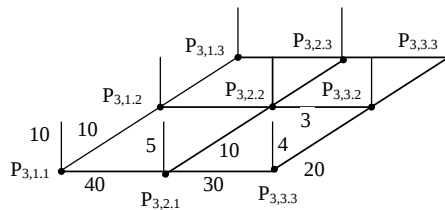


Рис. 12. Вариант размещения в $ТС$

При «реальном» размещении (процессов, данных и т.д.), значение интенсивности размещения приближается к минимальному значению. Таким образом, можно оценить его качество.

Следующей очевидной задачей после поиска варианта размещения в системах реального времени является оценка его качества, степени приближения либо удаления от некоторого наперед известного, либо изначально заданного или полученного с ВУ оптимума. В данном случае этим оптимумом является минимальная нижняя оценка, поиск которой описан в предыдущих устройствах.

Для оценки качества варианта размещения в системах с матричной организацией [19]. Предлагаемое устройство может быть использовано в области проектирования ВС, например, при размещении процессов (алгоритмов, задач).

Результаты исследования. Принцип предложенной оценки качества показан на рис. 13.

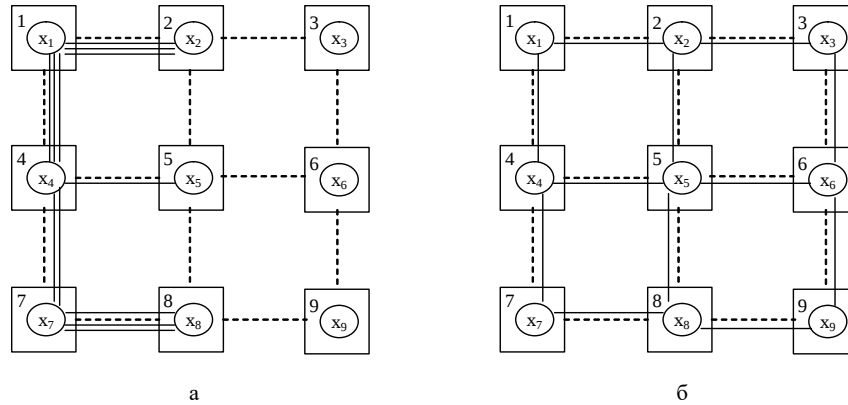


Рис. 13. Принцип оценки качества размещения

Сущность предлагаемого критерия поясняется рис. 13. Здесь на рис. 13,а,б представлены варианты гипотетического размещения графа в МС. Модули МС на рис. 10,а,б представлены квадратами, в левом верхнем углу которых представлены их номера. Внутри модулей кружками обозначены гипотетические назначенные (размещенные) вершины графа с соответствующими номерами внутри. Пунктирные линии обозначают связи модулей МС, а сплошные линии рядом с пунктирными – гипотетические зафиксированные дуги, инцидентные размещенным (назначенным) вершинам. Из рис. 10,а видно, что интенсивность взаимодействия между модулями 1–2, 1–4, а также между модулями 7–8 наибольшая и равна трем. Качество размещения улучшается при варианте размещения, показанном на рисунке 10б. В данном случае интенсивность взаимодействия между всеми модулями равна единице. Такой вариант размещения влияет на общее время выполнения задачи и ведет к его уменьшению.

Устройство [20] предлагает оценки качества размещения в матричных системах за счет введения средств для оценки текущего варианта размещения по критерию загрузки канала между смежными модулями.

Принцип предлагаемой оценки показан на рис. 14.

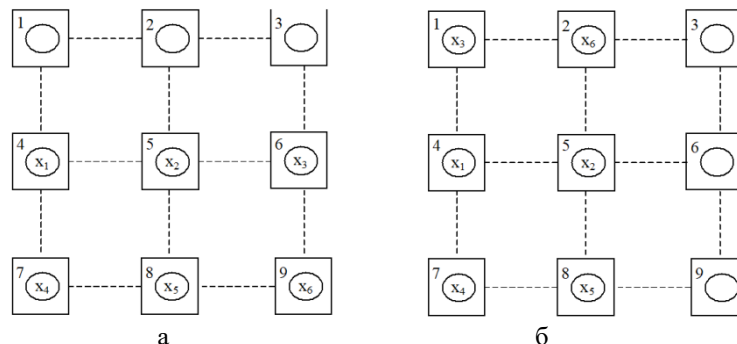


Рис. 14. Принцип оценки качества размещения

Модули МС на рис. 14,а,б представлены квадратами, в левом верхнем углу которых представлены их номера. Внутри модулей кружками обозначены вершины графа с соответствующими номерами внутри. Пунктирные линии обозначают связи модулей МС. Из рис. 14,а видно, что загрузка канала в модулях 4-5-6 и 7-8-9 значительно больше, чем в модулях 1-2-3. Это влияет на общее время выполнения задачи и влечет за собой его увеличение. Вариант размещения на рис. 14,б является более приемлемым с точки зрения общего времени выполнения задачи в целом, так как загрузка канала в первой, второй и третьей строках МС распределена равномерно, предлагается устройство для оценки степени оптимальности размещения в многопроцессорных гиперкубических циклических системах. Предлагаемое устройство может использоваться в области проектирования ВС, например, при размещении процессов (алгоритмов, задач, данных, файлов и т.п.) и позволяет выполнять оценку степени оптимальности размещения в многопроцессорных кубических циклических системах.

Принцип оценки степени оптимальности размещения показан на рис. 15 и 16.

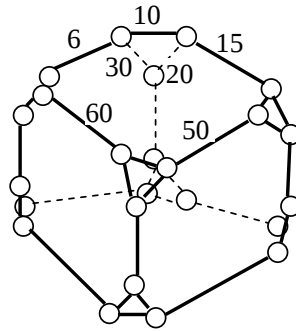


Рис. 15. Принцип оценки степени оптимальности размещения

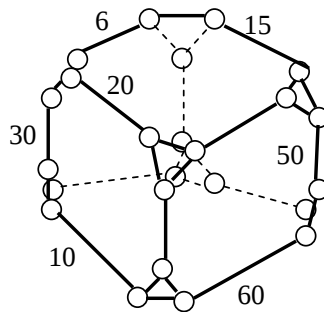


Рис. 16. Принцип оценки степени оптимальности размещения

Из анализа рис. 15 видно, что основная нагрузка в данном случае приходится на верхний слой многопроцессорной кубической циклической системы, что не является оптимальным, так как основной трафик и нагрузка приходится на верхние процессорные модули, тогда как нижние остаются, не задействованы. Качество размещения, представленное на рис. 16 более оптимально, так как нагрузка в данном случае распределена более равномерно.

Заключение. В ходе работы было предложено устройство, которое может использоваться в области проектирования ВС, например, при размещении процессов (алгоритмов, задач). Устройство позволяет производить оценку качества размещения в МС по критерию минимизации интенсивности взаимодействия процессов и данных.

Дальнейшим развитием и продолжением предложенных решений может являться их детализация до соответствующих принципиальных электрических схем с потенциальным внедрением в технологическое производство.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Воеводин В.В., Воеводин Вл.В.* Параллельные вычисления. – СПб.: БХВ–Петербург. 2002. – 608 с.
2. *Корнеев В.В.* Параллельные вычислительные системы. – М.: Нолидж. 1999. – 340 с.
3. *Оре О.* Теория графов. – М.: Наука, 1968. – 352 с.
4. Патент РФ №2193796. Устройство для формирования субоптимального размещения и его оценки / *Борзов Д.Б., Зотов И.В., Титов В.С.*; заявл. 29.01.2001; опубл. 27.11.2002, БИ №33. – 14 с.
5. *Борзов Д.Б., Титов В.С.* Параллельные вычислительные системы (архитектура, принципы размещения задач): монография. – Курск: Курс. гос. тех. ун-т., 2009. – 159 с.
6. *Борзов Д.Б., Титов В.С.* Вопросы проектирования и динамической реконфигурации топологии систем логического управления в системах высокой готовности: монография. – Курск: Юго-Запад. гос. ун-т., 2015. – 282 с.
7. *Борзов Д.Б.* Аппаратные средства планирования размещения задач в мультипроцессорных системах критического назначения (теоретические основы): монография. – Курск: Юго-Запад. гос. ун-т., 2018. – 179 с.
8. *Морозов К.К., Одинокоев В.Г., Курейчик В.М.* Автоматизированное проектирование конструкций радиоэлектронной аппаратуры: учеб. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1983. – 280 с.
9. *Курейчик В.М., Глушань В.М., Щербаков Л.И.* Комбинаторные аппаратные модели и алгоритмы в САПР. – М.: Радио и связь, 1990. – 216 с.
10. Патент РФ №2275681. Устройство поиска нижней оценки размещения в матричных системах / *Борзов Д.Б.*; заявл. 6.10.2004; опубл. 27.04.2006, БИ №12. – 16 с.
11. *Борзов Д.Б., Аль-Мараят Б.И., Тишкин А.П.* Акселератор планирования размещения задач в кластерных вычислительных системах высокой готовности // Известия вузов. Приборостроение. – 2008. – № 2. – С. 29-33.
12. Патент РФ №2356085. Устройство подсчета значения интенсивности размещения в полносвязных матричных системах при направленной передаче информации / *Борзов Д.Б., Бабаскина А.Ю., Ключникова О.Е.*; заявл. 1.10.2007; опубл. 20.05.2009, БИ №14. – 17 с.
13. Патент РФ №2398270. Устройство поиска нижней оценки размещения в полносвязных матричных системах при однонаправленной передаче информации / *Борзов Д.Б.*; заявл. 11.02.2009; опубл. 27.08.2010, БИ 24. – 21 с.
14. Патент РФ №2398270. Устройство поиска нижней оценки размещения в полносвязных матричных системах при однонаправленной передаче информации / *Борзов Д.Б., Чеснокова Е.О.*; заявл. 11.02.2009; опубл. 27.08.2010, БИ 24. – 21 с.
15. Патент РФ №2406135. Устройство поиска нижней оценки размещения в системах с матричной организацией при направленной передаче информации / *Борзов Д.Б., Бобынцев Д.О.*; заявл. 9.02.2009, опубл. 10.12.2010, БИ №34. – 12 с.
16. Патент РФ №2421805. Устройство поиска нижней оценки размещения в полносвязных матричных системах при двунаправленной передаче информации / *Борзов Д.Б., Чеснокова Е.О., Марухленко А.Л., А-А Муджиб Мохаммед Яхья*; заявл. 24.11.2008, опубл. 27.06.2011. – 17 с.
17. Патент на изобретение RU 2688236, Устройство для подсчета минимального значения интенсивности размещения в многопроцессорных кубических циклических системах при однонаправленной передаче информации / *Борзов Д.Б., Масюков И.И., Титенко Е.А.* 21.05.2019. Заявка № 2018120597 от 05.06.2018.
18. Патент РФ №2628329. Устройство для поиска минимального значения интенсивности размещения в тороидальных системах при направленной передаче информации / *Борзов Д.Б., Дюбрюкс С.А.*; заявл. 27.07.2016; опубл. 15.08.2017, БИ №23.
19. Патент РФ №2323467. Устройство оценки качества размещения в системах с матричной организацией / *Борзов Д.Б., Заикина Т.А., Аль-Мараят Б.И., Хасан Н.М.*; заявл. 9.01.2007; опубл. 27.04.2008, БИ №12. – 16 с.
20. Патент РФ №2279709. Устройство для оценки качества размещения в матричных системах / *Борзов Д.Б., Жолобов А.А.*; заявл. 28.03.2005; опубл. 10.07.2008, БИ №19. – 12 с.

REFERENCES

1. Voevodin V.V., Voevodin V.I. Parallel'nye vychisleniya [Parallel computing]. St. Petersburg: BKhV–Peterburg. 2002, 608 p.
2. Korneev V.V. Parallel'nye vychislitel'nye sistemy [Parallel computing systems]. Moscow: Nolidzh, 1999, 340 p.
3. Ore O. Teoriya grafov [Graph Theory]. Moscow: Nauka, 1968, 352 p.
4. Borzov D.B., Zotov I.V., Titov V.S. Patent RF №2193796. Ustroystvo dlya formirovaniya suboptimal'nogo razmeshcheniya i ego otsenki [Patent RF No. 2193796. Device for the formation of suboptimal placement and its evaluation]; Appl. 01/29/2001; publ. 11/27/2002, BI No. 33, 14 p.
5. Borzov D.B., Tiov V.S. Parallel'nye vychislitel'nye sistemy (arkhitektura, printsipy razmeshcheniya zadach): monografiya [Parallel computing systems (architecture, principles of task placement): monograph]. Kursk: Kurs. gos. tekhn. un-t., 2009, 159 p.
6. Borzov D.B., Tiov V.S. Voprosy proektirovaniya i dinamicheskoy rekonfiguratsii topologii sistem logicheskogo upravleniya v sistemakh vysokoy gotovnosti: monografiya [Issues of design and dynamic reconfiguration of the topology of logical control systems in high readiness systems: monograph]. Kursk: Yugo-Zapad. gos. un-t., 2015, 282 p.
7. Borzov D.B. Apparatskiye sredstva planirovaniya razmeshcheniya zadach v mul'tiprotsessornykh sistemakh kriticheskogo naznacheniya (teoreticheskie osnovy): monografiya [Hardware tools for scheduling tasks placement in critical multiprocessor systems (theoretical foundations): monograph]. Kursk: Yugo-Zapad. gos. un-t., 2018, 179 p.
8. Morozov K.K., Odinkov V.G., Kureychik V.M. Avtomatizirovannoe proektirovanie konstruktivnykh radioelektronnoy apparatury: ucheb. posobie dlya vuzov [Computer-aided design of electronic equipment structures: Textbook for universities]. Moscow: Radio i svyaz', 1983, 280 p.
9. Kureychik V.M., Glushan' V.M., Shcherbakov L.I. Kombinatornye apparatnye modeli i algoritmy v SAPR [Combinatorial hardware models and algorithms in CAD]. Moscow: Radio i svyaz', 1990, 216 p.
10. Borzov D.B. Patent RF №2275681. Ustroystvo poiska nizhney otsenki razmeshcheniya v matrichnykh sistemakh [Device for searching for a lower placement estimate in matrix systems]; Appl. October 6, 2004; publ. 04/27/2006, BI No. 12, 16 s.
11. Borzov D.B., Al'-Marayat B.I., Tipikin A.P. Akselerator planirovaniya razmeshcheniya zadach v klasternykh vychislitel'nykh sistemakh vysokoy gotovnosti [Accelerator for task placement scheduling in high-availability cluster computing systems], *Izvestiya vuzov. Priborostroenie* [Izvestiya vuzov. Instrumentation], 2008, No. 2, pp. 29-33.
12. Borzov D.B., Babaskina A.Yu., Klyuchnikova O.E. Patent RF №2356085. Ustroystvo podscheta znacheniya intensivnosti razmeshcheniya v polnosvyaznykh matrichnykh sistemakh pri napravlennoy peredache informatsii [Patent RF No. 2356085. A device for calculating the value of the placement intensity in fully connected matrix systems during directed information transfer]; Appl. 1.10.2007; publ. 05/20/2009, BI No. 14, 17 p.
13. Borzov D.B. Patent RF №2398270. Ustroystvo poiska nizhney otsenki razmeshcheniya v polnosvyaznykh matrichnykh sistemakh pri odnonapravlennoy peredache informatsii [Patent RF No. 2398270. A search device for a lower location estimate in fully connected matrix systems with unidirectional information transfer]; Appl. 02/11/2009; publ. 27.08.2010, BI 24, 21 p.
14. Borzov D.B., Chesnokova E.O. Patent RF №2398270. Ustroystvo poiska nizhney otsenki razmeshcheniya v polnosvyaznykh matrichnykh sistemakh pri odnonapravlennoy peredache informatsii [Patent RF No. 2398270. Device for searching for a lower location estimate in fully connected matrix systems with unidirectional information transfer]; Appl. 02/11/2009; publ. 27.08.2010, BI 24, 21 p.
15. Borzov D.B., Bobyntsev D.O. Patent RF №2406135. Ustroystvo poiska nizhney otsenki razmeshcheniya v sistemakh s matrichnoy organizatsiey pri napravlennoy peredache informatsii [Patent RF No. 2406135. Device for searching for a lower estimate of placement in systems with a matrix organization in the case of directed transmission of information]; Appl. February 9, 2009, publ. 12/10/2010, BI No. 34, 12 p.
16. Borzov D.B., Chesnokova E.O., Marukhlenko A.I., A-A Mudzhib Mokhammed Yakh"ya. Patent RF №2421805, Ustroystvo poiska nizhney otsenki razmeshcheniya v polnosvyaznykh matrichnykh sistemakh pri dvunapravlennoy peredache informatsii [Patent RF No. 2421805. Search device for a lower location estimate in fully connected matrix systems for bidirectional information transfer]; Appl. 11/24/2008, publ. 06/27/2011, 17 p.

17. *Borzov D.B., Masyukov I.I., Titenko E.A.* Patent na izobretenie RU 2688236, Ustroystvo dlya podscheta minimal'nogo znacheniya intensivnosti razmeshcheniya v mnogoprotsessornykh kubicheskikh tsiklicheskikh sistemakh pri odnonapravlennoy peredache informatsii [Patent for invention RU 2688236. A device for calculating the minimum value of the placement intensity in multiprocessor cubic cyclic systems with unidirectional information transfer]. 05/21/2019. Appl. No. 2018120597 dated 06/05/2018.
18. *Borzov D.B., Dyubryuks S.A.* Patent RF №2628329. Ustroystvo dlya poiska minimal'nogo znacheniya intensivnosti razmeshcheniya v toroidal'nykh sistemakh pri napravlennoy peredache informatsii [Patent RF No. 2628329. Device for finding the minimum value of the placement intensity in toroidal systems with directional information transfer]; Appl. 07/27/2016; publ. 08/15/2017, BI No. 23.
19. *Borzov D.B., Zaikina T.A., B.I. Al'-Marayat, Khasan N.M.* Patent RF №2323467. Ustroystvo otsenki kachestva razmeshcheniya v sistemakh s matrichnoy organizatsiey [Patent RF No. 2323467. A device for assessing the quality of placement in systems with a matrix organization.]; Appl. January 9, 2007; publ. 04/27/2008, BI No. 12, 16 p.
20. *Borzov D.B., Zholobov A.A.* Patent RF №2279709. Ustroystvo dlya otsenki kachestva razmeshcheniya v matrichnykh sistemakh [Device for assessing the quality of placement in matrix systems / RF Patent No. 2279709]; Appl. 03/28/2005; publ. 07/10/2008, BI No. 19, 12 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Курейчик.

Иваненко Кирилл Александрович – Юго-Западный государственный университет; e-mail: k.iwanenko@gmail.com; г. Курск, Россия; тел.: +89913315455; кафедра вычислительной техники; аспирант.

Чернецкая Ирина Евгеньевна – e-mail: white@mail.ru; д.т.н.; доцент; зав. кафедрой вычислительной техники.

Борзов Дмитрий Борисович – e-mail: borzovdb@kursknet.ru; д.т.н.; доцент; профессор кафедры вычислительной техники.

Титов Виталий Семенович – e-mail: titov-kstu@rambler.ru; д.т.н.; профессор кафедры вычислительной техники.

Сизов Александр Семенович – e-mail: as.sizov@yahoo.com; д.т.н.; профессор программной инженерии.

Ivanenko Kirill Alexandrovich – South-West State University; e-mail: k.iwanenko@gmail.com; Kursk, Russia; phone: +89913315455 the department of computer science; postgraduate.

Chernetskaya Irina Evgenievna – e-mail: white@mail.ru; dr. of eng. sc.; associate professor; head of the department of computer science.

Borzov Dmitry Borisovich – e-mail: borzovdb@kursknet.ru; dr. of eng. sc.; associate professor; professor of the department of computer science.

Titov Vitaly Semenovich – e-mail: titov-kstu@rambler.ru; dr. of eng. sc.; professor of the department of computer science.

Sizov Aleksander Semenovich – e-mail: as.sizov@yahoo.com; dr. of eng. sc. professor of the department of computer science.

В.С. Панищев, О.О. Хомяков, Д.В. Титов, С.И. Егоров**МЕТОД РАСПОЗНАВАНИЯ ТЕКСТОВЫХ ДАННЫХ
НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ**

Целью исследования является исследование проблем, возникающих в процессе цифровой обработки изображений, в системах получения текстовых характеристик объектов продукции. Таких как выделение объектов, попадающих в кадры видеопотока и распознавание текстовой маркировки, без использования специализированного аппаратного обеспечения. В частности, проблемы, возникающие при работе с изображениями, содержащими различный уровень шумов и искажений. В задачи исследования входит сравнение и анализ методов и алгоритмов, используемых для цифровой обработки изображений, с целью поиска объектов в видеопотоке, выделения и сегментации участков, содержащих текст, распознавания текста и классификации полученных данных. Построение математической модели обработки изображений, с целью получения текстовой информации о продукции в кадрах видеопотока, с возможностью работы с различными объектами. Оценить точность распознавания при различном уровне шума и провести сравнительный анализ с альтернативными решениями на основе полученных данных. В результате работы проведен анализ методов, используемых для работы с кадрами видеопотока с целью выделения определенных объектов. Проведен анализ методов, используемых для цифровой обработки изображений, в частности для выделения текстовой информации. Разработан алгоритм классификации частей текстовой информации на основе эталонных признаков. Представлена математическая модель обработки изображений для выделения искомого объекта в кадре, получения текстовой информации и классификации характеристик продукции. Проведено тестирование данных методов и алгоритмов в различных условиях. Проведено сравнение реализации классификатора символов с альтернативным вариантом. Наглядно представлены примеры и результаты работы разработанной системы.

OCR; обработка видеопотока; выделение текстовой информации; классификация; распознавание образов; маркировка.

V.S. Panishchev, O.O. Khomyakov, D.V. Titov, S.I. Egorov**METHOD FOR RECOGNIZING TEXT DATA IN IMAGES**

The purpose of the study is to study the problems arising in the process of digital image processing in systems for obtaining textual characteristics of product objects. Such as the selection of objects that fall into the frames of the video stream and the recognition of text markings, without the use of specialized hardware. In particular, the problems that arise when working with images containing different levels of noise and distortion. The objectives of the study include a comparative and analytical examination of diverse methods and algorithms utilized in the realm of digital image processing. The primary objectives include identifying, segmenting, and classifying text-containing portions within the video stream. The study aims to construct a mathematical model for text extraction from video frames that is adaptable to a wide array of objects. Evaluate recognition accuracy under varying levels of noise and perform a comparative analysis against alternative solutions based on the acquired data. The presented system analyzes the frames of the video stream and classifies the characteristics of the products in the frame. The solution demonstrates the behaviour and capabilities of digital image processing methods in various conditions in relation to the tasks of text classification and object search in a video stream. During the development of this system, a comparison of various options for recognizing symbolic information was carried out.

OCR; video stream processing; text information extraction; classification; image recognition; labeling.

Введение. В данный момент системы, опирающиеся в процессе своей работы на характеристики продукции, активно используются в различных областях. Основными применениями является автоматизация процессов производств и складских помещений. Системы, решающие задачи используют в своей основе информацию, наносимую производителем или потребителем при приобретении продукции, необходимую исключительно для автоматизации технических процессов.

Постановка задачи. В ходе данной работы был разработан прототип системы позволяющей исключить данные недостатки за счет работы с символьной информацией, понятной человеку, наносимой на этикетки продукции производителем. На данный момент существуют решения, использующие только символьную информацию понятную человеку. Данные решения используют в своей работе специализированные технические устройства, позволяющие увеличить точность распознавания. В текущий момент актуальной задачей является уход от специализированных технических устройств, и в данной сфере ведутся активные разработки. [1–4, 6, 7] В данной работе рассматривается пример системы, для работы которой не требуются подобные устройства.

Метод решения задачи. Система выполняет такие задачи как: получение изображения продукции из видеопотока, обработку изображения, распознавание текста, классификацию характеристик продукции. Результатом работы системы является текстовая информация о характеристиках, которая может быть использована в других информационных системах для решения прикладных технических задач.

В ходе данной работы рассматривается использование решения на примере обработки изображений элементов резервного питания, используемых в авионике. Однако данное решение универсально и может быть использовано применительно к другим изделиям, в частности проводилось тестирование с определением характеристик автоматических выключателей.

На вход системы подаются кадры видеопотока с подключенной к устройству камеры, результатом работы является классифицированная текстовая информация описывающая набор характеристик продукции. Алгоритм работы в общем виде состоит из обнаружения объекта в кадре, предобработки изображения, распознавания символьной информации и классификации полученной информации для получения характеристик. Результат работы алгоритма может быть представлен в виде функции R:

$$R = C_c(C_t(P(S(I))), P_a(S(I))), \quad (1)$$

где I – кадр видеопотока, S – функция поиска объекта в кадре видеопотока, P – функция предобработки изображения, P_a – функция получения дополнительной информации необходимой для классификации характеристик, C_t – функция распознавания символьной информации на изображении, C_c – функция классификации характеристик.

Кадр видеопотока I, получаемый с камеры, представляет из себя матрицу размерности x и y.

$$I(x, y) = \begin{bmatrix} i_{(0,0)} & \cdots & i_{(x,0)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ i_{(y,0)} & \cdots & i_{(x,y)} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где i – кортеж, содержащий интенсивность цвета точки изображения в RGB представлении (красный, зеленый, синий цвета соответственно), в ходе данной работы диапазон интенсивности находится в пределах между 0 и 255 (стандартное 8-битное изображение).

Этап обнаружения объекта служит для отсеивания кадров видеопотока, содержащих объект продукции. В общем виде данный алгоритм можно представить как функцию

$$S(I) = V(T(I)), \quad (3)$$

где T – функция сравнения с шаблоном, V – валидация формы объекта.

Сравнение с шаблоном позволяет с высокой точностью определить присутствие в кадре объекта продукции. Метод основан на сравнении дескрипторов искомого изображения (шаблона) и дескрипторов кадра видеопотока. Для осуществления сравнения строится набор дескрипторов этих изображений после чего находится расстояние между этими наборами и в случае, если расстояние не превышает определенный порог, принимается решение о том, что в кадре находится искомым объект [8, 9].

Процесс получения дескрипторов начинается с поиска особых точек изображения. Данные точки вычисляются для исходного изображения и набора уменьшенных изображений. Для данных точек вычисляется мера Харриса, после чего точки чья мера принимает слишком маленькое значение отсеиваются. Далее вычисляется центроид ориентации (угол ориентации особой точки), через вычисление момента яркости в окрестностях каждой особой точке.

Дескрипторы вычисляются как бинарный вектор особенностей точки, характеризующийся Гауссовским распределением случайных точек вокруг ней. Использование данного подхода для поиска дескрипторов позволяет стабильно обнаруживать шаблонное изображение даже при условии трансформаций перспективы, изменяющегося освещения и повороту изображения.

Изображение, на котором был найден объект изображения впоследствии проходит проверку на соответствие формы. Данный этап позволяет исключить изображения на которых продукция не полностью попадает в кадр и изображения, на которых содержатся критические перекрытия объекта другими элементами, не позволяющие провести полноценную классификацию текста [10, 11]

Для выполнения проверки на форму в первую очередь происходит поиск значащей информации. Изображение проходит фильтрацию по нижнему и верхнему порогу, а для частных случаев применяется фильтрация в разных каналах изображения. Далее на полученном бинаризованном изображении компенсируются незначительные перекрытия объекта для распознавания, для этого используются методы эрозии и дилатации.

Далее выполняется поиск контуров объекта на изображении и его аппроксимация (алгоритм Рамера-Дугласа-Пекера). После чего полученный контур объекта проверяется на соответствие форме. В случае если изображение удовлетворяет проверке, оно поступает на дальнейшие этапы распознавания. Кроме того, передается дополнительная информация, полученная на данном этапе, в частности информация о контурах и положении объекта.

Цель этапа предобработки изображения заключается в удалении шумов и артефактов изображения, компенсации вращения изображения и поиска регионов с текстом. В результате работы данного этапа вычисляются блоки изображения, содержащие текст которые в последствии передаются на этап распознавания текста. Кроме того, генерируется информация о взаимном положении элементов текста, и информация о цветовой составляющей изображения которая впоследствии может использоваться для классификации характеристик продукции.

Функция предобработки может быть представлена в следующем виде

$$P(s) = P_i(P_l(P_o(P_r(P_g(s))))). \quad (4)$$

Функция получения дополнительной информации, представленной в виде кортежа с информацией о взаимном положении элементов и цветовых характеристиках участков изображения, описывается следующим образом

$$P_a(s) = P_c(P_r(P_g(s))), P_l(P_o(P_r(P_g(s))))), \quad (5)$$

где s – кортеж, содержащий информацию, полученную на этапе поиска изображения (само изображение и информацию о положении объекта продукции), P_g – функция удаления шумов, P_r – функция исправления наклона изображения, P_o – функция бинаризации изображения методом Оцу, P_l – функция разбиения изображения на строки и символы, P_c – функция получения цветовых характеристик изображения, P_l – функция получения информации о положении элементов текста.

Первым этапом предобработки полученного кадра является фильтрация шумов, для этого используется алгоритм Гаусса. После чего происходит поиск угла поворота объекта с использованием информации, полученной на этапе обнаружение объекта.

В качестве точки вращения выбирается нижняя точка аппроксимированного контура объекта. Далее определяется направление вращения объекта для этого происходит расчет расстояния до соседних точек контура, и выбирается точка с наибольшим расстоянием. Для расчета угла наклона выбирается горизонтальная ось, проходящая через нижнюю точку контура объекта. Относительно этой оси с использованием нижней точки контура и соседней точки с наибольшим расстоянием вычисляется угол наклона изображения. С использованием угла наклона строится матрица аффинного преобразования, с помощью которой выполняется поворот изображения [12].

После выполнения данного алгоритма распознаваемый объект принимает горизонтальное положение в пространстве, данное преобразование необходимо, чтобы увеличить точность классификации символов, так как система классификации символов показывает наилучший результат при распознавании строк текста с незначительным вращением.

Следующими этапами являются анализ цветовой характеристики изображения, для ряда частных случаев это позволяет, как отсеять незначительную информацию, так и повысить точность в дальнейшем на этапе классификации характеристик. Для составления подобной цветовой характеристики составляется матрица соответствия, описывающая частные случаи цветовой характеристики.

После этого происходит бинаризация изображения методом Оцу, позволяющая в общем случае выделить элементы изображения, содержащие текст. Элементы, содержащие текст передаются алгоритму поиска строк, слов и символов. Поиск строк в первую очередь находит базовые линии каждой строки, по которым происходит поиск интервалов разбиения. По базовым линиям находятся расстояния между контурами, описывающими символы текста, далее вычисляются интервалы для разбиения строк на символы и слова. Разбитые на слова элементы изображения далее передаются на этап классификации символов [13].

На этапе распознавания символьной информации выполняется преобразование элементов изображения, содержащих текст в текстовую информацию, которая впоследствии может обрабатываться цифровыми методами.

Классификация символов выполняется с использованием библиотеки Keras. Для обучения была создана выборка, содержащая реальные примеры изображений текста, наносимого на элементы резервного питания. Для увеличения точности работы сети, и увеличения устойчивости к различным искажениям, первоначальные примеры изображений были искусственным образом размножены с изменением. Для создания искусственных искажений использовались: изменение цветовой

характеристики изображения; нанесение дополнительных искажающих элементов; наклон текста; изменение геометрии изображения. В качестве основы для обучения была выбрана сверточная рекуррентная нейронная сеть [14–19].

Этап анализа результатов классификации символьной информации служит для получения характеристик продукта, классифицированных по категории. Характеристики продукта, полученные в результате работы данного этапа, могут быть представлены в любом необходимом виде, зависящем от сферы применения. В общем виде анализ результатов распознавания представляет собой кортеж пар названия характеристики и её значения, функция получения которого представляет собой

$$C_c(t_i, a_i) = H(S_i), \quad (6)$$

для S_i выполняется условие

$$\min(S_i - d_j), d_j \in D(t_i, a_i), S_i \in S, \quad (7)$$

где t_i – результат распознавания блока текста, a_i – дополнительная информация о блоке текста, d_j – признак блока текста, D – функция, формирующая признаки текста, S – набор эталонных признаков характеристик, H – функция, формирующая кортеж результата (название характеристики и её значения).

Классификация может быть выполнена за счет того, что каждая из характеристик обладает специфичными признаками, позволяющими однозначно определить её. Такими признаками являются взаимное сочетание определенных символов, взаимное положение элементов относительно друг друга и абсолютное положение в пространстве, определенный набор возможных вариаций, специфичный цвет нанесения или фона для отдельных характеристик (данный признак является зависимым от производителя, но в тоже время позволяет увеличить точность классификации при работе с изображениями продукции нескольких производителей).

Для каждой характеристики формируется вектор эталонных признаков S , позволяющий выявить принадлежность определенной текстовой составляющей изображения к определенной характеристике. На основании данного вектора производится расчет расстояния от полученных признаков $D(t_i, a_i)$ текстовой информации, до эталонных признаков. Таким образом текстовая информация классифицируется как характеристика, для которой расстояния до эталонных признаков является наименьшим $\min(S_i - d_j)$. В ряде случаев, этот подход приводит к получению одинаковых расстояний и невозможности однозначной классификации характеристики.

Для однозначной классификации характеристик, а также для повышения общей точности классификации вводится матрица эталонных признаков. Матрица эталонных признаков содержит информацию о взаимном влиянии признаков друг на друга и влиянии дополнительной информации [20].

С использованием матрицы эталонных признаков становится возможным использовать дополнительную информацию, такую как взаимное положение элементов относительно друг друга, цветовая составляющая, исходные размеры распознаваемого блока. Таким образом имея набор дополнительной информации об изображении, можно изменять расчет признаков характеристик.

Результаты и их обсуждение. Точность обнаружения объекта продукции на кадре видеопотока с использованием данного алгоритма была протестирована в трех вариациях с использованием видеопотока с различным процентом перекрытий объекта и различным уровнем шума, результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Статистические данные по точности обнаружения объекта

Уровень шума	Площадь перекрытия объекта	Точность обнаружение продукта в кадре
До 5%	До 5%	98%
До 25%	До 15%	81%
До 50%	До 30%	21%

Точность классификации символов составила 97.66%. Данный подход был выбран при финальной реализации системы, так как он превосходит подход, основанный на сравнении с эталоном [21], которая в свою очередь показывает точность в 92.03%. Сравнение представлено в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение точности распознавания символов

Уровень шума	Точность распознавания (Разработанное решение)	Точность распознавания (Решение на основе сравнения с эталоном [21])
До 5%	97.66%	92.03%
До 25%	91.76%	70.5%
До 50%	80%	-

Процессы получения кадра видеопотока, выделения продукции и выделения блоков текста наглядно представлены на рис. 1.

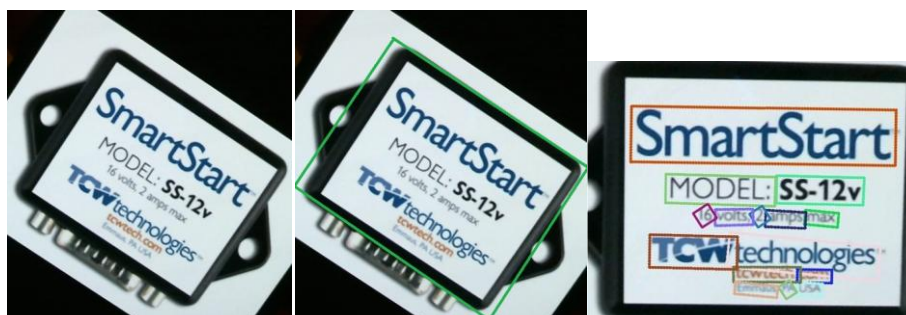


Рис. 1. Пример работы системы, получение кадра из видеопотока, выделение объекта продукции, выделение блоков текста

Выводы. В ходе работы произведен анализ различных алгоритмов и методов по распознаванию символьной информации и обработке кадров видеопотока с целью выделения объекта продукции в кадре. Разработанная система протестирована в различных условиях.

Данное решение обладает универсальностью поскольку возможность использования нескольких шаблонных изображений на этапе поиска объекта в кадре позволяет использовать данную систему для работы с различной продукцией, а система классификации характеристик, основанная на матрице эталонных признаков, показывает наилучший результат при наличии большого количества эталонных признаков.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Копылов И.В., Казаков А.В., Малыгин Л.Л. Идентификация маркировок рулонов металлопроката // Вестник череповецкого государственного университета. – 2016. – № 5 (74). – С. 12-15.
2. Hsu C., Yang Y., Chang A., Morsalin S., Shen G., Shiu L. Automatic Recognition of Container Serial Code // 2023 International Conference on Consumer Electronics. – 2023. – P. 257-258.
3. Feng W., He W., Yin F., Zhang X., Liu C. TextDragon: An End-to-End Framework for Arbitrary Shaped Text Spotting // International Conference on Computer Vision (ICCV). – 2019. – P. 9075-9084.
4. Yazdi M., Bouwmans T. New Trends on Moving Object Detection in Video Images Captured by a moving Camera: A Survey // Computer Science Review. – 2018. – No. 28. – P. 157-177.
5. Провоторов А.В., Орлов А.А. Методика поэтапного обнаружения маркировки слябов // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – №. 6. – С. 98-98.
6. Пыж С.В., Ганичева О.Г. Мобильная автоматизированная система инвентаризации металлургической продукции и обеспечения безопасности в складских помещениях // Научно-технический прогресс в чёрной металлургии: Сб. статей. Череповец, 2013. – С. 266-271.
7. Xiang Z., You Z., Qian M., Zhang J. Metal stamping character recognition algorithm based on multi-directional illumination image fusion enhancement technology // EURASIP Journal on Image and Video Processing. – 2018. – Vol. 18. – P. 1-11. – DOI: 10.1186/s13640-018-0321-7.
8. Захаров А.А., Жизняков А.Л., Титов В.С. Метод нахождения соответствий на изображениях с использованием структур // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 5. – С. 810-817. – DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-5-810-817.
9. Горемыкин И.В., Бутенко Л.Н. Дескрипторы цветовых регионов в задаче обеспечения цветовой согласованности изображения // Перспективы развития информационных технологий. – 2015. – № 27. – С. 6-17.
10. Силаков Н.В., Тассов К.Л. Обзор алгоритмов обнаружения текстовых областей на кадрах видеопотока // Вестник РГГУ. Серия: Информатика. Информационная безопасность. Математика. – 2020. – №. 2. – С. 27-45. – DOI: 10.28995/2686-679X-2020-2-27-45.
11. Mahajan S., Rani R., Trehan K. DELIGHT-Net: DEep and LIGHTweight network to segment Indian text at word level from wild scenic images // International Journal of Multimedia Information Retrieval. – 2023. – No. 12 (2). – P. 29-37.
12. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2012. – 1104 с.
13. Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение. – М.: БИНОМ, 2013. – 752 с.
14. Хомоненко А.Д., Яковлев Е.Л. Обоснование архитектуры сверточной нейронной сети для автономного распознавания объектов на изображениях бортовой вычислительной системой // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. – 2018. – Т. 10, № 6. – С. 86-93.
15. Busta M., Neumann L., Matas J. Deep TextSpotter: An End-to-End Trainable Scene Text Localization and Recognition Framework // 2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). – 2017. – P. 2223-2231.
16. Liu Y., Wang Y., Shi H. A Convolutional Recurrent Neural-Network-Based Machine Learning for Scene Text Recognition Application. Symmetry // Symmetry. – 2023. – No. 15 (4). – 849.
17. Liu X., Liang D., Yan S., Chen D., Qiao Y., Yan J. FOTS: Fast Oriented Text Spotting with a Unified Network // Computer Vision and Pattern Recognition. – 2018. – P. 5676-5685.
18. Chaitra Y., Dinesh R., Gopalakrishna M., Prakash B.A. Deep-CNNLT: Text Localization from Natural Scene Images Using Deep Convolution Neural Network with Transfer Learning // Arabian Journal for Science and Engineering. – 2021. – No. 47 (9). – P. 9629-9640.
19. He T., Tian Z., Huang W., Shen C., Qiao Y., Sun C. An End-to-End TextSpotter with Explicit Alignment and Attention // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2018. – P. 5020-5029.
20. Bulatov K.B. A method to reduce errors of string recognition based on combination of several recognition results with per-character alternatives // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование. – 2019. – Т. 12, №. 3. – С. 74-88. – DOI: 10.14529/mmp190307.
21. Панищев В.С., Труфанов М.И., Добросердов О.Г., Хомяков О.О. Распознавание символической информации для автоматизации производственных процессов // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2021. – № 1. – С. 122-137.

REFERENCES

1. Kopylov I.V., Kazakov A.V., Malygin L.L. Identifikatsiya markirovok rulonov metalloprokata [Identification of markings of rolled metal rolls], *Vestnik cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Cherepovets State University], 2016, No. 5 (74), pp. 12-15.
2. Hsu C., Yang Y., Chang A., Morsalin S., Shen G., Shiu L. Automatic Recognition of Container Serial Code, *2023 International Conference on Consumer Electronics*, 2023, pp. 257-258.
3. Feng W., He W., Yin F., Zhang X., Liu C. TextDragon: An End-to-End Framework for Arbitrary Shaped Text Spotting, *International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2019, pp. 9075-9084.
4. Yazdi M., Bouwmans T. New Trends on Moving Object Detection in Video Images Captured by a moving Camera: A Survey, *Computer Science Review*, 2018, No. 28, pp. 157-177.
5. Provotorov A.V., Orlov A.A. Metodika po etapnogo obnaruzheniya markirovki slyabov [Methodology for step-by-step detection of slab markings], *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2012, No. 6, pp. 98-98.
6. Pyzh S.V., Ganicheva O.G. Mobil'naya avtomatizirovannaya sistema inventarizatsii metallurgicheskoy produktsii i obespecheniya bezopasnosti v skladskikh pomeshcheniyakh [Mobile automated system for inventory of metallurgical products and security in warehouses], *Nauchno-tekhnicheskii progress v chernoy metallurgii: Sb. statey* [Scientific and technical progress in ferrous metallurgy: Collection of articles]. Cherepovets, 2013, pp. 266-271.
7. Xiang Z., You Z., Qian M., Zhang J. Metal stamping character recognition algorithm based on multi-directional illumination image fusion enhancement technology, *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2018, Vol. 18, pp. 1-11. DOI: 10.1186/s13640-018-0321-7.
8. Zakharov A.A., Zhiznyakov A.L., Titov V.S. Metod nakhozhdeniya sootvetstviy na izobrazheniyakh s ispol'zovaniem struktur [Method for finding correspondences in images using structures], *Komp'yuternaya optika* [Computer Optics], 2019, Vol. 43, No. 5, pp. 810-817. – DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-5-810-817.
9. Goremykin I.V., Butenko L.N. Deskriptory tsvetovykh regionov v zadache obespecheniya tsvetovoy soglasovannosti izobrazheniya [Descriptors of color regions in the problem of ensuring color consistency of an image], *Perspektivy razvitiya informatsionnykh tekhnologiy* [Prospects for the development of information technologies], 2015, No. 27, pp. 6-17.
10. Silakov N.V., Tassov K.L. Obzor algoritmov obnaruzheniya tekstovykh oblastey na kadrakh videopotoka [Review of algorithms for detecting text areas on video stream frames], *Vestnik RGGU. Seriya: Informatika. Informatsionnaya bezopasnost'. Matematika* [Bulletin of the Russian State University for the Humanities. Series: Computer Science. Information Security. Mathematics], 2020, No. 2, pp. 27-45. DOI: 10.28995/2686-679X-2020-2-27-45.
11. Mahajan S., Rani R., Trehan K. DELIGHT-Net: DEep and LIGHTweight network to segment Indian text at word level from wild scenic images, *International Journal of Multimedia Information Retrieval*, 2023, No. 12 (2), pp. 29-37.
12. Gonsales R., Vuds R. TSifrovaya obrabotka izobrazheniy [Digital image processing]. Moscow: Tekhnosfera, 2012, 1104 p.
13. Shapiro L., Stokman Dzh. Komp'yuternoe zrenie [Computer vision]. Moscow: BINOM, 2013, 752 p.
14. Khomonenko A.D., Yakovlev E.L. Obosnovanie arkhitektury svertochnoy neyronnoy seti dlya avtonomnogo raspoznavaniya ob"ektov na izobrazheniyakh bortovoy vychislitel'noy sistemoy [Justification of the architecture of a convolutional neural network for autonomous recognition of objects in images by an on-board computer system], *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli* [Science-intensive technologies in space research of the Earth], 2018, Vol. 10, No. 6, pp. 86-93.
15. Busta M., Neumann L., Matas J. Deep TextSpotter: An End-to-End Trainable Scene Text Localization and Recognition Framework, *2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2017, pp. 2223-2231.
16. Liu Y., Wang Y., Shi H. A Convolutional Recurrent Neural-Network-Based Machine Learning for Scene Text Recognition Application. Symmetry, *Symmetry*, 2023, No. 15 (4), 849.
17. Liu X., Liang D., Yan S., Chen D., Qiao Y., Yan J. FOTS: Fast Oriented Text Spotting with a Unified Network, *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2018, pp. 5676-5685.

18. Chaitra Y., Dinesh R., Gopalakrishna M., Prakash B.A. Deep-CNNLT: Text Localization from Natural Scene Images Using Deep Convolution Neural Network with Transfer Learning, *Ara-bian Journal for Science and Engineering*, 2021, No. 47 (9), pp. 9629-9640.
19. He T., Tian Z., Huang W., Shen C., Qiao Y., Sun C. An End-to-End TextSpotter with Explicit Alignment and Attention, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2018, pp. 5020-5029.
20. Bulatov K.B. A method to reduce errors of string recognition based on combination of several recognition results with per-character alternatives, *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Matematicheskoe modelirovanie i programmirovaniye* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematical modeling and programming], 2019, Vol. 12, No. 3, pp. 74-88. DOI: 10.14529/mmp190307.
21. Panishchev V.S., Trufanov M.I., Dobroserdov O.G., Khomyakov O.O. Raspoznavanie simvol'noy informatsii dlya avtomatizatsii proizvodstvennykh protsessov [Recognition of symbolic information for automation of production processes], *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* [News of the South-Western State University], 2021, No. 1, pp. 122-137.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Курейчик.

Панищев Владимир Славиевич – Юго-Западный государственный университет; e-mail: gskunk@yandex.ru; г. Курск, Россия; кафедра вычислительной техники; к.т.н.; доцент; с.н.с.

Хомяков Олег Олегович – e-mail: homyakov46rus@yandex.ru; кафедра вычислительной техники; аспирант.

Титов Дмитрий Витальевич – e-mail: amazing2004@inbox.ru; д.т.н.; доцент; профессор кафедры вычислительной техники.

Егоров Сергей Иванович – e-mail: sie58@mail.ru; д.т.н.; доцент; профессор кафедры вычислительной техники.

Panishchev Vladimir Slavievich – South-West State University; e-mail: gskunk@yandex.ru; Kursk, Russia; the department of computer science; cand. of eng. sc., associate professor; senior researcher.

Khomyakov Oleg Olegovich – e-mail: homyakov46rus@yandex.ru; the department of computer science; postgraduate.

Titov Dmitry Vitalievich – e-mail: amazing2004@inbox.ru; dr. of tech. sc., associate professor of the department of computer science.

Egorov Sergey Ivanovich – e-mail: sie58@mail.ru; dr. of eng. sc., associate professor; professor of the department of computer science.

УДК 004.9

DOI 10.18522/2311-3103-2023-4-65-74

К.С. Задиран

НОВЫЙ МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ДАННЫХ С НЕОДНОРОДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ РАБОЧИХ ЦИКЛОВ

Достижения в машиностроении позволяют создавать более совершенное и эффективное оборудование, однако при этом повышается его сложность и требования к управлению его жизненным циклом, техническим обслуживанием. К этому прибавляются требования по надежности и доступности, которые также создают дополнительные испытания при управлении жизненным циклом. Существуют различные стратегии планирования технического обслуживания. Среди них наиболее перспективной является предиктивная стратегия, основанная на прогнозировании остаточного ресурса оборудования. Существующие методы прогнозирования остаточного ресурса оборудования фокусируются на

применении исторических данных, агрегированных по рабочим циклам, при этом отсутствуют широко распространенные методы для прогнозирования по непрерывным данным, в том числе высокочастотным, получаемым с оборудования и содержащим рабочие циклы различной длительности и данные, записанные во время простоя оборудования. Для решения этой проблемы предлагается метод прогнозирования остаточного ресурса с выделением в исходных данных рабочих циклов и агрегированием их значений в одномерные векторы с целью дальнейшего использования для обучения модели прогнозирования. Результаты демонстрируют успешную применимость предложенного метода – в комбинации с моделью прогнозирования XGBoost удается достичь точности на данных, полученных с газотурбинного двигателя, со значением средней квадратической ошибки 14.02 и средней ошибкой 10.71.

Турбинные двигатели, управление жизненным циклом промышленного оборудования, остаточный ресурс оборудования, машинное обучение.

K.S. Zadiran

A NEW METHOD FOR PREDICTING THE REMAINING EQUIPMENT LIFE FOR HIGH-FREQUENCY DATA WITH NON-UNIFORM DUTY CYCLES

Advances in mechanical engineering make it possible to create more advanced and efficient equipment, but at the same time, its complexity and the requirements for managing its life cycle and maintenance increase. Requirements for reliability and availability also create additional challenges to life cycle management. There are various maintenance planning strategies. Among them, the most promising is the predictive strategy based on forecasting the remaining useful life of the equipment. Existing methods for predicting the remaining useful life of equipment focus on the use of historical data aggregated by work cycles, while there are no widely used methods for forecasting using continuous data, including high-frequency data, received from equipment and containing work cycles of various durations and data recorded during downtime. To solve this problem, a method for predicting the remaining useful life is proposed with the determination of work cycles in the initial data and the aggregation of their values into one-dimensional vectors for the purpose of further use for training the forecasting model. The results demonstrate the successful applicability of the proposed method - in combination with the XGBoost forecast model, it is possible to achieve accuracy on data obtained from a gas turbine engine with a root mean square error of 14.02 and mean average error of 10.71.

Turbine engines; industrial equipment lifecycle management; remaining useful life; machine learning.

Введение. Управление жизненным циклом промышленного оборудования является важной составляющей процесса эксплуатации [1]. От его эффективности зависит надежность, доступность, общая стоимость эксплуатации [2, 3]. Управление жизненным циклом включает работы по техническому обслуживанию и ремонту оборудования [3]. Сложность и стоимость ремонтных работ современного оборудования, а также условия эксплуатации и требования надежности и высокой доступности, в свою очередь, создают дополнительные испытания в планировании работ [4–6].

Существуют различные стратегии управления жизненным циклом, которые подразделяются на реактивные и проактивные [7, 8]. Наиболее перспективной среди проактивных стратегий является предиктивная [9], схема которой приведена на рис. 1. Эта стратегия основана на прогнозировании изменения состояния оборудования и его остаточного ресурса для оптимального планирования технического обслуживания.

Один из параметров, на основе прогнозирования которых строится предиктивная стратегия управления жизненным циклом, это – остаточный ресурс оборудования (Remaining Useful Life – RUL) [11]. Данный параметр обозначает величину ресурса компонента или системы оборудования от текущего момента до следующего отказа оборудования [12]. Его значение определяется, как интервал между текущим моментом времени t и моментом отказа t_{EOL} , и записывается в виде:

$$RUL_t = t_{EOL} - t. \quad (1)$$

Значение RUL коррелирует со значением остаточного ресурса, или, состоянием оборудования [12], и снижается одновременно с ним. Данная зависимость проиллюстрирована на рис. 2.

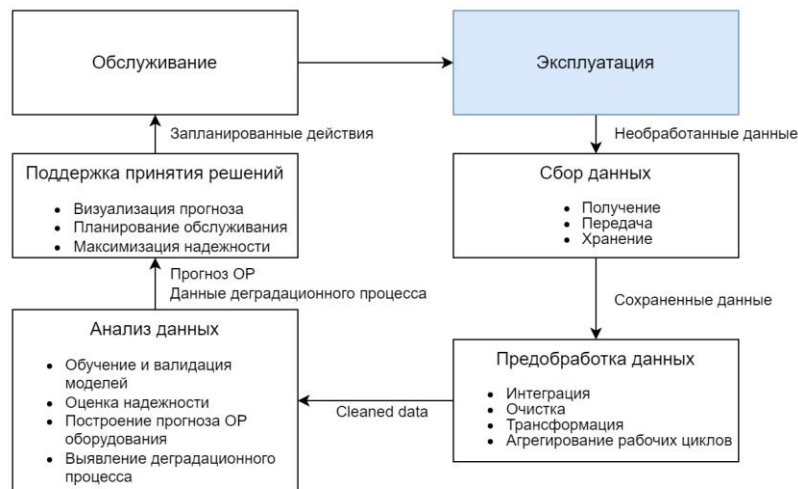


Рис. 1. Схема предиктивной стратегии управления жизненным циклом оборудования [10]

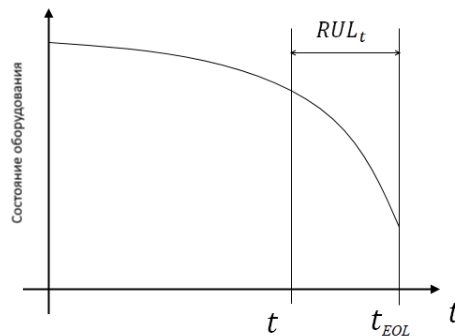


Рис. 2. Зависимость между моментом отказа и остаточным ресурсом [9]

Прогнозирование RUL широко исследовано, включает использование, как классических методов, так и нейросетевых моделей и методов глубокого обучения и других архитектур, а также их различных комбинаций [9, 13]. В работах исследованы классические методы прогнозирования: SVM [14, 15], деревья решений и градиентного бустинга XGBoost [16], k-ближайших соседей [9], байесовских методов [17]

и других. Нейросетевые модели и методы глубокого обучения включают применение таких моделей, как сверточные нейросети CNN [18, 19], LSTM [9, 20, 21], рекуррентные сети RNN [22], глубокие сети доверия [23] и других. Разработаны методы выявления стадий деградации оборудования при прогнозировании RUL [10, 14, 24].

Большинство методов прогнозирования RUL для объектов промышленного оборудования используют в качестве входных данных исторические значения параметров, агрегированных по рабочим циклам [9, 15, 24, 25]. Рабочим циклом считается период от запуска оборудования до его отключения. В данном агрегированном представлении данные об одном рабочем цикле представлены в виде вектора значений длиной n , где n – количество измеряемых параметров оборудования, где каждому параметру соответствует одно значение [25].

В случае, когда для построения прогноза используются данные, которые не были агрегированы, точность методов прогнозирования в отдельных применениях снижается, и они не могут быть использованы для построения прогноза [26]. Не агрегированные данные о рабочем цикле представляют собой многомерный временной ряд с количеством измерений n , длина которого изменяется в зависимости от длительности конкретного цикла.

Для решения проблемы неоднородности длительностей рабочих циклов и точности прогнозирования предлагается новый метод, включающий выделение рабочих циклов в исторических данных, их преобразование в набор агрегированных значений, где каждому из циклов соответствует одномерный вектор значений. Исследование проведено на примере данных газотурбинных двигателей.

Описание метода. Для прогнозирования остаточного ресурса оборудования (RUL) предлагается новый метод, который использует агрегирование данных рабочих циклов и применение существующей модели прогнозирования.

Данное решение позволяет использовать данные, не прошедшие предварительную обработку и содержащие информацию о рабочих циклах переменной длительности. Помимо этого, применение описываемого метода позволит увеличить горизонт прогнозирования и объем доступных данных, которые могут быть использованы для обучения модели в сравнении с использованием только существующих методов. Также, метод позволяет применить существующие модели прогнозирования с высокой точностью на данных, на которых ранее не удавалось построить точный прогноз RUL [26].

Входные данные – временные ряды, непрерывные исторические записи с n датчиков промышленного оборудования за период с высокой частотой (1 запись в секунду и более).

Выходные данные – построенный прогноз RUL.

Предлагаемый метод состоит из шести шагов. Схема метода приведена на рис. 3.

Первый шаг метода – предварительное агрегирование высокочастотных данных до 1 измерения в минуту. Применяемая функция агрегирования – среднее значение. Основная цель – повышение производительности следующих шагов. Также этот шаг способствует отсеиванию аномалий из данных.

На втором шаге производится выделение рабочих циклов из непрерывного потока данных. Для этого применяется алгоритм, схема которого приведена на рис. 4. Выполняется разметка стадий рабочего цикла. Сначала для каждого параметра входных данных X_i^j , где j – номер параметра, i – номер записи во временном ряду, вычисляется его разность с предыдущим

$$\Delta = X_i^j - X_{i-1}^j$$

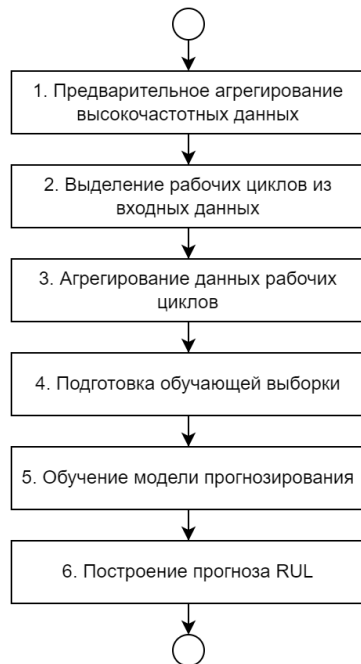


Рис. 3. Схема предлагаемого метода



Рис. 4. Схема алгоритма выделения рабочих циклов

Промежуток, в котором значения постоянно увеличиваются, помечается как начало рабочего цикла – прогрев. Промежуток, в котором значения параметров оборудования постоянно снижаются, считается окончанием рабочего цикла – остыванием. Идущие подряд промежутки прогрева и остываний объединяются в один для обработки возможных прерываний в прогреве/остывании. Короткие отдельно стоящие промежутки отбрасываются, как аномалии. Пороговое значение применяется для обработки флуктуации параметров из-за влияния внешней среды и устанавливается для каждого набора данных индивидуально. Пример визуализации размеченных стадий на данных приведен на рис. 5. Промежуток между началом и окончанием – работа оборудования под нагрузкой – основная часть рабочего цикла. Все остальные данные – простой оборудования.

Далее выделяются данные рабочих циклов, которые будут использоваться в дальнейших шагах. Для этого из размеченных стадий выделяются и сохраняются данные периодов работы под нагрузкой. Все остальные данные отбрасываются.

На третьем шаге производится агрегирование данных для каждого цикла. Для каждого параметра в цикле вычисляется три значения: среднее, усредненное максимальное и усредненное минимальное.

Усредненное максимальное значение вычисляется как среднее верхнего дециля значений. Усредненное минимальное значение вычисляется таким же образом для нижнего дециля значений параметра рабочего цикла.

В результате для каждого цикла строится описывающий его вектор значений длиной $3n$ по количеству измеряемых параметров входных данных n и усредненных минимальных и максимальных значений для каждого из них. Это устраняет неоднородность в размерности данных рабочих циклов и позволяет в дальнейшем применять существующие модели прогнозирования.

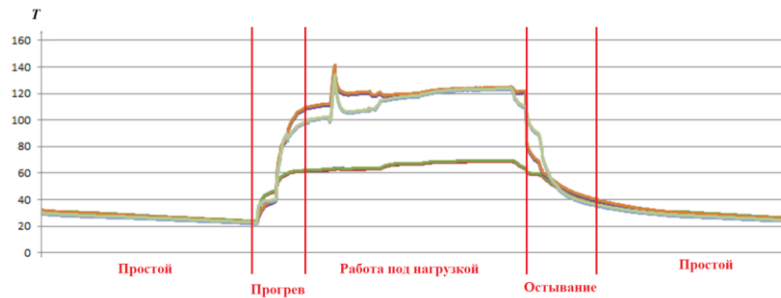


Рис. 5. Пример стадий рабочих циклов

На четвертом шаге осуществляется подготовка данных для использования в обучении модели прогнозирования. Соответствие данных показывается формулой 2:

$$F(X_i) = Y_i, \quad (2)$$

где X_i – входное значение, Y_i – выходное значение, F – функция модели прогнозирования.

Выходные данные X_i для точки i формируются как значения RUL для i -того цикла.

Входные данные X_i для точки i группируются с использованием метода скользящего окна. В этой функции берется w входных значений X_k^j , $j \in [1; n]$, $k \in [i - w; i]$, которые группируются в матрицу и затем разворачиваются в одномерный массив путем соединения всех строк матрицы, как проиллюстрировано в формуле 3:

$$X_i = \begin{bmatrix} X_{w-i}^1 & \dots & X_i^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{w-i}^n & \dots & X_i^n \end{bmatrix} = |X_{w-i}^1; \dots; X_i^1; \dots; X_{w-i}^n; \dots; X_i^n|. \quad (3)$$

При этом, для моделей прогнозирования, поддерживающих двумерные входные данные, таких, как сверточная нейронная сеть, разворачивание в одномерный массив может быть пропущено.

На пятом шаге производится обучение модели прогнозирования. Для устранения возможных неточностей применяется метод кросс-валидации.

На шестом шаге производится построение прогноза остаточного ресурса оборудования с использованием существующих моделей.

Результаты. Для проверки метода использовались данные с газотурбинного двигателя за два года использования. Пример данных приведен на рис. 6.

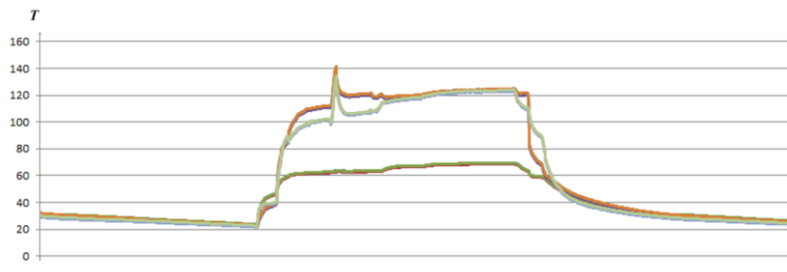


Рис. 6. Пример рабочего цикла в исходных данных

Из данных были выделено 116 рабочих циклов. После преобразования данных о циклах в обучающую выборку было получено 110 записей с $w = 7$. Пример преобразованных данных приведен на рис. 7.

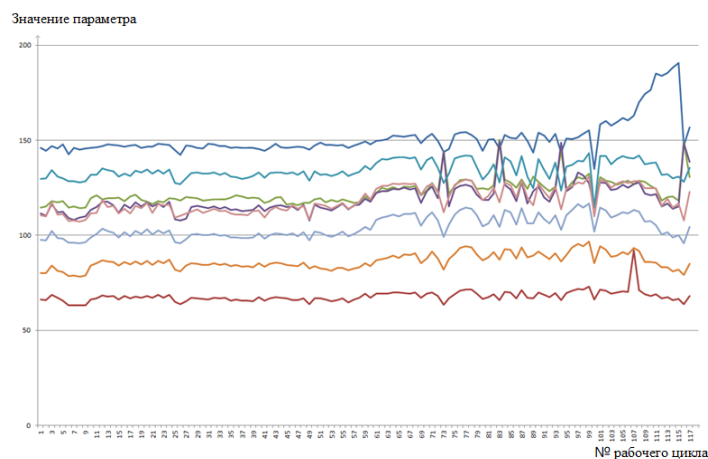


Рис. 7. Пример агрегированных данных

Для проверки метода были выбраны следующие модели: линейная регрессия, Catboost, XGBoost. Модели, основанные на нейронных сетях, не применялись из-за недостаточного объема данных.

Результаты проверки моделей приведены в табл. 1. Сравнение производилось с использованием метрик RMSE и MAE [27].

Таблица 1

Результаты прогнозирования RUL для моделей

Модель прогнозирования	RMSE	MAE
Линейная регрессия	38.11	21.01
Catboost	16.81	11.14
XGBoost	14.02	10.71

Графики с прогнозными значениями приведены на рис. 8 для линейной регрессии и на рис. 9 для XGBoost.

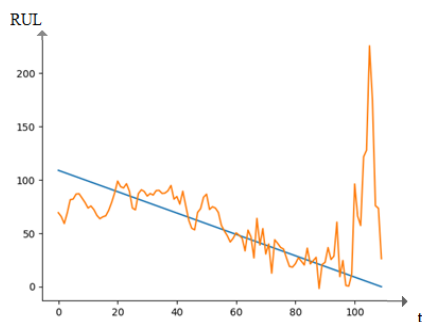


Рис. 8. Результат построения прогноза с применением линейной регрессии

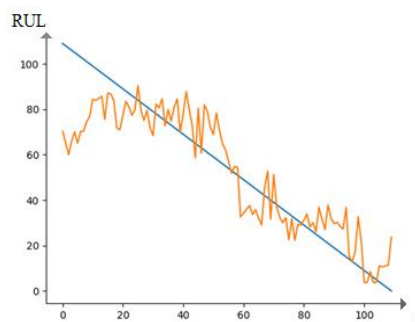


Рис. 9. Результат построения прогноза с применением XGBoost

На этих графиках синим цветом отмечены реальные значения, оранжевым – полученные в результате прогнозирования. Скачок полученных с использованием линейной регрессии прогнозных значений в конце интервала можно объяснить изменением во входных данных, не распознанном моделью прогнозирования.

Заключение. В данной работе предложен и рассмотрен новый метод прогнозирования остаточного ресурса оборудования. Данный метод предложен для ситуаций с не агрегированными историческими данными, содержащими рабочие циклы переменной длительности, для обучения модели, в которых нет возможности построить точный прогноз RUL существующими способами. Для решения этой проблемы предложен метод выделения рабочих циклов из данных и их агрегирования с последующим прогнозированием. Предложенный метод в отдельных сценариях повышает точность прогнозирования остаточного ресурса оборудования и позволяет построить прогноз для данных, на которых ранее не удавалось получить точные значения RUL с использованием существующих методов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Куприяновский В.П., Намиот Д.Е., Дрозжжинов В.И., Куприяновская Ю.В., Иванов М.О. Интернет вещей на промышленных предприятиях // *International Journal of Open Information Technologies*. – 2016. – № 12. – С. 156-161.
2. Гунина И.А., Шкарупета Е.В., Решетов В.В. Прорывное технологическое развитие промышленных комплексов в условиях цифровой трансформации // *Инновационные кластеры цифровой экономики: теория и практика*. – 2018. – С. 535-554.
3. Лысенко С.В., Тен Э.В. Об оценке остаточного ресурса башенных кранов // *Проблемы современной науки и образования*. – 2016. – № 1. – С. 98-102.
4. Manasis C., Assimakis N., Vikias V., Ktena A., Stamatelos T. Power Generation Prediction of an Open Cycle Gas Turbine Using Kalman Filter // *Energies*. – 2020. – No. 13. – P. 6692.
5. Антоненко И.Н., Крюков И.Э. Информационные системы и практики ТОиР: этапы развития // *Автоматизация*. – 2011. – № 1. – С. 37-44.
6. Chen X., Yan R., Liu Y. Wind turbine condition monitoring and fault diagnosis in China // *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*. – 2016. – No. 19. – P. 22-28.
7. Susto G.A., Schirru A., Pampuri S., McLoone S., Beghi A. Machine learning for predictive maintenance: A multiple classifier approach // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. – 2014. – No. 11. – P. 812-820.
8. Ажмухамедов И.М., Гостюнин Ю.А. Выбор стратегии технического обслуживания и ремонта оборудования сетей связи на предприятиях нефтегазового комплекса // *Инженерный вестник Дона*. – 2017. – № 2 (45). – С. 1-10.
9. Сай Ван Квонг, Щербаков М.В. Метод прогнозирования остаточного ресурса на основе обработки данных многообъектных сложных систем // *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии*. – 2019. – № 1 (45). – С. 33-44.
10. Zadiran K., Shcherbakov M. New Method of Degradation Process Identification for Reliability-Centered Maintenance of Energy Equipment // *Energies*. – 2023. – No. 16. – P. 575.
11. Cheng J.C., Chen W., Chen K., Wang Q. Data-driven predictive maintenance planning framework for MEP components based on BIM and IoT using machine learning algorithms // *Automation in Construction*. – 2020. – No. 112. – P. 1-21.
12. Xiongzi C., Jinsong Y., Diyin T. Yingxun W. Remaining useful life prognostic estimation for aircraft subsystems or components: A review // *10th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI)*. – 2011. – P. 92-94.
13. Zhao J., Gao C., Tang T., Xiao X., Luo M., Yuan B. Overview of Equipment Health State Estimation and Remaining Life Prediction Methods // *Machines*. – 2022. – No. 10. – P. 422.
14. Yan M., Wang X., Wang B., Chang M., Muhammad I. Bearing remaining useful life prediction using support vector machine and hybrid degradation tracking model // *ISA transactions*. – 2020. – No. 98. – P. 471-482.
15. Nieto P.G., Garcia-Gonzalo E., Lasheras F.S., De Cos Juez F.J. Hybrid PSO-SVM-based method for forecasting of the remaining useful life for aircraft engines and evaluation of its reliability // *Reliability Engineering & System Safety*. – 2015. – No. 138. – P. 219-231.

16. Patil S., Patil A., Handikherkar V., Desai S., Phalle V.M., Kazi F.S. Remaining Useful Life (RUL) Prediction of Rolling Element Bearing Using Random Forest and Gradient Boosting Technique // ASME 2018 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. – 2018. – P. 1-7.
17. Ng S.S., Xing Y., Tsui K.L. A naive Bayes model for robust remaining useful life prediction of lithium-ion battery // Applied Energy. – 2014. – No. 118. – P. 114-123.
18. Babu G.S., Zhao P., Li X.L. Deep convolutional neural network based regression approach for estimation of remaining useful life // In Proceedings of the International Conference on Database Systems for Advanced Applications (Dallas, TX, USA, 16–19 April 2016). – 2016. – P. 214-228.
19. Li X., Ding Q., Sun J. Remaining useful life estimation in prognostics using deep convolution neural networks // Reliability Engineering & System Safety. – 2018. – No. 172. – P. 1-11.
20. Che-Sheng H., Jehn-Ruey J. Remaining useful life estimation using long short-term memory deep // In 2018 IEEE International Conference on Applied System Invention (ICASI) (Chiba, Japan). – IEEE, 2018. – P. 58-61.
21. Sagheer A., Kotb M. Unsupervised pre-training of a Deep LSTM-based Stacked Autoencoder for Multivariate time Series forecasting problems // Scientific Reports. – 2019. – No. 9. – P. 1-16.
22. Zhang Y., Xin Y., Liu Z.W., Chi M., Ma G. Health status assessment and remaining useful life prediction of aero-engine based on BiGRU and MMoE // Reliability Engineering & System Safety. – 2022. – No. 220. – P. 108-123.
23. Deutsch J., He D. Using deep learning-based approach to predict remaining useful life of rotating components // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. – 2017. – No. 48. – P. 11-20.
24. Wang H.K., Cheng Y., Song K. Remaining Useful Life Estimation of Aircraft Engines Using a Joint Deep Learning Model Based on TCNN and Transformer // Computational Intelligence and Neuroscience. – 2021. – No. 2021. – P. 1-14.
25. NASA Turbofan Jet Engine Data Set. – Режим доступа: <https://www.kaggle.com/datasets/behrad3d/nasa-cmaps> (дата обращения: 01.04.2023).
26. Задиран К.С., Щербаков М.В., Сай Ван Квонг. Прогнозирование остаточного ресурса оборудования в условиях малой выборки данных // Управление большими системами. – 2023. – № 102. – С. 99-113.
27. Shcherbakov M.V. A Survey of Forecast Error Measures // World Applied Sciences Journal (WASJ). – 2013. – No. 24. – P. 171-176.

REFERENCES

1. Kupriyanovskiy V.P., Namiot D.E., Drozhzhinov V.I., Kupriyanovskaya Yu.V., Ivanov M.O. Internet veshchey na promyshlennykh predpriyatiyakh [Internet of things in industrial enterprises], *International Journal of Open Information Technologies*, 2016, No. 12, pp. 156-161.
2. Gunina I.A., SHkarupeta E.V., Reshetov V.V. Proryvnoye tekhnologicheskoe razvitiye promyshlennykh kompleksov v usloviyakh tsifrovoy transformatsii [Breakthrough technological development of industrial complexes in the context of digital transformation], *Innovatsionnye klasteri tsifrovoy ekonomiki: teoriya i praktika* [Innovative clusters of the digital economy: theory and practice], 2018, pp. 535-554.
3. Lysenko S.V., Ten E.V. Ob otsenke ostatochnogo resursa bashennykh kranov [On assessing the residual life of tower cranes], *Problemy sovremennoy nauki i obrazovaniya* [Problems of modern science and education], 2016, No. 1, pp. 98-102.
4. Manasis C., Assimakis N., Vikias V., Ktena A., Stamatelos T. Power Generation Prediction of an Open Cycle Gas Turbine Using Kalman Filter, *Energies*, 2020, No. 13, pp. 6692.
5. Antonenko I.N., Kryukov I.E. Informatsionnye sistemy i praktiki TOiR: etapy razvitiya [Information systems and maintenance and repair practices: stages of development], *Avtomatizatsiya* [Automation], 2011, No. 1, pp. 37-44.
6. Chen X., Yan R., Liu Y. Wind turbine condition monitoring and fault diagnosis in China, *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 2016, No. 19, pp. 22-28.
7. Susto G.A., Schirru A., Pampuri S., McLoone S., Beghi A. Machine learning for predictive maintenance: A multiple classifier approach, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2014, No. 11, pp. 812-820.
8. Azhmukhamedov I.M., Gostyunin Yu.A. Vybor strategii tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta oborudovaniya setey svyazi na predpriyatiyakh neftegazovogo kompleksa [Choice of strategy for maintenance and repair of communication network equipment at oil and gas enterprises], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2017, No. 2 (45), pp. 1-10.

9. Say Van Kvong, Shcherbakov M.V. Metod prognozirovaniya ostatochnogo resursa na osnove obrabotki dannykh mnogoob"ektnykh slozhnykh sistem [A method for forecasting residual life based on data processing of multi-object complex systems], *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: management and high technologies], 2019, No. 1 (45), pp. 33-44.
10. Zadiran K., Shcherbakov M. New Method of Degradation Process Identification for Reliability-Centered Maintenance of Energy Equipment, *Energies*, 2023, No. 16, pp. 575.
11. Cheng J.C., Chen W., Chen K., Wang Q. Data-driven predictive maintenance planning framework for MEP components based on BIM and IoT using machine learning algorithms, *Automation in Construction*, 2020, No. 112, pp. 1-21.
12. Xiongzi C., Jinsong Y., Diyin T. Yingxun W. Remaining useful life prognostic estimation for aircraft subsystems or components: A review, *10th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI)*, 2011, pp. 92-94.
13. Zhao J., Gao C., Tang T., Xiao X., Luo M., Yuan B. Overview of Equipment Health State Estimation and Remaining Life Prediction Methods, *Machines*, 2022, No. 10, pp. 422.
14. Yan M., Wang X., Wang B., Chang M., Muhammad I. Bearing remaining useful life prediction using support vector machine and hybrid degradation tracking model, *ISA transactions*, 2020, No. 98, pp. 471-482.
15. Nieto P.G., Garcia-Gonzalo E., Lasheras F.S., De Cos Juez F.J. Hybrid PSO-SVM-based method for forecasting of the remaining useful life for aircraft engines and evaluation of its reliability, *Reliability Engineering & System Safety*, 2015, No. 138, pp. 219-231.
16. Patil S., Patil A., Handikherkar V., Desai S., Phalle V.M., Kazi F.S. Remaining Useful Life (RUL) Prediction of Rolling Element Bearing Using Random Forest and Gradient Boosting Technique, *ASME 2018 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2018, pp. 1-7.
17. Ng S.S., Xing Y., Tsui K.L. A naive Bayes model for robust remaining useful life prediction of lithium-ion battery, *Applied Energy*, 2014, No. 118, pp. 114-123.
18. Babu G.S., Zhao P., Li X.L. Deep convolutional neural network based regression approach for estimation of remaining useful life, *In Proceedings of the International Conference on Database Systems for Advanced Applications (Dallas, TX, USA, 16-19 April 2016)*, 2016, pp. 214-228.
19. Li X., Ding Q., Sun J. Remaining useful life estimation in prognostics using deep convolution neural networks, *Reliability Engineering & System Safety*, 2018, No. 172, pp. 1-11.
20. Che-Sheng H., Jehn-Ruey J. Remaining useful life estimation using long short-term memory deep, *In 2018 IEEE International Conference on Applied System Invention (ICASI) (Chiba, Japan)*. IEEE, 2018, pp. 58-61.
21. Sagheer A., Kotb M. Unsupervised pre-training of a Deep LSTM-based Stacked Autoencoder for Multivariate time Series forecasting problems, *Scientific Reports*, 2019, No. 9, pp. 1-16.
22. Zhang Y., Xin Y., Liu Z.W., Chi M., Ma G. Health status assessment and remaining useful life prediction of aero-engine based on BiGRU and MMoE, *Reliability Engineering & System Safety*, 2022, No. 220, pp. 108-123.
23. Deutsch J., He D. Using deep learning-based approach to predict remaining useful life of rotating components, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2017, No. 48, pp. 11-20.
24. Wang H.K., Cheng Y., Song K. Remaining Useful Life Estimation of Aircraft Engines Using a Joint Deep Learning Model Based on TCNN and Transformer, *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2021, No. 2021, pp. 1-14.
25. NASA Turbofan Jet Engine Data Set. Available at: <https://www.kaggle.com/datasets/behrad3d/nasa-cmaps> (accessed 01 April 2023).
26. Zadiran K.S., Shcherbakov M.V., Say Van Kvong. Prognozirovanie ostatochnogo resursa oborudovaniya v usloviyakh maloy vyborki dannykh [Forecasting the residual life of equipment in conditions of a small data sample], *Upravlenie bol'shimi sistemami* [Management of large systems], 2023, No. 102, pp. 99-113.
27. Shcherbakov M.V. A Survey of Forecast Error Measures, *World Applied Sciences Journal (WASJ)*, 2013, No. 24, pp. 171-176.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Ю.А. Кравченко.

Задирин Константин Сергеевич – Волгоградский государственный технический университет; e-mail: konstantin.zadiran@gmail.com; г. Волгоград, Россия; аспирант.

Zadiran Konstantin Sergeevich – Volgograd State Technical University; e-mail: konstantin.zadiran@gmail.com; Volgograd, Russia; postgraduate student.

Е.А. Титенко, И.Е. Чернецкая, Л.А. Лисицын, М.А. Титенко, С.И. Егоров**АППАРАТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ МЕТОД РЕКОНФИГУРАЦИИ
ГРУППИРОВКИ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ**

Рассматриваются подходы и методы управления группировкой подвижных объектов, отличающихся возможностью автономного принятия решений о своем статусе в составе группировки. Другая проблема управления такой группировкой – слабые прогнозные решения связности пар элементов, их зависимость от единого центра управления. В качестве таких объектов рассматриваются наноспутники, функционирующие в условиях неопределённости внутренней и внешней среды. Цель – обеспечение связности аппаратов группировки за счет децентрализованного изменения структуры. Показано, что методы и алгоритмы динамической реконфигурации группировки подвижных объектов преимущественно используют централизованный подход и единый наземный центр управления, что для малой космонавтики нецелесообразно. Рассматривается класс методов управления с использованием методов и технологии обработки знаний (технологии искусственного интеллекта), позволяющих выделить и использовать дополнительную информацию о конфигурации группировки. Под конфигурацией понимается система-двойка, описывающая состав и связи между соседними элементами с некоторой количественной оценкой. В статье рассматривается конфигурация связности элементов для обеспечения непрерывной передачи данных между парой произвольных элементов группировки. Предлагаемый метод реконфигурации является иерархическим: на верхнем уровне реконфигурация основана на принципах самоорганизации, на нижнем уровне группировка понимается как адаптивная система, изменяющая свое состояние на основе обученной нейронной сети по историческим данным – временным рядам параметров аппаратов и их местоположения. Метод представляет собой двухуровневый цикл опроса каждым элементом группировки своих соседей и составлении карты сети. Эта карта сети отражает имеющиеся связи с учетом текущих параметров каждого аппарата. Второй (вложенный) цикл опроса использует управляющую информацию о будущем состоянии аппарата и связности группировки, в целом. Внесение изменений в экземпляры карты сети каждым аппаратом и обновление экземпляров карты сети позволяет по завершении циклов опроса получить конфигурацию работоспособных аппаратов. Результаты сравнительного анализа показали, что методы управления на принципах самоорганизации и адаптивного изменения структуры являются наиболее подходящими для динамической реконфигурации группировки за счет поддержки шагов прогнозирования.

Матрица связности; рассылка; граф; метрика; поиск значений; карта сети.

E.A. Titenko, I.E. Chernetskaya, L.A. Lisitsyn, M.A. Titenko, S.I. Egorov**HARDWARE-ORIENTED METHOD FOR RECONFIGURING A GROUP
OF MOBILE OBJECTS**

The article describes approaches and methods for managing a group of moving objects, characterized by the ability to autonomously make decisions about their status within the group. Another problem of managing such a grouping is weak predictive solutions for the connectivity of pairs of elements and their dependence on a single control center. Nanosatellites operating under conditions of uncertainty in the internal and external environment are considered as such objects. The goal is to ensure the coherence of the group's apparatus through a decentralized change in structure. It is shown that methods and algorithms for dynamic reconfiguration of a group of moving objects predominantly use a centralized approach and a single ground control center, which is impractical for small space exploration. A class of management methods using knowledge processing methods and technology (artificial intelligence technology) is considered, allowing for the identification and use of additional information about the configuration of the group. Configuration is understood as a dual system that describes the composition and connections between

neighboring elements with some quantitative assessment. The article checks the connectivity configuration of elements to ensure continuous data transfer between a pair of arbitrary grouping elements. The proposed reconfiguration method is hierarchical: at the upper level, reconfiguration is based on the principles of self-organization; at the lower level, the grouping is understood as an adaptive system that changes its state based on a trained neural network based on historical data - time series of parameters of devices and their locations. The method is a two-level cycle of polling each element for grouping its neighbors and drawing up a network map. This network map shows the available connections, taking into account the current stream numbers of each device. The second (nested) polling cycle uses control information about the future state of the device and the connectivity of the group as a whole. Making changes to the network map instances by each device and updating the network map instances allows, upon completion of the polling cycles, to obtain the configuration of working devices. The results of the comparative analysis showed that management methods based on the principles of self-organization and adaptive change in structure are the most suitable for dynamic reconfiguration of the group. This result is possible due to the support of forecasting steps.

Connectivity matrix; distribution; graph; metric; search for values; network map.

Введение. Новым перспективным направлением развития территориально распределенных измерительно-вычислительных систем являются группировки подвижных взаимодействующих объектов (робототехнические комплексы, летательные аппараты, наноспутники и др.). Стратегический интерес к данным подвижным аппаратам обусловлен применением в них аппаратно-программных средств, позволяющих перейти к коллективному решению поставленной задачи и использованию распределенного измерительного и вычислительного ресурсов группировки для прикладных вычислительных процессов [1, 2]. Данная новая функциональность позволяет решать в кооперации не только исследовательские, но и значимые народно-хозяйственные задачи. Группировки МКА, рои БПЛА способны более эффективно по критерию «производительность/затраты» решать исследовательские и производственные задачи за счет поддержания соединений между аппаратами и, как следствие, вести вычисления в параллельно-конвейерном режиме, оперативно получать или актуализировать информацию об объектах мониторинга, проводить множественные измерения, фото-, видеосъемку, и др. Тем не менее существующие группировки МКА, рои БПЛА реализуют ограниченный набор программных функций в части организации межсетевой кооперации аппаратов [3–4]. Как правило такая кооперация имеет централизованный принцип управления, она конкретизируется указанием общих стартовых координат, времени формирования кластера аппаратов, статическим составом аппаратов, обособленным выполнением ранее назначенных задач (измерения и др.). При этом трансляция данных внутри сети реализуется опосредствованно – через наземные пункты.

Проблемная ситуация состоит в том, что группировки подвижных объектов преимущественно функционируют в условиях неопределённости состояния внешней среды, состояния самих аппаратов, что негативно сказывается на поддержании стабильной работы группировки как единого целого [5–7]. Введение новых аппаратов, выход из строя действующих аппаратов являются типовыми случаями изменения состава и связности аппаратов в группировке. Соответственно вычислительные процессы динамической реконфигурации группировки (сети) аппаратов являются адекватной реакцией на неопределенность внешней и внутренней среды. Среди различных подходов представляется наиболее значимым развитие методов децентрализованной реконфигурации, а также использование технологии искусственного интеллекта (ИИ) [8–13]. Их отличительная особенность – автономное принятие управляющих решений о состоянии группировки самими аппаратами на основе расчетных и прогнозных данных.

Таким образом, вопросы организации и динамической реконфигурации группировки (сети) с изменяемым количеством подвижных объектов в процессе функционирования являются актуальными.

Постановка задачи. Современные наноспутники (малые космические аппараты Cube Sat 3U – МКА) представляют собой высокотехнологичные изделия - автоматизированные подвижные информационно-измерительные станции, имеющие в своем составе служебные подсистемы энергоснабжения, связи, управления, стабилизации/ориентации [14–16]. Они способны обеспечивать эффективное решение значимых производственных задач, связанных с обеспечением/предоставлением услуг космической связи - «космическая шина данных» (услуги спутниковой телефонной связи, широкополостного доступа в интернет, получения данных от датчиков и систем интернета вещей, дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), фото- видеосъемки территорий и объектов целевого назначения, контроля воздушной обстановки, и др. Все эти задачи наиболее эффективно решать не одиночными аппаратами, а группировками аппаратов, способными за счет пространственного распределения аппаратов вести множественные процессы съемки/измерения/передачи.

Особенности работы МКА в космическом пространстве заключаются в ограниченности ресурса силовой установки, воздействия радиации, наличия природных и техногенных помех, слабого резервирования критических модулей и узлов, невозможности ремонтно-регламентных работ подсистем МКА. Будучи выведенными на орбиту, МКА функционируют в рамках отведенного временного срока и работоспособности основных подсистем. Вместе с тем, в группировке присутствует некоторая обобщенная информация о состоянии и расположении МКА, она необходима для оценки времени их устойчивого функционирования в качестве узлов сети и для прогнозирования качества связи между парами МКА в пределах прямой видимости.

Информационно каждый МКА в составе группировки описывается через [16]:

- ◆ орбитальные параметры (координаты);
- ◆ вектор состояния подсистем;
- ◆ матрица прямой видимости – квадратная симметричная относительно главной диагонали матрица, каждый элемент которой сигнализирует о наличии прямой видимости между соответствующей парой МКА;
- ◆ матрица фактического качества связи, конфигурация которой аналогична матрице прямой видимости, а каждый элемент описывает эффективность (длительность) передачи сообщений между парами аппаратов.

Теоретико-множественная модель МКА, объединяющая набор параметров, имеет следующий вид

$$MKA_i(t) = \left\langle ID_i, TLE(t)_i, \left\{ \left\langle ID_j, TLE(t)_j \right\rangle \right\}_{i \neq j}, V_i(t), \langle ID_Ch \rangle, P, UTC \right\rangle, (1)$$

где ID_i – уникальный идентификатор i -го МКА;

$TLE_i(t)$ – кеплеровские координаты в момент времени t ;

$\left\{ \left\langle ID_j, TLE_j \right\rangle \right\}$ – множество пар идентификаторов и параметров орбиты j -ых МКА, связанных с i -ым МКА;

$V_i(t) = \{v_{im}(t)\}_{m=1}^{N_V}, v_{im}(t) \in \mathbb{R}$ – вектор состояния, описывающий техническое

подсистем МКА в момент времени t ;

P – битовый флаг режима передачи;

$\langle ID_Ch \rangle$ – множество каналов связи;

UTC – единое время для всех элементов сети МКА и абонентов.

Множество пар идентификаторов и параметров орбиты задают пространственное положение и информационную связь аппаратов в группировке, образуя связанную систему, в которой ее каждый элемент служит источником, приемником и ретранслятором в маршрутах передачи данных.

Соответственно двоичная функция $aktiv(MKA_i(t))$ определяет работоспособность i -го аппарата в составе группировки и его способность поддерживать связность аппаратов для построения маршрутов:

$$aktiv_i(MKA_i, \langle MKA_j \rangle_{j \neq i}, V_i(t)) = \begin{cases} 1, \text{если } i\text{-ый МКА исправен} \\ 0, \text{если } i\text{-ый МКА не исправен} \end{cases} \quad (2)$$

Тогда под связностью S группировки будет пониматься актуальное число работоспособных МКА, имеющих соединения с подмножеством аппаратов их группировки

$$S(MKA_1, MKA_2, \dots, MKA_M) \rightarrow \max, \quad (3)$$

где M – размер группировки.

Метод решения. Для формализации вычислений по реконфигурации сети будет использован матричный подход, позволяющий описать объект управления (группировку МКА) как систему взаимосвязанных элементов.

Необходимость реконфигурации группировки МКА определяется следующими моментами [3]. Во-первых, текущее положение в пространстве набора МКА оценивается собственными зонами видимости аппаратов. Каждый аппарат по отношению к остальным имеет индивидуальные зоны видимости d_{ij} , но в группировке возможны ситуации недоступности цепочек аппаратов между собой, что не позволяет поддерживать связность группировки. Во-вторых, группировка МКА рассматривается как система однородных объектов, имеющих совпадающий состав бортовых подсистем (элементов) без возможности резервирования узлов, блоков, модулей. Как следствие, связность группировки может быть не поддержана по причине неработоспособности МКА, даже при условии его видимости другими аппаратами.

В обоих случаях в группировке МКА необходимо выполнить структурную реконфигурацию, т.е. динамически обновить число аппаратов и связей между ними.

Группировка МКА задается квадратной матрицей, аналогичной классической матрице смежности [17]. Эта матрица далее получила название карте сети. Каждая строка матрицы смежности по отдельности описывает текущие связи i -го МКА с остальными аппаратами ($i=1 \dots M$). Соответственно графовое представление группировки и обработка матрицы смежности позволяют оценивать состояние сети и управлять ее структурой.

Карта сети представляет из себя квадратную матрицу $A = (a_{ij})$ размерности

$M \times M$, элементы которой a_{ij} определяются как

$$a_{ij} = \begin{cases} C_{a_{ij}} > 0, \text{если между } i \text{ и } j \text{ МКА имеется связь;} \\ NULL, \text{если между } i \text{ и } j \text{ МКА не установлено связи;} \\ 0, \text{если } i = j \end{cases} \quad (2)$$

где $C_{a_{ij}}$ – количественная оценка наличия или качества связи между (ij) парой аппаратов, например, время передачи.

Столбцы матрицы сети соответствуют МКА-источника данных, а строки МКА-приемникам данных. Главная диагональ матрицы состоит из элементов со значением 0. В идеальном случае матрица сети будет симметричной относительно главной диагонали, поскольку метрика передачи данных в канале от i МКА к j МКА будет равна метрике передачи данных от j МКА к i МКА. Однако, в реальных условиях, из-за наличия случайных, неконтролируемых возмущений и помех, особенностей оборудования МКА и особенностей внешней среды, количественные значения метрик передачи данных в канале от i МКА к j МКА могут быть не равны метрикам передачи данных от j МКА к i МКА. Однако в силу наличия естественных помех карта сети не является симметричной относительно главной диагонали.

В начальный момент инициализации сети МКА размер квадратной матрицы сети соответствует количеству МКА, выведенных на орбиту и участвующих в базовом процессе инициализации сети. Главная особенность децентрализованного управления группировкой – наличие и обновление множества экземпляров карты сети по мере образования или актуализации группировки на основе широкополосной рассылки служебных сообщений каждым МКА.

Пусть существует группировка из 5 МКА (рис. 1).

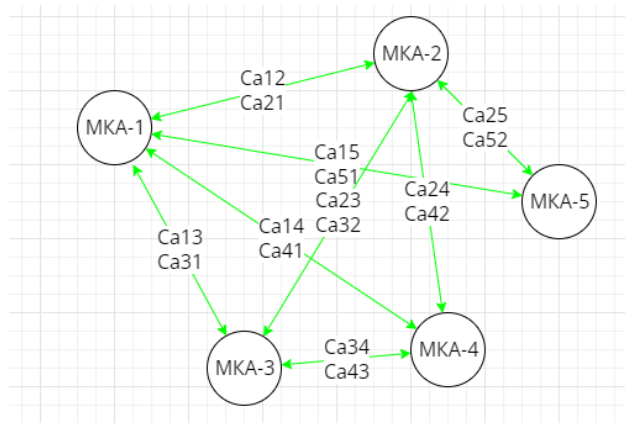


Рис. 1. Группировка взаимодействующих МКА

В начальный момент карта сети пустая, она имеет вид (табл. 1). Значения *NILL* в дальнейшем будут заменены на метрику при взаимодействии i -го и j -го аппаратов.

Таблица 1

Начальная карта сети

		Передатчик				
		МКА-1	МКА-2	МКА-3	МКА-4	МКА-5
Приемник	МКА-1	0	<i>NILL</i>	<i>NILL</i>	<i>NILL</i>	<i>NILL</i>
	МКА-2	<i>NILL</i>	0	<i>NILL</i>	<i>NILL</i>	<i>NILL</i>
	МКА-3	<i>NILL</i>	<i>NILL</i>	0	<i>NILL</i>	<i>NILL</i>
	МКА-4	<i>NILL</i>	<i>NILL</i>	<i>NILL</i>	0	<i>NILL</i>
	МКА-5	<i>NILL</i>	<i>NILL</i>	<i>NILL</i>	<i>NILL</i>	0

Текущий цикл заполнения карты сети состоит в следующем. Текущий МКА делает широкополосную рассылку, рассчитывает прямые метрики, а также последовательно получает метрики обратной передачи от всех МКА для текущего МКА. Прямые и обратные значения метрик позволяют заполнить i -ю строку и j -й столбец карты сети.

Для МКА-1 заполненная карта сети имеет вид, представленный в табл. 2, а соответствующий ей подграф представлен на рис. 2.

Таблица 2

Карта сети, заполненная для МКА-1

		Передатчик				
		МКА-1	МКА-2	МКА-3	МКА-4	МКА-5
Приемник	МКА-1	0	CA21=0,011	CA31=0,015	CA41=0,013	CA51=0,021
	МКА-2	CA12=0,01	0			
	МКА-3	CA13=0,015		0		
	МКА-4	CA14=0,014			0	
	МКА-5	CA15=0,02				0

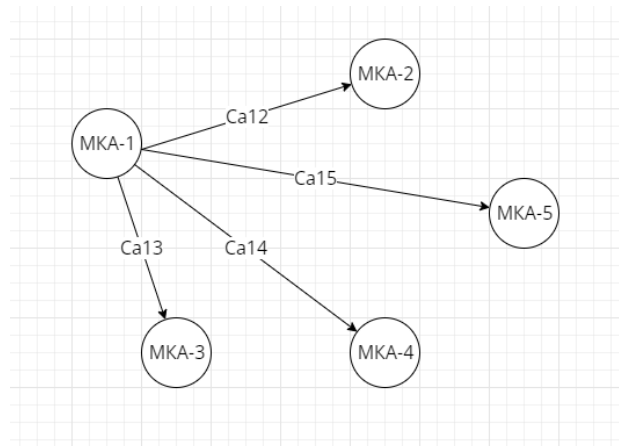


Рис. 2. Подграф для соединений МКА-1

По окончании текущего цикла широковещательной рассылки локальная карта сети тиражируется в память остальным МКА.

Циклы широковещательной рассылки, выполненные для всех МКА, позволяют вычислить для исходного графа (рис. 1) итоговую карту сети (табл. 3). При объединении предыдущей и текущей карт сети выполняется операция поэлементного арифметического сложения, при этом значение *NIL* трактуется как арифметический ноль.

Таблица 3

Итоговая карта сети

		Передатчик				
		МКА-1	МКА-2	МКА-3	МКА-4	МКА-5
Приемник	МКА-1	0	CA21=0,011	CA31=0,015	CA41=0,013	CA51=0,021
	МКА-2	CA12=0,01	0	CA32=0,025	CA42=0,011	CA52=0,021
	МКА-3	CA13=0,015	CA23=0,025	0	CA43=0,015	NIL
	МКА-4	CA14=0,014	CA24=0,010	CA34=0,015	0	NIL
	МКА-5	CA15=0,02	CA25=0,022	NIL	NIL	0

Ограниченность вычислительного ресурса (программируемый контроллер класса TMS32 или аналоги) для операций образования, реконфигурации карты сети обусловила переход к двоичной карте сети (*Bit_A*), в которой значение в каждой ячейке описывает факт наличия/отсутствия связи в (*i,j*) паре МКА. Соответственно для объединения двоичных матриц сети будет использована логическая операция *or*.

Шаги реконфигурации группировки МКА основаны на сложившейся карте сети, задающей состав и связи между аппаратами. Метод реконфигурации сети МКА включает следующие этапы:

- 1) проверка внешнего условия реконфигурации сети, если обнаружен специальный код от нового аппарата, то выполняется шаг пополнение сети, при этом карта сети увеличивается на 1 строку и 1 столбец;
- 2) проверка внутреннего условия реконфигурации сети (синхронный процесс), по заданному для сети временному регламенту каждый аппарат по очереди переходит в режим широковещательной рассылки, остальные аппараты сети – в режим приема, выполняется проверка связности пар МКА и обновляется временная метрика в карте сети;
- 3) по завершении цикла широковещательных рассылок однократно выполняется проверка изолированных вершин (появление пустой строки или столбца в карте сети), если это обнаруживается выполняется переиндексация аппаратов сети, карте сети уменьшается на выбывшие аппараты;
- 4) если требуется оптимизация сети МКА, тогда проводятся шаги прогнозирования 5-7, в противном случае – переход на п.8;
- 5) по внутреннему временному условию прогноза состояния сети МКА осуществляется накопление текущих метрик сети и анализ массивов временных рядов состояния аппаратов и значений прямой видимости пар аппаратов;
- 6) на основе нейронной сети строится прогноз видимости или работоспособности аппаратов сети в виде бинарной карты признаков с числом ячеек, соответствующих числу ячеек карты сети;
- 7) на основе карты сети и бинарной карты признаков проводится уточнение видимости пар ячеек сети и последующая проверка изолированных вершин, если это обнаруживается выполняется переиндексация аппаратов сети, карте сети уменьшается на выбывающие по прогнозу аппараты;
- 8) фиксируется новая конфигурация группировки МКА, аппараты готовы к построению маршрутов.

Базовый шаг метода реконфигурации сети МКА заключается в циклическом переключении каждого МКА сети на режим широковещательной передачи, остальные МКА – режим приема. При построении карты сети используются типовые операции:

- ◆ добавления строки/столбца в матрицу;
- ◆ записи вещественного значения метрики;
- ◆ поиск пустой строки/столбца в матрице;
- ◆ логического сложения двоичных признаков ячеек бинарных карт связности;
- ◆ -логического сложения двоичных признаков ячеек бинарных карт работоспособности.

Данные типовые операции поддерживаются практически любым программируемым микроконтроллером, что позволяет считать метод реконфигурации аппаратно-ориентированным, включая макро операцию построения прогноза работоспособности состояния аппарата на основе нейронной сети.

Результаты и обсуждение. Методы управления группировкой МКА следуют из основных информационно-управляющих обеспечивающих задач:

- ◆ запрос параметров подсистем жизнеобеспечения;
- ◆ запрос или управление ориентацией/стабилизацией;
- ◆ команды изменения циклограммы полёта (регламент передачи маяков);
- ◆ организацию передачи данных полезной нагрузки;
- ◆ ретрансляция служебных квитанций в группировке;
- ◆ команды изменения частотных каналов, скорости передачи данных, видов модуляции и прочих возможных параметров телекоммуникации и др.

В общем случае можно выделить методы управления подвижными многоэлементными системами [18–21] (рис. 2).

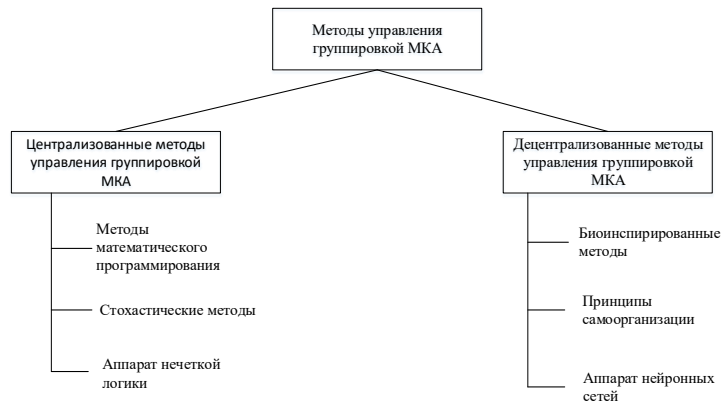


Рис. 2. Классификация методов управления группировкой МКА

В табл. 4 выполнено сравнение рассматриваемых методов для построения квалиметрических диаграмм, ранжирования методов для реконфигурации группировки.

Значения характеристик методов управления заданы в качественной шкале {low, medium, high}. Они служат основой для построения диаграмм и определения «сильных» сторон каждого из методов.

Таблица 4

Сравнение методов управления для группировки МКА

Характеристики	Методы управления					
	Математическое программирование	Стохастические	Аппарат нечеткой логики	На основе принципов самоорганизации	Стайного управления	Аппарат нейронных сетей
Отсутствие выделенного центра реконфигурации	low	low	medium	medium	high	high
Устойчивость решения	low	low	medium	medium	medium	high
Степень параллелизма	medium	low	medium	high	medium	high
Масштабируемость группировки	medium	low	medium	high	high	high
Типовые арифметические и логические операций	medium	low	medium	medium	medium	high
Необходимый объем памяти	low	low	medium	medium	medium	high
Адаптивность системы управления	low	medium	low	high	high	high
Предобработка данных	medium	low	high	low	high	high
Динамика внешней среды	medium	medium	medium	high	high	high
Степень формализации входных данных	high	high	medium	medium	medium	medium

На рис. 3 показаны квалиметрические диаграммы для рассматриваемых методов. Стимулирующая природа характеристик позволяет ранжировать данные методы по занимаемой площади. Анализ рис. 3 показывает, что наиболее приспособленными для проведения реконфигурации группировки можно считать методы

на основе принципов самоорганизации и аппарата нейронных сетей, позволяющие использовать предобработку данных, учитывать динамику внешней среды, типовые операции, распараллеливание вычислений.



Рис. 3. Квалиметрические диаграммы методов управления

Выводы. Среди вычислительно-ориентированных возможностей созданного аппаратно-ориентированного метода реконфигурации можно указать:

- ◆ параллельный анализ состояния группировки на основе формирования и коррекции множества карт сети вещественных и битовых значений о работоспособности аппаратов и поддержании связности аппаратов в группировке;
- ◆ быстрая масштабируемость группировки;
- ◆ обеспечение связности группировки за счет прогнозирования и оценки работоспособности аппаратов;
- ◆ использование базовых логических операций и операций пересылки для модификации карты сети под текущую конфигурацию.

Созданный аппаратно-ориентированный метод служит основой для управления группировкой. Управление группировкой подвижных аппаратов включает вычислительные процессы инициализации, пополнения, событийной или временной актуализации, генерации маршрутов и перерасчета метрик маршрутов, сервисного обслуживания.

Отличительной особенностью метода является возможность построения прогноза состояния аппаратов и обработки битовых данных для перестроения маршрутов между аппаратами и поддержания, в том числе, связности сети.

Нейронная сеть путем анализа собираемых исторических данных о пространственном положении МКА и состояния их бортовых подсистем формирует для прогноза бинарную карту признаков. Наложение карты сети и бинарной карты признаков формирует уточненную конфигурацию сети МКА с упреждающим учетом изменений прямой видимости аппаратов и их состояния.

Таким образом, созданный метод динамической реконфигурации позволяет управлять группировкой с переменным составом, он также может применяться для обработки строковых данных при поиске целевых шаблонов, заданных через вектор параметров при множественных вариантах определения шаблона [22]. Метод использует дополнительную информацию о потенциальной связности вершин в сети, что позволяет упреждающе исключать аппараты до их фактического выхода из строя и обеспечивает перестройку маршрутов и связность сети, в целом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ключников В.Ю. Построение кластеров малых космических аппаратов // Известия вузов. Приборостроение. – 2016. – Т. 59, № 6. – С. 423-428.
2. Скрипачев В.О., Жуков А.О., Башкатов А.И. Особенности построения кластера малых космических аппаратов // Технологии получения и обработки информации о динамических объектах и системах: Сб. материалов III Всероссийской научно-практической конференции. – М.: АО "Особое конструкторское бюро Московского энергетического института", 2023. – С. 351-364.
3. Атаицев О.И., Шиленьков Е.А., Фролов С.Н. [и др.]. Автономная интеллектуальная группировка малых космических аппаратов – космический эксперимент "радиоскаф-5" // Известия Института инженерной физики. – 2020. – № 1 (55). – С. 42-48.
4. Полуян М.М., Наумочкин Д.В., Петухов И.А. Анализ тенденций развития сверхмалых космических аппаратов // Вооружение и экономика. – 2019. – № 4. – Вып. 50. – С. 23-32.
5. Макаренко Д.М., Потюпкин А.Ю. Системный анализ космических аппаратов. – М.: Изд-во МО РФ, 2007. – 331 с.
6. Палкин М.В. Концептуальные вопросы создания и применения космических аппаратов группового полета // Наука и образование. – 2015. – № 8. – С. 100-115.
7. Потюпкин А.Ю., Данилин Н.С., Селиванов А.С. Кластеры малоразмерных космических аппаратов как новый тип космических объектов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2017. – Т. 4, № 4. – С. 45-56.
8. Жданов А.А. Автономный искусственный интеллект. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2008. – 359 с.
9. Ключников В.Ю. Интеллектуальная система автоматического поддержания и восполнения кластера малых космических аппаратов информационного назначения // К.Э. Циолковский. История и современность: Матер. 57-х Научных чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского, Калуга, 20–22 сентября 2022 года. Том Ч. 1. – Калуга: Индивидуальный предприниматель Стрельцов И.А., 2022. – С. 39-41.
10. Гриценко А.Е., Слинин С.И., Рубинов В.И. Проблемные вопросы реализации искусственного интеллекта в комплексах с беспилотными летательными аппаратами // Военно-космические силы. Теория и практика. – 2019. – № 12. – С. 126-134.
11. Лямкин И.В., Костяшина А.А. Современные подходы к моделированию интеллектуальных систем управления. Ч. 2. Автономный "Hard" и "Soft" – эволюция компетенций // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2022. – Т. 12, № 2. – С. 198-216.
12. Мелехин В.Б., Хачумов М.В. Пополнение знаний автономного беспилотного квадрокоптера-манипулятора в неопределенной проблемной среде // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2019. – № 2. – С. 72-83.
13. Матюха С.В. Искусственный интеллект в беспилотных авиационных системах // Транспортное дело России. – 2022. – № 1. – С. 8-11.
14. Перлюк В.В., Небылов А.В., Сяо Ян Х. Опыт разработки бортовых систем макетов микроспутников в рамках международных научно-образовательных программ // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2018. – № 8. – С. 685-691.
15. Зори А.А., Коренев В.Д. Критерии оценивания эффективности информационно-измерительных систем // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – С. 40-46.
16. Пантелеймонов И.Н., Потюпкин А.Ю., Траньков В.М., Пантелеймонова А.В., Филатов В.В., Тодуркин В.В. Методика расчета показателей эффективности системы управления полетом космических аппаратов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2019. – Вып. 11 (716). – С. 55-65.
17. Желтов С.Ю., Каляев И.А., Косьянчук В.В. [и др.]. Реконфигурация систем управления воздушных судов. – М.: Российская академия наук, 2021. – 204 с.
18. Клименко А.Б., Мельник Э.В. Методы организации распределенной разметки данных на основе групп пользователей с динамическим составом // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 2. – С. 234-245. – EDN SXJVIN.
19. Соллогуб А.В., Скобелев П.О., Симонова Е.В. и др. Интеллектуальная система распределенного управления групповыми операциями кластера малоразмерных космических аппаратов в задачах дистанционного зондирования земли // Вестник Самарского ГТУ. – 2012. – № 7 (28). – С. 47-54.

20. Потюпкин А.Ю., Волков С.А., Тимофеев Ю.А. Групповое управление многоспутниковой орбитальной группировкой на основе концепции режимов совместного функционирования // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы: научно-техн. журн. – 2021. – Т. 8. – Вып. 3. – С. 11-19.
21. Волков С.А., Потюпкин А.Ю., Тимофеев Ю.А. Управление системным эффектом многоспутниковой орбитальной группировки // Проблемы создания и применения космических аппаратов и систем средств выведения в интересах решения задач ВС РФ: материалы III Всероссийской научно-практ. конф. – СПб.: Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, 2022. – С. 251-257.
22. Тименко Е.А., Добросердов О.Г., Щитов А.Н., Тименко М.А. Аппаратно-ориентированный метод параллельного поиска префикса и суффикса по подстрокам фиксированной длины // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2022. – Т. 16, № 4. – С. 29-36.

REFERENCES

1. Klyushnikov V.Yu. Postroenie klasterov malykh kosmicheskikh apparatov [Construction of clusters of small spacecraft], *Izvestiya vuzov. Priborostroenie* [News of universities. Instrumentation], 2016, Vol. 59, No. 6, pp. 423-428.
2. Skripachev V.O., Zhukov A.O., Bashkatov A.I. Osobennosti postroeniya klastera malykh kosmicheskikh apparatov [Features of constructing a cluster of small spacecraft], *Tekhnologii polucheniya i obrabotki informatsii o dinamicheskikh ob"ektakh i sistemakh: Sb. materialov III Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Technologies for obtaining and processing information about dynamic objects and systems: Collection of materials of the III All-Russian scientific -practical conference]. Moscow: AO "Osoboe konstruktorskoe byuro Moskovskogo energeticheskogo instituta", 2023, pp. 351-364.
3. Atakishchev O.I., Shilenkov E.A., Frolov S.N. [i dr.]. Avtonomnaya intellektual'naya gruppировка malykh kosmicheskikh apparatov – kosmicheskiiy eksperiment "radioskaf-5" [Autonomous intelligent grouping of small spacecraft - space experiment "Radioscaf-5"], *Izvestiya Instituta inzhenernoy fiziki* [News of the Institute of Engineering Physics], 2020, No. 1 (55), pp. 42-48.
4. Poluyan M.M., Naumochkin D.V., Petukhov I.A. Analiz tendentsiy razvitiya sverkhmalykh kosmicheskikh apparatov [Analysis of development trends of ultra-small spacecraft], *Vooruzhenie i ekonomika* [Armament and Economics], 2019, No. 4, Issue 50, pp. 23-32.
5. Makarenko D.M., Potyupkin A.Yu. Sistemnyy analiz kosmicheskikh apparatov [System analysis of spacecraft]. Moscow: Izd-vo MO RF, 2007, 331 p.
6. Palkin M.V. Kontseptual'nye voprosy sozdaniya i primeneniya kosmicheskikh apparatov gruppovogo poleta [Conceptual issues of the creation and application of group flight spacecraft], *Nauka i obrazovanie* [Science and Education], 2015, No. 8, pp. 100-115.
7. Potyupkin A.Yu., Danilin N.S., Selivanov A.S. Klasteriy malorazmernykh kosmicheskikh apparatov kak novyy tip kosmicheskikh ob"ektov [Clusters of small-sized spacecraft as a new type of space objects], *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy* [Rocket and space instrument engineering and information systems], 2017, Vol. 4, No. 4, pp. 45-56.
8. Zhdanov A.A. Avtonomnyy iskusstvennyy intellekt [Autonomous artificial intelligence]. Moscow: Binom. Laboratoriya znaniy, 2008, 359 p.
9. Klyushnikov V.Yu. Intellektual'naya sistema avtomaticheskogo podderzhaniya i vospolneniya klastera malykh kosmicheskikh apparatov informatsionnogo naznacheniya [Intelligent system for automatic maintenance and replenishment of a cluster of small spacecraft for information purposes], K.E. Tsiolkovskiy. *Istoriya i sovremennost': Mater. 57-kh Nauchnykh chteniy, posvyashchennykh razrabotke nauchnogo naslediya i razvitiyu idey K.E. Tsiolkovskogo, Kaluga, 20–22 sentyabrya 2022 goda* [K.E. Tsiolkovsky. History and modernity: Materials of the 57th Scientific Readings dedicated to the development of the scientific heritage and the development of ideas of K.E. Tsiolkovsky, Kaluga, September 20–22, 2022]. Vol. Part 1. Kaluga: Individual'nyy predprinimatel' Strel'tsov I.A., 2022, pp. 39-41.
10. Gritsenko A.E., Slinin S.I., Rubinov V.I. Problemnye voprosy realizatsii iskusstvennyy intellekta v kompleksakh s bespilotnymi letatel'nyimi apparatami [Problematic issues of implementing artificial intelligence in complexes with unmanned aerial vehicles], *Voenno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika* [Military Space Forces. Theory and practice], 2019, No. 12, pp. 126-134.

11. Lyamkin I.V., Kostyashina A.A. Sovremennyye podkhody k modelirovaniyu intellektual'nykh sistem upravleniya. Ch. 2. Avtonomnyy "Hard" i "Soft" – evolyutsiya kompetentsiy [Modern approaches to modeling intelligent control systems. Part 2. Autonomous "Hard" and "Soft" – the evolution of competencies], *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefi i nefteproduktov* [Science and technology of pipeline transport of oil and petroleum products], 2022, Vol. 12, No. 2, pp. 198-216.
12. Melekhin V.B., Khachumov M.V. Popolnenie znaniy avtonomnogo bespilotnogo kvadrokoptera-manipulyatora v neopredelennoy problemnoy srede [Replenishing the knowledge of an autonomous unmanned quadcopter-manipulator in an uncertain problem environment], *Iskusstvennyy intellekt i prinyatie resheniy* [Artificial intelligence and decision making], 2019, No. 2, pp. 72-83.
13. Matyukha S.V. Iskusstvennyy intellekt v bespilotnykh aviatsionnykh sistemakh [Artificial intelligence in unmanned aerial systems], *Transportnoe delo Rossii* [Transport business of Russia], 2022, No. 1, pp. 8-11.
14. Perlyuk V.V., Nebylov A.V., Syao Yan Kh. Opyt razrabotki bortovykh sistem maketov mikrosputnikov v ramkakh mezhdunarodnykh nauchno-obrazovatel'nykh programm [Experience in developing on-board systems for microsatellite models within the framework of international scientific and educational programs], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [Izvestiya higher textbook establishments. Instrumentation], 2018, No. 8, pp. 685-691.
15. Zori A.A., Korenev V.D. Kriterii otsenivaniya effektivnosti informatsionno-izmeritel'nykh sistem [Criteria for assessing the effectiveness of information-measuring systems], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2008, pp. 40-46.
16. Panteleymonov I.N., Potyupkin A.Yu., Tran'kov V.M., Panteleymonova A.V., Filatov V.V., Todurkin V.V. Metodika rascheta pokazateley effektivnosti sistemy upravleniya poletom kosmicheskikh apparatov [Methodology for calculating the efficiency indicators of the space-craft flight control system], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [News of higher educational institutions. Mechanical engineering], 2019, Issue 11 (716), pp. 55-65.
17. Zheltov S.Yu., Kalyaev I.A., Kos'yanchuk V.V. [i dr.]. Rekonfiguratsiya sistem upravleniya vozdukhnykh sudov [Reconfiguration of aircraft control systems]. Moscow: Rossiyskaya akademiya nauk, 2021, 204 p.
18. Klimenko A.B., Mel'nik E.V. Metody organizatsii raspredelennoy razmetki dannykh na osnove grupp pol'zovateley s dinamicheskim sostavom [Methods for organizing distributed data marking based on user groups with dynamic composition], *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [News of Tula State University. Technical science], 2021, No. 2, pp. 234-245. EDN SXJVIN.
19. Sollogub A.V., Skobelev P.O., Simonova E.V. i dr. Intellektual'naya sistema raspredelennogo upravleniya gruppovymi operatsiyami klastera malorazmernykh kosmicheskikh apparatov v zadachakh distantsionnogo zondirovaniya zemli [Intelligent system for distributed control of group operations of a cluster of small-sized spacecraft in tasks of remote sensing of the earth], *Vestnik Samarskogo GTU* [Bulletin of Samara State Technical University], 2012, No. 7 (28), pp. 47-54.
20. Potyupkin A.Yu., Volkov S.A., Timofeev Yu.A. Gruppovoe upravlenie mnogosputnikovoy orbital'noy gruppировкой na osnove kontseptsii rezhimov sovmestnogo funktsionirovaniya [Group control of a multi-satellite orbital constellation based on the concept of joint operation modes], *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy: nauchno-tekhn. zhurn* [Rocket and space instrument making and information systems: scientific and technical journal], 2021, Vol. 8, Issue 3, pp. 11-19.
21. Volkov S.A., Potyupkin A.Yu., Timofeev Yu.A. Upravlenie sistemnym efektom mnogosputnikovoy orbital'noy gruppировки [Control of the system effect of a multi-satellite orbital constellation], *Problemy sozdaniya i primeneniya kosmicheskikh apparatov i sistem sredstv vyvedeniya v interesakh resheniya zadach VS RF: materialy III Vserossiyskoy nauchno-prakt. konf.* [Problems of creation and application of spacecraft and launch vehicle systems in the interests of solving problems of the RF Armed Forces: materials of the III All-Russian scientific-practical conference. conf.]. Saint Petersburg: Voenno-kosmicheskaya akademiya imeni A.F. Mozhayskogo, 2022, pp. 251-257.

22. Titenko E.A., Dobroserdov O.G., Shchitov A.N., Titenko M.A. Apparato-orientirovannyi metod parallel'nogo poiska prefiksa i suffiksa po podstrokam fiksirovannoy dliny [Hardware-oriented method of parallel search for prefix and suffix using substrings of fixed length], *T-Comm: Telekommunikatsii i transport* [T-Comm: Telecommunications and Transport], 2022, Vol. 16, No. 4, pp. 29-36.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Курейчик.

Титенко Евгений Анатольевич – Юго-Западный государственный университет; e-mail: johntit@mail.ru; г. Курск, Россия;; тел.: +79051588904; кафедра программной инженерии; к.т.н.; доцент.

Чернецкая Ирина Евгеньевна – e-mail: white@mail.ru; кафедра вычислительной техники; зав. кафедрой; д.т.н. доцент.

Лисицын Леонид Александрович – e-mail: leo_263@mail.ru; кафедра программной инженерии; к.т.н.; доцент.

Титенко Михаил Андреевич – e-mail: mikhail-titenko@mail.ru; аспирант.

Егоров Сергей Иванович – e-mail: sie58@mail.ru; д.т.н.; доцент; профессор кафедры вычислительной техники.

Titenko Evgeny Anatolievich – South-West State University; e-mail: johntit@mail.ru; Kursk, Russia; phone: +79051588904; the department of computing system. cand. of eng. sc.; associate professor.

Chernetskaya Irina Evgenievna – e-mail: white@mail.ru; the department of computer science; head of department; dr. of eng. sc.; associate professor.

Lisitsyn Leonid Alexandrovich – e-mail: leo_263@mail.ru; the department of computing system cand. of eng. sc., associate professor.

Titenko Mikhail Andreevich – e-mail: mikhail-titenko@mail.ru; postgraduate.

Egorov Sergey Ivanovich – e-mail: sie58@mail.ru; dr. of eng. sc.; associate professor; professor of the department of computer science.

УДК 004.021

DOI 10.18522/2311-3103-2023-4-87-96

М.С. Анферова, А.А. Белевцев, А.М. Белевцев

МЕТОДИКА АНАЛИЗА РАЗВИТИЯ ЗАРОЖДАЮЩИХСЯ ТЕХНОЛОГИЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФРОНТОВ

Скорость изменений в инновационном развитии экономики постоянно возрастает, особенно в высокотехнологичных областях. В этой связи задача проведения постоянного динамического мониторинга, выделение значимых технологий и стратегического анализа направлений развития науки и технологий приобретает исключительно важное значение. В настоящее время данная работа не автоматизирована и требует значительных финансовых и временных затрат. В работе проведен анализ основных проблем построения процедур мониторинга и выявления зарождающихся технологий, формирования и развития технологических трендов. Решение задач автоматизации процесса определения трендов связано с разработкой и использованием формализованных процедур и статистических методов исследования текстов научных публикаций, патентов и коллекций научно-технологических документов. Однако, в связи с высокой динамикой изменений, библиометрического и лингвистического анализа недостаточно для формирования трендов развития. Осуществление новой технологической разработки может занимать несколько лет. В этой связи необходимо, чтобы к моменту завершения разработки цель проекта оставалась по-прежнему актуальной, а достигнутые параметры имели конкурентные преимуще-

ства. Достижение поставленных задач невозможно без понимания эволюции технологий и технических решений во времени и прогнозирования их новых параметров качества. Имеющиеся методики оценки и прогнозирования уровня развития технологий не учитывают, как правило, высокую динамику формирования новых траекторий развития технологий и их взаимосвязей в технологических трендах. Необходимо создание информационно-аналитических систем обработки данных, которые позволят из открытых или закрытых источников выделять технологии, и интерпретировать их. В настоящей работе рассматривается методика выявления зарождающихся технологий и формирования технологических трендов. Методика учитывает наличие характеристик трендов, взаимосвязей отдельных технологий и тип тренда. Определены основные этапы формирования новых технологий. Выделены характеристики и основные критерии нового тренда. Предложена классификация типов новых трендов. Для заданных предметных областей предложен алгоритм формирования и анализа характеристик технологического тренда.

Технологические тренды; зарождающиеся технологии мониторинг; Big Data; алгоритм; характеристики; технологический фронт.

M.S. Anferova, A.A. Belevtsev, A.M. Belevtsev

METHODOLOGY FOR ANALYZING THE DEVELOPMENT OF EMERGING TECHNOLOGIES AND TECHNOLOGICAL FRONTS

The speed of changes in the innovative development of the economy is constantly increasing, especially in high-tech areas. In this regard, the task of conducting continuous dynamic monitoring, identifying significant technologies and strategic analysis of the directions of development of science and technology becomes extremely important. Currently, this work is not automated and requires significant financial and time costs. The paper analyzes the main problems of building monitoring procedures and identifying emerging technologies, the formation and development of technological trends. The solution of the tasks of automating the process of determining trends is associated with the development and use of formalized procedures and statistical methods for the study of texts of scientific publications, patents and collections of scientific and technological documents. However, due to the high dynamics of changes, bibliometric and linguistic analysis is not enough to form development trends. The implementation of a new technological development may take several years. In this regard, it is necessary that by the time the development is completed, the project goal remains relevant, and the achieved parameters have competitive advantages. Achieving the set tasks is impossible without understanding the evolution of technologies and technical solutions over time and forecasting their new quality parameters. The available methods of assessing and forecasting the level of technology development do not consider, as a rule, the high dynamics of the formation of new trajectories of technology development and their interrelationships in technological trends. It is necessary to create information and analytical data processing systems that will allow technologies to be isolated from open or closed sources and interpreted. In this paper, the method of identifying emerging technologies and the formation of technological trends is considered. The methodology takes into account the presence of trend characteristics, the interrelationships of individual technologies and the type of trend. The main stages of the formation of new technologies are determined. The characteristics and main criteria of the new trend are highlighted. A classification of the types of new trends is proposed. For the given subject areas, an algorithm for the formation and analysis of the characteristics of the technological trend is proposed.

Technological trends; emerging monitoring technologies; Big Data; algorithm; characteristics; technological front.

Введение. В условиях резкого обострения борьбы за технологическое превосходство и технологический суверенитет, а также высокой динамики формирования новых направлений и траекторий технологического развития задача стратегического анализа направлений развития науки и технологий является чрезвычайно актуальной [1].

Для эффективного решения данной задачи необходимо проведение непрерывного глобального мониторинга научно-технологических направлений и тенденций развития [2].

Возникает необходимость создания новых методов обработки и анализа информации для автоматизированных информационно-аналитических систем [3, 4].

На основе проведенного мониторинга в работе [5] были сформированы основные направления исследований ведущих научных центров и компаний, представлена общая процедура мониторинга [6]. Проведенный анализ не обеспечивает решение поставленной задачи формирования новых трендов – возникает необходимость разработки новой методики.

В этой связи разработка алгоритма выявления новых трендов и зарождающихся технологий является актуальной.

Основная часть. В связи с высокой динамикой изменений необходимо выявлять технологии на ранней стадии зарождения, в противном случае велика вероятность того, что последствия и приложения данной технологии могут заместить функционал текущих разработок [7, 8], что грозит большими финансовыми и временными потерями [9].

Необходимо формирование предварительного перечня направлений исследований в заданной предметной области.

В этой связи можно выделить следующие проблемы по обнаружению трендов и технологий:

1. Технологии на ранней стадии своего жизненного цикла некатегоризированные и хаотичные [10].
2. Сложность выявления конкретных параметров трендов.
3. Сложность реализации алгоритма из-за множества относительных параметров.
4. В ходе анализа можно обнаружить несколько конкурирующих технологий, которые имеют одинаковое функциональное назначение. При этом в разный период времени могут лидировать разные технологии [11].

Вместе с тем, в ходе проведения динамического мониторинга и возрастающего объема изменяющейся информации библиометрического и лингвистического анализа [12] недостаточно для формирования трендов развития.

Одной из наиболее сложных проблем является задача анализа зарождения и формирования развития нового технологического тренда.

Методика решения данной проблемы должна обеспечивать следующие задачи:

- ♦ Выявление зарождающихся технологий.
- ♦ Определение состава тренда.
- ♦ Определение типа тренда.
- ♦ Оценка основных характеристик тренда.

На рис. 1 представлены этапы формирования новой технологии.

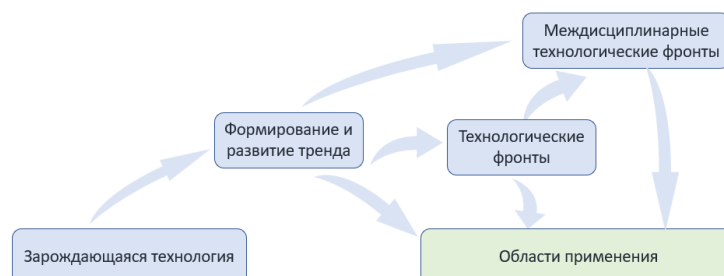


Рис. 1. Траектории развития технологий

Важно различать момент, когда конкретная технология начинает появляться и когда она становится релевантной для измерения в статистических терминах, таких как «интенсивность», «уровень готовности технологии» «научная продуктивность» [13], создание, распространение и использование технологий, а также производство технологических товаров и услуг.

Можно выделить следующие основные характеристики тренда:

1. Интенсивность (предприятия, публикации, патенты) – $I_{c_i}^n$.
2. Скорость роста интенсивности (значение интенсивности за период времени деленное на интервал измерений) – $V_I = I_{c_i} / \Delta t$.
3. Уровень готовности (TRL) – 1-9 ().
4. Принадлежность к классификатору $K_{O_i}^n$ (ОП_i).
5. Множество областей применения P_m .

Уравнение логического вывода принадлежности технологии к технологическому тренду и предметной области P_m можно представить в следующем виде:

$$c_i^n \rightarrow \Phi N_i^n \rightarrow (O_i^n \in C_{n_i}^{P_m}) \rightarrow P_m,$$

где

c_i^n – технология принадлежащая технологическому тренду $C_{n_i}^{P_m}$;

ΦN_i^n – функциональные назначения технологий $\{c_i^n\}$;

$O_i^n, i = \overline{1, N}$ – области применения технологий $\{c_i^n\}$.

Уравнения логического вывода для формирования нового тренда можно представить в следующем виде

$$\begin{aligned} c_j^k \rightarrow (c_j^k \in C_{n_i}^{P_m}) \cup (\Phi N_i^k \equiv \forall \Phi \nexists c_j^n \in C_{n_i}^{P_m}) \cup (I_{c_i}^k > L) \cup (TRL \leq 2) \rightarrow \\ \rightarrow O_i^{m+1} \rightarrow C_{k_i}^{P_{m+1}} \rightarrow P_{m+1} \end{aligned} \quad (1)$$

При этом в ходе мониторинга возможно выявление технологий, для которых существует несколько разных областей применения в различных трендах.

$$c_j^k \rightarrow (\Phi N_i^K \rightarrow (O_i^n \cup O_j^{m+1}))$$

Тогда:

$$\begin{aligned} c_j^k \rightarrow (c_j^k \in C_{n_i}^{P_m}) \cup (\Phi N_i^K \rightarrow (O_i^n \cup O_j^{m+1})) \cup (I_{c_j}^k > L) \cup (TRL \leq 2) \rightarrow \\ \rightarrow C_{K_i}^{P_{m+1}} \rightarrow O_j^{m+1} \rightarrow P_{m+1}. \end{aligned} \quad (2)$$

Данная методика может быть положена в процедуры прогнозирования развития технологических трендов и построения дорожных карт.

Рассмотрим вариант реализации предлагаемой методики на примере предметной области P_m – «ИТ-направления СЦО».

Анализ показал [14], что основными направлениями развития для заданной предметной области на этапе исследования в 2016 году стали:

1. Технологии Кибероружия.
2. Технологии Кибербезопасности.
3. Программное Обеспечение.
4. Технологии Искусственного Интеллекта.
5. Технологии Анализа Больших Неструктурируемых Данных.
6. Технологии Стратегического Анализа.
7. Технологии Проведения Информационных Войн.

Основной комплекс исследований по рассматриваемой тематике осуществляют федеральные научно-исследовательские центры (DARPA, IARPA, DISA), федеральные венчурные фонды (In-Q-tel), ведущие университеты и национальные исследовательские лаборатории США, и Европы, а также многочисленные ИТ-компании по всему миру [15, 16].

Для проведения исследований была разработана общая процедура проведения анализа [17].

В общем случае алгоритм формирования трендов содержит следующие этапы:

1. Проведение глобального мониторинга. Предложены алгоритмы, обеспечивающие определение опорных тем, оценку ранжирования и релевантности информации [18].
2. Выявление новой технологии.
3. Фиксация параметров, описанных выше.
4. Описание и интерпретация. Выявление области применения относится технология, функциональных назначений, кем используется, на какую аудиторию рассчитана, какие задачи решает.
5. Кластеризация. Объединение периметров в однородные группы, которые говорят о наличии какого-то заметного изменения.
6. Оценка характеристик трендов.
7. Верификация. Достаточно ли много сигналов, чтобы говорить о существенном изменении.
8. Определения типа тренда (автономный/связанный).
9. Формулировка тренда и интерпретация.

В ходе следующего этапа работы [19] были проанализированы общие тенденции формирования коммуникационных систем сетевой информационной инфраструктуры, на основе зарубежных исследований и разработок. Что позволило выделить 2 новых тренда:

1. Биологические системы.
2. System-Of-System.

Биологические системы- большая технологическая область, где конкретные технологии могут обладать различными характеристиками.

Формируем перечень технологий c_i^n , принадлежащих технологическому тренду.

На 1 этапе в результате выполнения проведенного мониторинга выявлены технологические тренды C_n^{pm} и определены совокупности технологий C_i^n .

Были определены функциональных назначения технологий и области применения.

Данный тренд является автономным. В соответствии с формулой (1) формируем технологии на следующем этапе мониторинга.

В соответствии с соотношением логического вывода [20] проводим структуризацию технологических трендов. Динамический граф для рассматриваемого варианта представлен на рис. 2.

Тренд System-Of-System является проблемно-ориентированным трендом. Технологические направления подтверждается совокупностью исследовательских программ с различным функциональными назначениями и областями применения.

Можно наблюдать связь данного тренда с другими направлениями. Для формирования новых технологий воспользуемся формулой (2) (рис. 3).

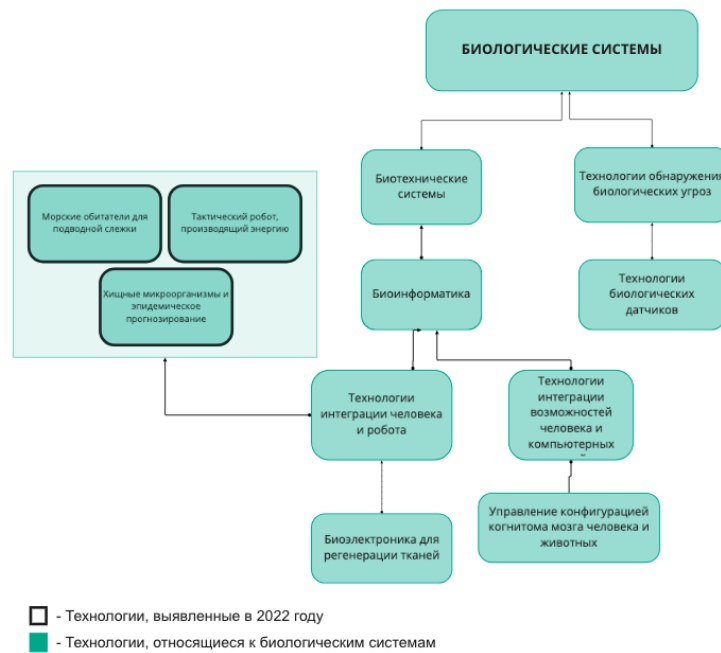


Рис. 2. Структура взаимосвязи биологических систем

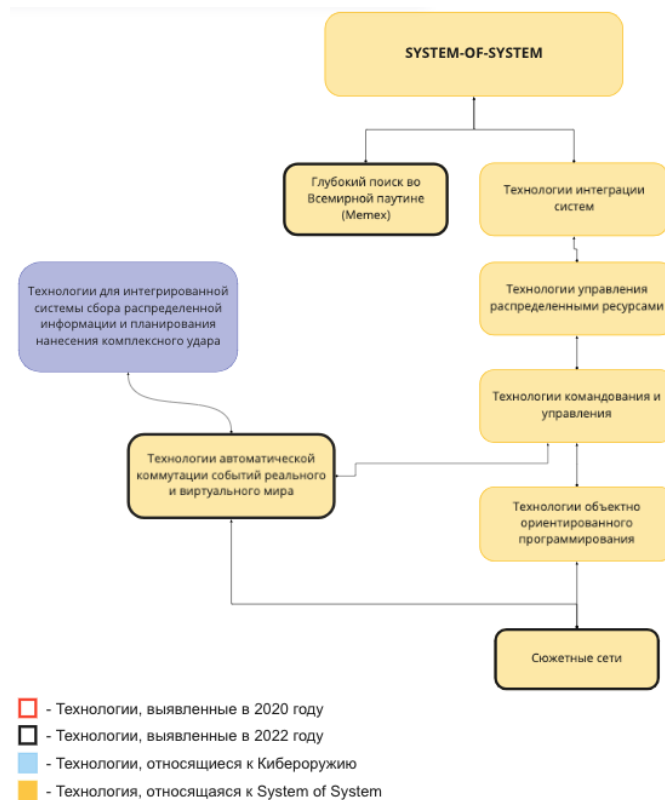


Рис. 3. Структура взаимосвязи System of System

В ходе мониторинга можно наблюдать нарастание интенсивности исследований по рассматриваемым тематикам. На рис. 4 представлена сводная диаграмма активности исследований федеральных исследовательских центров, национальных лабораторий, крупных промышленных компаний. При этом приоритеты тренда меняются с течением времени, так как происходит изменения технических средств.

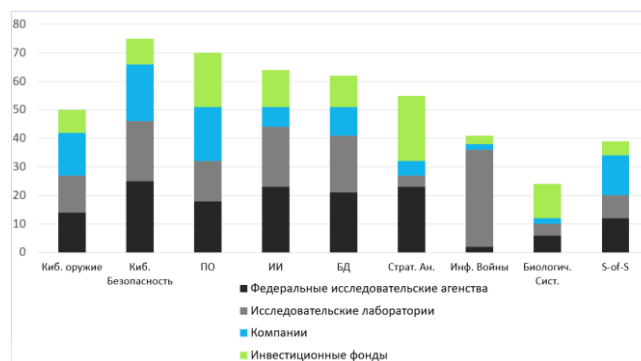


Рис. 4. Сводная диаграмма интенсивности исследований

Таким образом данный пример подтверждает правильность предложенной методики.

Учитывая данные, можно сделать вывод, что за новыми и растущими областями, может последовать последовательность событий, в которой крупной технологической инновации предшествует ряд более мелких постепенных изобретений, расширяющих диапазон применения основных технологий, объединяя их в группу. При этом, часто такие технологии ранее были отмечены как крупные прорывы.

Заключение

1. Определены основные проблемы по обнаружению трендов и технологий.
2. Выделены признаки нового тренда.
3. Обозначены основные критерии нового тренда.
4. Предложена классификация новых трендов.
5. Разработана структура определения трендов.
6. Предложена общая методика анализа направлений развития IT-технологий нового поколения.
7. Определены основные тренды развития IT-технологий нового поколения для СЦО.

В условиях неопределённости, отсутствия стандартизированных схем и статистических данных только сочетание мониторинга и стратегического анализа технологий и технологических трендов является необходимым подходом для достижения информационного превосходства и обоснования принятия управленческих решений.

Методика определения и классификации научно-технологических фронтов и зарождающихся технологий может быть положена в основу автоматизации мониторинга и стратегического анализа в информационно аналитических комплексах. Внедрение данной методики позволит сократить общее время фиксации тренда в 5-6 раз по отношению к запросам, формируемым аналитиками.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белевцев А.М., Садреев Ф.Г., Белевцев А.А., Балыбердин В.А. Разработка интеллектуальных сервисов мониторинга технологических трендов в информационно-аналитических комплексах // Наукоемкие технологии. – 2019. – Т. 20, № 3. – С. 24-29.

2. Анферова М.С., Белевцев А.М. Анализ направлений создания алгоритмов эффективного поиска информации в сетях общего и специального назначения // Матер. III Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки и производства». – Рязань: РГРТУ, 2018.
3. Анферова М.С., Белевцев А.М. Поисковые роботы для автоматизированного мониторинга информации в сетях общего и специального назначения // 18-я Международная научно-практическая конференция «Управление качеством». – 2019.
4. Анферова М.С., Белевцев А.М. Разработка алгоритмов интеллектуального сервиса поиска и мониторинга информации // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – №. 3. – С. 6-17.
5. Анферова М.С., Белевцев А.М. Анализ направлений развития технологий мониторинга в условиях большого объёма неструктурированной информации // XXIV Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием имени профессора О.Н. Пьявченко «Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении» «КомТех-2020». – 2020.
6. Анферова М.С., Белевцев А.М. Общая концепция создания технологии интеллектуального поиска информации в сетях общего и специального назначения // XXV Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием имени профессора О.Н. Пьявченко «Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении» «КомТех-2021». – 2021.
7. Millett S.M. and Honton E.J., *Manager's A. Guide to Technology Forecasting and Strategy Analysis Methods*. – Battelle Press, 1991.
8. Sammut-Bonnici Tanya, Galea David. PEST analysis // Wiley Encyclopedia of Management. – Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2015-01-22.
9. Шваб К. Четвертая промышленная революция. – М.: Эксмо, 2018. – 285 с. – ISBN 978-5-699-98379-7.
10. Poh K.L., Ang B.W., Bai F. A comparative analysis of R&D project evaluation methods // R&D Management. – 2001. – Vol. 31, No. 1. – P. 63-75.
11. Shibata N., Kajikawa Y., & Sakata I. Detecting potential technological fronts by comparing scientific papers and patents // Foresight. – 2011. – 13 (5). – P. 51-60.
12. Анферова М.С., Белевцев А.М. Анализ требований и разработка алгоритмов интеллектуальных сервисов мониторинга // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 3. – С 119-129.
13. Kotler Philip, Berger Roland, Bickhoff Nils. The Quintessence of Strategic Management: What You Really Need to Know to Survive in Business.
14. Белевцев А.М., Балыбердин В.А., Бендерский Г.П., Белевцев А.А. Анализ направлений развития нано- и IT-технологий для построения специализированных сетевых коммуникационных систем нового поколения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – №. 3.
15. Белевцев А.М., Балыбердин В.А., Белевцев А.А., Маркелов Е.Б. Некоторые тенденции развития информационных технологий для систем сетецентрического управления // Вооружение и экономика. – 2020. – № 1 (51). – С. 21-26.
16. Jeng D.J.-F. & Huang K.-H. Strategic project portfolio selection for national research institutes // Journal of Business Research. – 2015. – 68 (11). – P. 2305-2311.
17. Белевцев А.М., Балыбердин В.А., Бендерский Г.П., Белевцев А.А. Основные тенденции развития информационных технологий для систем сетецентрического управления // Сб. докладов: Матер. Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении» «КОМТЕХ- 2016». – 2016.
18. Анферова М.С., Белевцев А.М. Разработка алгоритма определения опорных тем для решения задач стратегического анализа // Сб. докладов: Матер. Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении» «КОМТЕХ- 2022». – 2022. – С. 132-138.
19. Белевцев А.М., Балыбердин В.А., Белевцев А.А. Методика оценки времени и стоимости реализации технологических трендов в условиях неопределенности и не полноты информации // ИТ. – 2019. – № 5.
20. Белевцев А.А., Белевцев А.М., Балыбердин В.А. Методика анализа и оценки приоритетов технологических трендов и технологий // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 6.

REFERENCES

1. Belevtsev A.M., Sadreev F.G., Belevtsev A.A., Balyberdin V.A. Razrabotka intellektual'nykh servisov monitoringa tekhnologicheskikh trendov v informatsionno-analiticheskikh kompleksakh [Development of intelligent services for monitoring technological trends in information and analytical complexes], *Naukoemkie tekhnologii* [Science-intensive technologies], 2019, Vol. 20, No. 3, pp. 24-29.
2. Anferova M.S., Belevtsev A.M. Analiz napravleniy sozdaniya algoritmov effektivnogo poiska informatsii v setyakh obshchego i spetsial'nogo naznacheniya [Analysis of directions for creating algorithms for effective information search in general and special-purpose networks], *Mater. III Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Aktual'nye problemy sovremennoy nauki i proizvodstva»* [Materials of the III All-Russian Scientific and Technical Conference "Current Problems of Modern Science and Production"]. Ryazan': RGRTU, 2018.
3. Anferova M.S., Belevtsev A.M. Poiskovye roboty dlya avtomatizirovannogo monitoringa informatsii v setyakh obshchego i spetsial'nogo naznacheniya [Search robots for automated monitoring of information in general and special-purpose networks], *18-ya Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Upravlenie kachestvom»* [18th International Scientific and Practical Conference "Quality Management"], 2019.
4. Anferova M.S., Belevtsev A.M. Razrabotka algoritmov intellektual'nogo servisa poiska i monitoringa informatsii [Development of algorithms for an intelligent service for searching and monitoring information], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. 3, pp. 6-17.
5. Anferova M.S., Belevtsev A.M. Analiz napravleniy razvitiya tekhnologiy monitoringa v usloviyakh bol'shogo ob'ema nestrukturirovannoy informatsii [Analysis of directions for the development of monitoring technologies in conditions of a large volume of unstructured information], *XXIV Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem imeni professora O.N. Pyavchenko "Komp'yuternye i informatsionnye tekhnologii v nauke, inzhenerii i upravlenii" «KomTekh-2020»* [XXIV All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation named after Professor O.N. Pyavchenko "Computer and information technologies in science, engineering and management" "ComTech-2020"], 2020.
6. Anferova M.S., Belevtsev A.M. Obshchaya kontseptsiya sozdaniya tekhnologii intellektual'nogo poiska informatsii v setyakh obshchego i spetsial'nogo naznacheniya [General concept of creating technology for intelligent information retrieval in general and special-purpose networks], *XXV Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem imeni professora O.N. Pyavchenko "Komp'yuternye i informatsionnye tekhnologii v nauke, inzhenerii i upravlenii" «KomTekh-2021»* [XXV All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation named after Professor O.N. Pyavchenko "Computer and information technologies in science, engineering and management" "ComTech-2021"], 2021.
7. Milet S.M. and Honton E.J., *Manager's A. Guide to Technology Forecasting and Strategy Analysis Methods*. Battelle Press, 1991.
8. Sammut-Bonnici Tanya, Galea David. PEST analysis // *Wiley Encyclopedia of Management*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2015-01-22.
9. Shvab K. Chetvertaya promyshlennaya revolyutsiya [The fourth industrial revolution]. Moscow: Eksmo, 2018, 285 p. ISBN 978-5-699-98379-7.
10. Poh K.L., Ang B.W., Bai F. A comparative analysis of R&D project evaluation methods, *R&D Management*, 2001, Vol. 31, No. 1, pp. 63-75.
11. Shibata N., Kajikawa Y., & Sakata I. Detecting potential technological fronts by comparing scientific papers and patents, *Foresight*, 2011, 13 (5), pp. 51-60.
12. Anferova M.S., Belevtsev A.M. Analiz trebovaniy i razrabotka algoritmov intellektual'nykh servisov monitoringa [Analysis of requirements and development of algorithms for intelligent monitoring services], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 3, pp 119-129.
13. Kotler Philip, Berger Roland, Bickhoff Nils. The Quintessence of Strategic Management: What You Really Need to Know to Survive in Business.

14. Belevtsev A.M., Balyberdin V.A., Benderskiy G.P., Belevtsev A.A. Analiz napravleniy razvitiya nano- i IT-tehnologiy dlya postroeniya spetsializirovannykh setevykh kommunikatsionnykh sistem novogo pokoleniya [Analysis of directions of development of nano- and IT technologies for the construction of specialized network communication systems of a new generation], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 3.
15. Belevtsev A.M., Balyberdin V.A., Belevtsev A.A., Markelov E.B. Nekotorye tendentsii razvitiya informatsionnykh tekhnologiy dlya sistem setetsentricheskogo upravleniya [Some trends in the development of information technologies for network-centric control systems], *Vooruzhenie i ekonomika* [Arms and Economics], 2020, No. 1 (51), pp. 21-26.
16. Jeng D.J.-F. & Huang K.-H. Strategic project portfolio selection for national research institutes, *Journal of Business Research*, 2015, 68 (11), pp. 2305-2311.
17. Belevtsev A.M., Balyberdin V.A., Benderskiy G.P., Belevtsev A.A. Osnovnye tendentsii razvitiya informatsionnykh tekhnologiy dlya sistem setetsentricheskogo upravleniya [Main trends in the development of information technologies for network-centric control systems], *Sb. dokladov: Mater. Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Komp'yuternye i informatsionnye tekhnologii v nauke, inzhenerii i upravlenii» «KOMTEKh- 2016»* [Collection of reports: Proceedings of the All-Russian scientific and technical conference with international participation "Computer and information technologies in science, engineering and management" "COMTECH-2016"], 2016.
18. Anferova M.S., Belevtsev A.M. Razrabotka algoritma opredeleniya opornykh tem dlya resheniya zadach strategicheskogo analiza [Development of an algorithm for identifying key topics for solving problems of strategic analysis], *Sb. dokladov: Mater. Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Komp'yuternye i informatsionnye tekhnologii v nauke, inzhenerii i upravlenii» «KOMTEKh- 2022»* [Collection of reports: Proceedings of the All-Russian scientific and technical conference with international participation "Computer and information technologies in science, engineering and management" "COMTECH-2022"], 2022, pp. 132-138.
19. Belevtsev A.M., Balyberdin V.A., Belevtsev A.A. Metodika otsenki vremeni i stoimosti realizatsii tekhnologicheskikh trendov v usloviyakh neopredelennosti i ne polnoty informatsii [Methodology for estimating the time and cost of implementing technological trends in conditions of uncertainty and incompleteness of information], *NT* [Heat supply news], 2019, No. 5.
20. Belevtsev A.A., Belevtsev A.M., Balyberdin V.A. Metodika analiza i otsenki prioritetov tekhnologicheskikh trendov i tekhnologiy [Methodology for analyzing and assessing the priorities of technological trends and technologies], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 6.

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

Анферова Маргарита Сергеевна – Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); e-mail: gludkina@yandex.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79055220749; старший преподаватель.

Белевцев Андрей Михайлович – e-mail: ambelevtsev@yandex.ru; тел.: +79037691788; д.т.н.; профессор.

Белевцев Андрей Андреевич – ПАО «Сбербанк»; e-mail: Andrey.Belevtsev@gmail.com; г. Москва, Россия; тел.: + 74959575731.

Anferova Margarita Sergeevna – Moscow Aviation Institute (National Research University); e-mail: gludkina@yandex.ru; Moscow, Russia; phone: +79055220749; senior lecturer.

Belevtsev Andrey Michailovitch – e-mail: ambelevtsev@yandex.ru; phone: +79037691788; dr. of eng. sc.; professor.

Belevtsev Andrey Andreevich – Sberbank PJSC; e-mail: Andrey.Belevtsev@gmail.com; Moscow, Russia; phone: + 74959575731.

П.О. Никашина, А.В. Боженюк**ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА НА ОСНОВЕ
ПЕРИОДИЧЕСКИХ НЕЧЕТКИХ ГРАФОВ**

Рассматривается одна из наиболее часто встречаемых и значимых проблем быстро развивающихся населенных пунктов – несогласованное регулирование дорожно-транспортных потоков при помощи оптических средств управления на нескольких участках пересечения проезжих частей. Подобная проблема наиболее актуальна в населенных пунктах, с высоким уровнем неконтролируемого прироста населения, использующего в качестве основного средства передвижения – личные транспортные средства. Актуальность сформированной проблемы обосновывается резким увеличением количества участников дорожного движения, влекущего за собой риски возникновения дорожно-транспортных происшествий, а также усложнение логистического проектирования, сопряженного с увеличением финансовых затрат транспортно-логистических компаний. Для решения выявленной проблемы, в рамках представленной работы приведен краткий обзор литературных источников, позволяющий оценить современный уровень развития систем подобного назначения. В результате выполнения данного обзора установлено, что наиболее эффективными методами решения поставленной проблемы, является применение методов нечетких графов. В связи с этим принято решение о проведении исследования указанных методов, в рамках решения выявленной проблематики на примере дорожных участков города Таганрог. В качестве основного подхода применяемого при регулировании дорожно-транспортного движения предлагается использование периодических темпоральных нечетких графов. Данная работа выступает базисом для дальнейших исследований и позволяет сформировать целостное представление об особенностях вышеуказанных графов. Новизна данной работы определяется исходя из применения периодических темпоральных нечетких графов в рамках решения задачи регулирования транспортных потоков на последовательных участках пересечения проезжих частей.

Перекресток; транспортные потоки; регулирование транспортных потоков; периодические нечеткие графы.

P.O. Nikashina, A.V. Bozhenyuk**TRAFFIC FLOW OPTIMIZATION BASED ON PERIODIC FUZZY GRAPHS**

In this paper, one of the most common and significant problems of rapidly developing settlements is considered - inconsistent regulation of traffic flows using optical controls at several sections of the intersection of carriageways. This problem is most relevant in settlements with a prominent level of uncontrolled population growth, using personal vehicles as the main means of transportation. The relevance of the formed problem is substantiated by a sharp increase in the number of road users, which entails the risks of traffic accidents, as well as the complication of logistics design, associated with an increase in the financial costs of transport and logistics companies. To solve the identified problem, within the framework of the presented work, a brief review of literary sources is given, which makes it possible to assess the current level of development of systems for this purpose. As a result of this review, it was found that the most effective methods for solving the problem posed are the use of fuzzy graph methods. In this regard, it was decided to conduct a study of these methods, as part of solving the identified problems on the example of road sections of the city of Taganrog. The use of periodic temporal fuzzy graphs is proposed as the main approach used in the regulation of traffic. This work is the initial theoretical basis for further research and allows you to form a holistic view of the features of the above graphs. The novelty of this work is determined based on the use of periodic temporal fuzzy graphs in the framework of solving the problem of regulating traffic flows at successive sections of the intersection of carriageways.

Crossroads; traffic flows; regulation of traffic flows; periodic fuzzy graphs.

Введение. На сегодняшний день эффективное регулирование дорожно-транспортных потоков наиболее важная и острая проблема, с которой сталкиваются быстро развивающиеся города, расположенные на территории Российской Федерации. Актуальность сформулированной проблемы обуславливается множеством факторов, зависящих от эффективности функционирования транспортных систем [1]. К подобным факторам стоит отнести: логистику грузов внутри и за пределами государства, сложности развития внутреннего туризма, увеличение количества дорожно-транспортных происшествий и т. п. Вышеперечисленные факторы способны напрямую влиять на экономику не только отдельно взятых населенных пунктов или регионов, но также на экономику федеральных округов или государства в целом. Однако, невзирая на важность рассматриваемой проблемы, существующие системы дорожно-транспортного регулирования не отвечают современным критериям быстро развивающихся крупным и малых городов, при этом инфраструктура населенных пунктов также не выдерживает подобное количество участников дорожного движения. Модернизация инфраструктуры отдельно взятого населенного пункта влечет за собой значительные финансовые и временные затраты, сопряженные с увеличением нагрузки на иные участки дорожного движения, при этом, проведение подобных работ обособленно от модификации систем регулирования, способны продемонстрировать лишь временный эффект. Основным показателем необходимости модернизации систем транспортного регулирования выступает частота возникновения заторов на тех или иных участках дорожного движения.

Дорожный затор – скопление участников дорожного движения на улице или дорожном покрытии, движущихся со значительно меньшей скоростью чем предполагается для данного участка дороги [2]. Феномен возникновения дорожных заторов обуславливается множеством факторов, в том числе: увеличивающимся объемом движения, недостаточной пропускной способностью перекрестков, ограниченной шириной дорожного полотна и т. п. Еще одним фактором влекущим за собой появление дорожных заторов выступает несогласованность функционирования работы светофоров на последовательных участках пересечения проезжих частей, а также отсутствие адаптивности регулирования транспортных потоков в условиях динамичности и слабой предсказуемости современных городов. Таким образом, в качестве решений выявленной проблемы предлагается к рассмотрению модернизация систем дорожно-транспортного регулирования, путем согласования работы светофоров на последовательных участках пересечения проезжих частей. Так как, количество участников дорожного движения на перекрестке является слабо прогнозируемой величиной, зависящей от времени суток, погодных условий, дней недели и т.п., многие исследователи рассматривают решения данной проблемы с точки зрения применения нечетких системных подходов.

1. Литературный обзор. За первое десятилетие двадцать первого века учеными представлено множество научных работ, посвященных разработке стохастических и детерминированных моделей, лежащих в основе систем, позволяющих осуществлять регулирование дорожных потоков при помощи развернутой системы светофоров. Разработка подобного рода систем осуществлялась с целью ликвидации ряда существующих на тот момент проблем, выявленных в транспортных и инженерных областях. Таким образом, в данной части представленной работы приведен хронологический обзорный анализ научных работ, посвященных разработке и применению различных комплексных и индивидуальных решений, основная задача которых заключается в регулировании процессов дорожно-транспортного движения, основываясь на методах и подходах теории нечетких множеств и графов.

В начале двадцать первого века большинство работ, посвященных проектированию и разработке систем регулирования транспортных потоков, основывалось на внедрении специализированных контроллеров [3], позволяющих оценивать обстановку на дорожном полотне в режиме реального времени. Например, одним из первых ученых-исследователей, предложивших решение проблемы регулирования транспортных потоков при помощи каскада контроллеров, является А. Хеги совместно с группой других ученых. Работа А. Хеги [4] представленная в 2001 году являлась результатом многолетних исследований, проводимых в области модернизации и оптимизации процессов транспортного регулирования. Результатом подобных исследований выступила новая модель системы поддержки и принятия решений, призванная упростить и оптимизировать процессы протекающие в командных центрах управления дорожным трафиком в городах.

В конце 10-х годов 21 века, впервые предприняты попытки модернизации систем обеспечения функционирования светофоров, где в качестве основного подхода не применяется каскад контроллеров, установленных на различных участках проезжих частей. Стоит отметить: на данный момент большинство современных решений основывается на реализации комплексного подхода, включающего реализацию моделей анализа геоданных, применение множества датчиков, а также применением существующих или реализацией собственных интеллектуальной систем управления светофорных объектов [5–7].

Современные научно-исследовательские работы, посвященные решению представленной проблемы, в большей степени публикуются и реализовываются в иностранных государствах Европы или Северной Америки, однако на территории Российской Федерации также существуют некоторые успешные коммерческие проекты. Так, единственным успешным коммерческим решением, позволяющим решать проблему регулирования транспортных потоков, является отечественная система «Vissim2022» [8] компании PTV Partner. Данная система функционирует, основываясь на количестве проезжающих через виртуально наложенную линию участников дорожного движения, тем самым адаптируя светофорный объект к динамически изменяемому трафику, однако, существенным недостатком данного решения является отсутствие систем контроля направлений убывания и прибывания автомобилей, а также отсутствие адаптивного регулирования светофорных объектов в зависимости от интенсивности и максимально допустимого уровня пропускной способности дорожного полотна.

В работе [9] проводится обзорный анализ методов алгоритмизации регулирования светофоров при помощи моделей нечеткой логики. В последствии, автором представляется разработка соответствующей имитационной модели для дальнейшего определения уровня эффективности применения моделей нечеткого регулирования в сравнении с обычным функционированием светофором (фиксированное время фаз).

В работе [10] решение рассматриваемой проблемы основывается на применении технологии геоинформационных систем, гибридизированных с топологическими моделями. Применение подобного подхода позволяет осуществлять детальный и как следствие эффективный анализ дорожно-транспортной ситуации не только на некотором заданном участке, но и на более обширных участках дорожного пространства. Основная идея данного подхода заключается следующем: на основании расположения светофорных объектов осуществляется построение первичного графа, позволяющего оценить взаимосвязи между вершинами, и как следствие сформировать общее представление о дорожно-транспортной ситуации на определенной местности.

В работе [11] рассматривается пример использования методов нечетких графов, характерные особенности которых позволяют учесть специфические параметры, связанные с текущей обстановкой на проезжих частях. Как следствие, основываясь на анализе полученных данных, это позволяет корректировать тот или иной светофорный объект. Однако, невзирая на преимущества рассмотренной научной публикации, данная работа не содержит в себе сравнительный анализ классических и иных решений, и как следствие не позволяет полноценно оценить уровень эффективности подобных решений.

2. Темпоральные нечеткие графы. Основываясь на представленном кратком анализе литературных источников, стоит отметить, что некоторые исследователи представляли решение выявленной проблемы основываясь на методах нечетких графов, иные ученые предлагали решения, в основе которых заложены подходы нечеткой логики. Однако в 2020 году, многие исследователи в своих работах объединили нечеткие графы и нечеткую логику с целью получения нечеткого планирования фаз и динамического цикла таймингов для регулирования транспортных потоков на перекрестке.

Впрочем, данные исследования не учитывают тот факт, что некоторые вариативные параметры, получаемые в ходе анализа дорожно-транспортного движения, являются периодическими и способны повторяться в зависимости от тех или иных условий. Таким образом, возможность применения периодических нечетких графов является обоснованной и нуждающейся в проверке гипотезой.

Зачастую теория графов применяется с целью представления отношений между элементами, обладающими сложной структурой и различной природой, при этом, отношения между элементами являются постоянными и не меняются во времени. Подобного рода графы называются «статическими» (рис. 1).

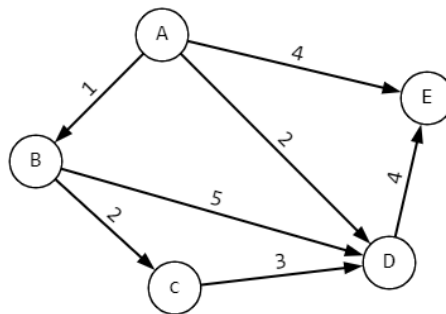


Рис. 1. Пример «статического» графа отношения объектов

Статистический граф представляется совокупным множеством вершин и ребер, соединяющих указанные вершины, при этом, каждое ребро включает в себя весовой коэффициент, соответствующий типу отношений между вершинами, соединенных данным ребром. Однако, возможны ситуации, в которых отношения между элементами не только изменяются во времени, а являются циклическими, в таком случае, «статические» графы неприменимы для описания и моделирования [12].

Периодические нечеткие графы – графы, нечеткость которых изменяется в дискретное время, при этом, дискретное время обладает свойством цикличности [13]. Применение периодических временных моделей нечетких графов позволяет тождественно отражать типы неопределенностей, специфику взаимосвязей между моделируемыми объектами, возможные оптимизационные ограничения, а также решать задачи транспортировки потоков циклического типа, сетевого планирования и управления.

Периодическое расписание применимо для решения задач оптимизации транспортных потоков несколькими способами, выявления узких мест и зон перегруженности, с целью принятия целенаправленных мер, вычисления оптимальной синхронизации моделируемых объектов [14]. Кроме того, периодическое расписание применимо для моделирования и прогнозирования моделей транспортных потоков, что позволяет повысить эффективность планирования новых архитектурных проектов и как следствие улучшить транспортную инфраструктуру [15].

В настоящее время реализацией данного подхода является применение периодических временных графов, в которых связи между вершинами графов циклически изменяемы с течением времени. Такие графы обладают широкими перспективами для использования, однако невзирая на столь высокий уровень актуальности, разработка моделей для представления и использования периодических временных графов, учитывающих пространственные взаимосвязи между объектами, по нынешний день остается значимой и нуждающейся в реализации задачей [16].

Например, рассматривая темпоральные нечеткие графы, представленные на рисунке 2, можно констатировать, что темпоральный граф определяется следующими тремя параметрами $\tilde{G} = (X, \tilde{U}_t, T)$, где X – множество вершин графа с числом вершин равным $|X| = n$; T – множество натуральных чисел, определяющих дискретное время и равное: $T = \{1, 2, \dots, N\}$; $\tilde{U}_t = \{ \langle \mu_t(x_i, x_j) / (x_i, x_j) \rangle \}$ – нечеткое множество вершин, где $(x_i, x_j) \in X$, $\mu_t(x_i, x_j) \in [0, 1]$ является значением функции принадлежности μ_t для ребер (x_i, x_j) во время $t \in T$. Более того, в разные моменты времени для одного и того же ребра (x_i, x_j) , значения функции принадлежности, как правило, различны.

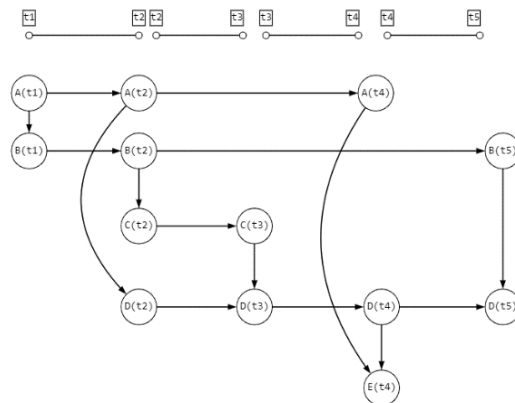


Рис. 2. Пример «темпорального» графа отношений

Так же, необходимо рассмотреть развернутый во времени вариант графа для периода равного p интервалам времени $G_p = (X_p, A_p)$, где множество вершин X_p определяется в соответствии с уравнением (1):

$$X_p = \{x_i: x \in X, i = 1, 0, \dots, p\}, \quad (1)$$

при этом множество дуг A_p , определяется в соответствии с уравнением (2):

$$A_p = \{(x_j): (x) \in A, j = 1, 0, \dots, p - z(x_i, x_j), j = i + z(x_i, x_j)\}, \quad (2)$$

где $z(x_i, x_j)$ – время прохождения потока по дуге $(x_i, x_j) \in A$.

Здесь множество вершин X_p формируется исходя из множества X , где каждая вершина дублируется p раз для всякого момента времени в рассматриваемом периоде [17]. Представим граф $G = (X, A)$, описывающий транспортную сеть, следующим образом (рис. 3).

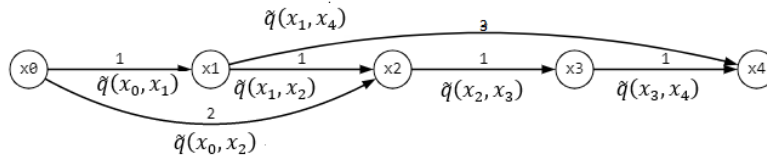


Рис. 3. Граф, описывающий транспортную сеть

Тогда, каждой дуге (x_i, x_j) приписаны два параметра: пропускная способность дуги (расположена над дугой), представленная в виде нечеткого числа, а также количество моментов времени, необходимых для прохождения потока по данной дуге (расположены под дугой). Предполагается, что пропускные способности для каждой дуги равны во всех моментах времени [14]. В графе, представленном на рисунке 3 пропускные способности представляют собой интервалы, определяемые формулами 3–5:

$$\tilde{q}(x_0, x_1) = [q_1(x_0, x_1); q_r(x_0, x_1)], \tilde{q}(x_1, x_2) = [q_1(x_1, x_2); q_r(x_1, x_2)], \quad (3)$$

$$\tilde{q}(x_2, x_3) = [q_1(x_2, x_3); q_r(x_2, x_3)], \tilde{q}(x_3, x_4) = [q_1(x_3, x_4); q_r(x_3, x_4)], \quad (4)$$

$$\tilde{q}(x_0, x_2) = [q_1(x_0, x_2); q_r(x_0, x_2)], \tilde{q}(x_1, x_4) = [q_1(x_1, x_4); q_r(x_1, x_4)]. \quad (5)$$

Таким образом, для графа, представленного на рисунке 3, развернутый во времени граф G_p будет обладать иной структурой, продемонстрированной на рис. 4. Данная структура формируется исходя из исходного графа (см. рис. 3) развернутого во времени для периода в p интервалов, где $p = 6$.

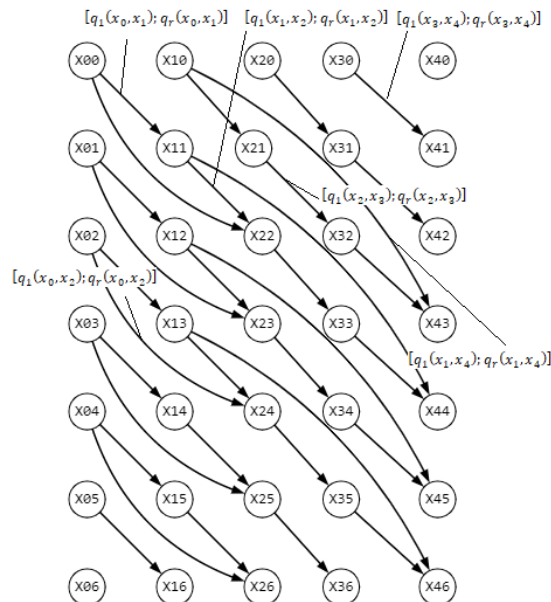


Рис. 4. Развернутый во времени вариант исходного графа для периода в 6 интервалов времени

В таком случае, в графе G_p вершины x_i и x_j соединяются дугой (x_i, x_j) , при условии, что в исходном графе $G = (X, A)$, поток способен преодолеть расстояние из вершины x_i в вершину x_j за время равное $(j - i)$. Например, единица потока, выходящая из вершины x_i в момент времени 3 и затрачивающая при прохождении по дуге (x_i, x_j) 7 единичных интервалов времени, способна представляться в графе G_p единицей потока, проходящей по дуге (x_3, x_{10}) . При этом пропускные способности дуг в развернутом во времени графе, (см. рис. 4), задаются в соответствии с уравнениями 6-11:

$$\tilde{q}(x_{0i}, x_{1i+1}) = [q_1(x_{0i}, x_{1i+1}); q_r(x_{0i}, x_{1i+1})] = [q_1(x_0, x_1); q_r(x_0, x_1)], \quad (6)$$

$$\forall i = 0, \dots, p - 1;$$

$$\tilde{q}(x_{1i}, x_{2i+1}) = [q_1(x_{1i}, x_{2i+1}); q_r(x_{1i}, x_{2i+1})] = [q_1(x_1, x_2); q_r(x_1, x_2)], \quad (7)$$

$$\forall i = 0, \dots, p - 1;$$

$$\tilde{q}(x_{2i}, x_{3i+1}) = [q_1(x_{2i}, x_{3i+1}); q_r(x_{2i}, x_{3i+1})] = [q_1(x_2, x_3); q_r(x_2, x_3)], \quad (8)$$

$$\forall i = 0, \dots, p - 1;$$

$$\tilde{q}(x_{3i}, x_{4i+1}) = [q_1(x_{3i}, x_{4i+1}); q_r(x_{3i}, x_{4i+1})] = [q_1(x_3, x_4); q_r(x_3, x_4)], \quad (9)$$

$$\forall i = 0, \dots, p - 1;$$

$$\tilde{q}(x_{0i}, x_{2i+1}) = [q_1(x_{0i}, x_{2i+1}); q_r(x_{0i}, x_{2i+1})] = [q_1(x_0, x_2); q_r(x_0, x_2)], \quad (10)$$

$$\forall i = 0, \dots, p - 2;$$

$$\tilde{q}(x_{1i}, x_{4i+1}) = [q_1(x_{1i}, x_{4i+1}); q_r(x_{1i}, x_{4i+1})] = [q_1(x_1, x_4); q_r(x_1, x_4)]. \quad (11)$$

$$\forall i = 0, \dots, p - 3;$$

Так как всякий динамический поток эквивалентен статистическому потоку в развернутом во времени графу G_p , то максимальный динамический поток за p интервалов времени, определяется при помощи алгоритма, подобного алгоритму Форда-Фалкерсона [18], однако, если значение p велики, то размерность графа G_p существенно возрастает, следовательно, пропорционально возрастет и количество вычислений, необходимых для определения максимального потока в графе [19, 20].

3. Периодические нечеткие графы. Периодичность – циклическая повторяемость какого-либо явления в заданные интервалы времени. Наиболее характерными явлениями периодичности выступают: фазы Луны, сменяемость дня и ночи и т. п. Свет, звук, тепло, радиоволны, переменный электрический ток также представляют колебательные, периодические процессы.

В рамках рассматриваемой области: транспортных потоков и сетей, учеными представлено множество вариантов представления и определения графов, обладающих различными показателями пропускной способности. Зачастую стандартные графы транспортных сетей выглядят следующим образом (рис. 5).

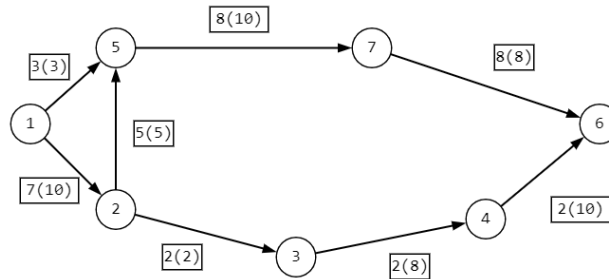


Рис. 5. Пример графа потоков и живучести в транспортных сетях

В рамках определения периодических графов, стоит отметить их отличительные характеристики в сравнении с классическими графами, а именно: инициализация пропускной способности, совместно с заданием времени повторения (тактами), а также возможностью определения количества задержек на той или иной вершине. Подобные возможности позволяют классифицировать данные графы в качестве темпоральных. Пример данного графа представлен на рис. 6.

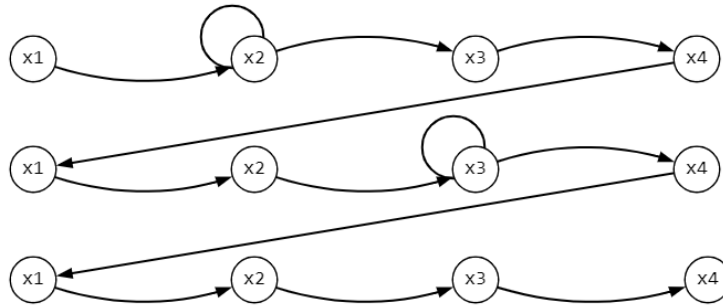


Рис. 6. Пример периодического нечеткого графа

Исходя из особенностей рассмотренных графов, стоит отметить возможность повтора итераций бесконечное множество раз, в случае отсутствия заданного ограничения. Следовательно, во избежание возникновения подобной ситуации, задаются следующие ограничения во времени (тактах): $t = 6$. Данное ограничение предполагает окончание прохождения через $t = 6$, соответственно, при достижении данного значения, необходимо сформировать максимально возможное количество выходных значений равных U . Данный периодический темпоральный граф с прохождением тактов с задержкой в вершине, представляется следующим образом: пусть в графе G вершины x_i и x_j соединяются дугой (x_i, x_j) , при условии, что в исходном графе $G = (X, A)$, пропускная способность x_i в вершину x_j за время равное $t = 1$, равна q . Например, пропускная способность вершины x_i по дуге (x_i, x_j) в момент времени 1 обладает значением, равным 3, способна представляться в графе G единицей потока, проходящей по дуге (x_1, x_2) .

При этом мы видим, что в вершине x_2 у нас идет задержка и мы ждем следующего периода, чтобы из этой вершины пойти дальше. При этом пропускные способности дуг в развернутом во времени графе с учетом задержек, задаются в соответствии с уравнениями (12)-(14):

$$\tilde{q}(x_{0i}, x_{1i+1}) = [q_1(x_{0i}, x_{1i+1}); q_r(x_{0i}, x_{1i+1})] = [q_1(x_0, x_1); q_r(x_0, x_1)], \quad (12)$$

$$\forall i = 0, \dots, p - 1;$$

$$\tilde{q}(x_{1i}, x_{2i+1}) = [q_1(x_{1i}, x_{2i+1}); q_r(x_{1i}, x_{2i+1})] = [q_1(x_1, x_2); q_r(x_1, x_2)],$$

$$\forall i = 0, \dots, p - 1;$$

$$\tilde{q}(x_{1i}, x_{2i+1}) = \begin{cases} U_i + U_{i+1}, & \text{если } \tilde{q}(x_{1i}, x_{2i+1}) > \max \tilde{q} \\ U_i, & \text{если } \tilde{q}(x_{1i}, x_{2i+1}) \leq \max \tilde{q} \end{cases}, \quad (13)$$

$$t + 1$$

$$\tilde{q}(x_{2i}, x_{3i+1}) = [q_1(x_{2i}, x_{3i+1}); q_r(x_{2i}, x_{3i+1})] = [q_1(x_2, x_3); q_r(x_2, x_3)], \quad (14)$$

$$\forall i = 0, \dots, p - 1;$$

Исходя из формулы (13) стоит внести пояснения: в случае если пропускная способность вершины 2 больше максимальной пропускной способности, осуществляется задержка, с последующим аккумулярованием выходных значений и с переходом на новую итерацию цикла. В случае, если пропускная способность вершины окажется меньше или равной максимальному значению, итерация цикла продолжается.

4. Применение. Рассматриваемая технология является совершенно новой и не обладает какими-либо разработками в данном направлении, в связи с чем, определить эффективность представленного подхода, применительно к решению существующих прикладных задач достаточно проблематично. В настоящее время осуществляется сбор информации, необходимой для проектирования представленной технологии, на примере города Таганрог, Ростовской области. В частности, проводится аккумулярование данных четырех последовательных участков пересечения дорог по улице Александровская. Вышеперечисленные участки дороги представлены на рис. 7.

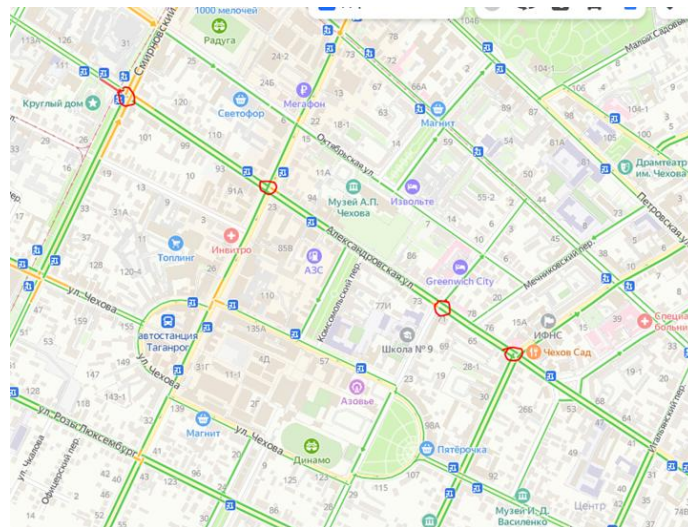


Рис. 7. Пример периодического темпорального графа

Данные полученные при помощи сбора информации позволяют сформировать следующие основные блоки вариативных параметров: геометрию дороги, объемы дорожного трафика, время отображения зеленого сигнала, а также периоды цикла работы светофорных объектов. Геометрия дороги и объем дорожного движения являются входными данными для предлагаемых алгоритмов, в то время как иные параметры предназначены для проведения сравнительного анализа.

Процесс сбора информации осуществляется за счет специализированного оборудования: цифровой камеры и камеры замкнутого телевидения (ССТV). При этом объемы дорожного движения планируется подсчитывать при помощи анализа видеозаписей с последующей ручной классификацией транспортных средств. С целью формирования наиболее объективной информационной базы фиксация дорожного потока осуществляется в наиболее загруженные интервалы времени.

Также, в рамках представленной работы под периодичностью понимаются циклы, происходящие на указанных перекрестках (см. рис. 6):

- ♦ Ежедневный цикл – возникает, во время преодоления пути с работы и на работу с понедельника по пятницу.

- ♦ Еженедельный цикл – то, что не поддается изменению каждую неделю, т.е. в данном случае – это утро и день субботы и воскресения, т.к. рядом находится «центральный» рынок.
- ♦ Ежегодный цикл – все праздники, при которых перекрывают главные улицы города, тем самым перегружая другие дороги.

Заключение. Подводя итоги данной работы, стоит отметить следующие основные положения. На данный момент системы регулирования транспортными потоками актуальная и очень важная задача, нуждающаяся в эффективном решении. Существующие системы, разработанные в Российской Федерации, не отвечают сложившимся критериям и нуждаются в значительной доработке. Анализ литературных источников продемонстрировал актуальность применения методов и подходов основанных на теории нечетких множеств, что в свою очередь свидетельствует об актуальности ведения исследований в данном направлении. В качестве основного подхода для решения поставленной задачи, предлагается использование периодических темпоральных нечетких графов. Данная технология является совершенно новой и на данный момент не обладает какими-либо программными или алгоритмическими реализациями в рассматриваемой области исследования. Информация, представленная в данной работе, носит теоретический характер, позволяя определить целостное представление о характерных особенностях периодических темпоральных нечетких графах, а также сформировать основной теоретический базис, необходимый для дальнейших исследований в данной области.

Подтверждения. Исследование было профинансировано Российским научным фондом, проект № 23-21-00206, <https://rscf.ru/en/project/23-21-00206> / реализовано Южным федеральным университетом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Говердовская Л.Г., Павлов Д.С. Умный светофор // Тенденции развития науки и образования. – 2021. – № 73-2. – С. 91-94.
2. Кадыров А.С., Токашева Н.С. Анализ и предложения по проблеме устранения автомобильных пробок (дорожных заторов) // Международный научно-исследовательский журнал. – 2014. – No. 22. – Р. 69-72.
3. Chien C.C., Zhang Y., Lai M. Regulation layer controller design for automated highway systems // Mathematical and Computer Modelling. – 1995. – Vol. 22, No. 4-7. – Р. 305-327.
4. Hegyi A., Schutter B.D., Hoogendoorn S., Babuska R., Zuylen H., Schuurman H. A fuzzy decision support system for traffic control centers // Proceedings of the 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC'01). Oakland, 2001. – Р. 358-363.
5. Alhamwi, A., Medjroubi, W., Medjroubi, T., Agert, C. GIS-based urban energy systems models and tools: Introducing a model for the optimisation of flexibilisation technologies in urban areas // Appl. Energy. – 2017. – 191. – Р. 1-9.
6. Belyakov, S., Bozhenyuk, A., Samoylov, L., Nikashina, P. Geoinformation Model for Smart Grid Sustainability Management // Intelligent and Fuzzy Systems. INFUS 2023. Lecture Notes in Networks and Systems. – 2023. – Vol. 759. – Р. 651-658.
7. Umare, P.R.; Jayswal, S.G.; Tambakhe, S.R.; Upadhye, P.D.; Gulhane, N.D. Smart Solution for Traffic Control // In Proceedings of the 2019 IEEE 4th International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS). – 2019. – Р. 721-724.
8. Kutlimuratov K., Khakimov S., Mukhitdinov A., Samatov R. Modelling traffic flow emissions at signalized intersection with PTV vissim // Международная научная конференция «Строительная механика, гидравлика и гидротехника». – 2021. – С. 12.
9. Kartikasari R. Optimization of Traffic Light Control Using Fuzzy Logic Sugeno Method // International Journal of Global Operations Research. – 2020. – Р. 51-61.
10. Цветкова В.Ю. Корреляционный анализ и оппозиционные переменные // Европейский журнал естественной истории. – 2014. – С. 56-58.

11. Bershtein L.S., Belyakov S.L., Bozhenyuk A.V., Rozenberg I.N. Routing in the conditions of uncertainty with the use of fuzzy temporal graphs // *Life Sci Journal*. – 2014. – No. 11 (7). – P. 182-186.
12. Gorbachev S., Bozhenyuk A., Nikashina P. Optimization of Traffic Flow Based on Periodic Fuzzy Graphs // S. Bhattacharyya et al. (Eds.): *Intelligent Human Centered Computing, Human 2023, Springer Tracts in Human-Centered Computing (STHC)*. – 2023. – P. 374-383. – https://doi.org/10.1007/978-981-99-3478-2_32.
13. Афанасьева Т.В., Наместников А.М., Перфильева И.Г., Романов А.А., Ярушкина Н.Г. Прогнозирование временных рядов: нечеткие модели. – Ульяновск. 2014. – 145 с.
14. Bozhenyuk A.V., Kosenko O., Knyazeva M., Dolgiy A. The Comparative Approach to Solving Temporal-Constrained Scheduling Problem Under Uncertainty // *Lecture Notes in Computer Science*. – 2021. – P. 173-183.
15. Knyazeva M., Bozhenyuk A., Kaymak U. Managing temporal uncertainty in multi-mode Z-number fuzzy graph structures // In: *Proceedings of the 11th Conference of the European Society for Fuzzy Logic and Technology, EUSFLAT 2019*. – 2020. – P. 580-587.
16. Bozhenyuk A., Belyakov S., Gerasimenko E., Savelyeva M. Fuzzy optimal allocation of service centers for sustainable transportation networks service // *Intelligent Systems Reference Library*. – 2017. – Vol. 113. – P. 415-437.
17. Çakır E., Ulukan Z., Acarman T. Shortest Fuzzy Hamiltonian Cycle on Transportation Network Using Minimum Vertex Degree and Time-dependent Dijkstra's Algorithm // In: *Proceedings of the 16th IFAC Symposium on Control in Transportation Systems, IFAC-PapersOnLine, Lille, France*. – 2021. – Vol. 54 (2). – P. 348-353.
18. Cormen T.H., Leiserson C.E., Rivest R.L., Stein C. introduction to algorithms. – 2nd ed. – London: MIT Press, 2011. – 1296 p.
19. Bozhenyuk A., Gerasimenko E., Kacprzyk J., Rozenberg I. Flows in Networks Under Fuzzy Conditions // *Studies in Fuzziness and Soft Computing*. – Springer International Publishing, 2017. – 168 p.
20. Гуреев П.М., Гришин В.Н. Циклы: от истоков до наших дней // *Вестник ГУУ*. – 2014. – С. 99-106.

REFERENCES

1. Goverdovskaya L.G., Pavlov D.S. Umnyy svetofor [Smart traffic light], *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya* [Trends in the development of science and education], 2021, No. 73-2, pp. 91-94.
2. Kadyrov A.S., Tokasheva N.S. Analiz i predlozheniya po probleme ustraneniya avtomobil'nykh probok (dorozhnykh zatorov) [Analysis and proposals on the problem of eliminating traffic jams (traffic congestion)], *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Research Journal], 2014, No. 22, pp. 69-72.
3. Chien C.C., Zhang Y., Lai M. Regulation layer controller design for automated highway systems, *Mathematical and Computer Modelling*, 1995, Vol. 22, No. 4-7, pp. 305-327.
4. Hegyi A., Schutter B.D., Hoogendoorn S., Babuska R., Zuylen H., Schuurman H. A fuzzy decision support system for traffic control centers, *Proceedings of the 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC'01)*. Oakland, 2001, pp. 358-363.
5. Alhamwi A., Medjroubi W., Medjroubi T., Agert C. GIS-based urban energy systems models and tools: Introducing a model for the optimisation of flexibilisation technologies in urban areas, *Appl. Energy*, 2017, 191, pp. 1-9.
6. Belyakov S., Bozhenyuk A., Samoylov L., Nikashina P. Geoinformation Model for Smart Grid Sustainability Management, *Intelligent and Fuzzy Systems. INFUS 2023. Lecture Notes in Networks and Systems*, 2023, Vol. 759, pp. 651-658.
7. Umare P.R., Jayswal S.G., Tambakhe S.R., Upadhye P.D., Gulhane N.D. Smart Solution for Traffic Control, In *Proceedings of the 2019 IEEE 4th International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS)*, 2019, pp. 721-724.
8. Kutlimuratov K., Khakimov S., Mukhitdinov A., Samatov R. Modelling traffic flow emissions at signalized intersection with PTV vissim, *Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya «Stroitel'naya mekhanika, gidravlika i gidrotekhnika»* [International scientific conference "Building mechanics, hydraulics and hydraulic engineering"], 2021, pp. 12.

9. Kartikasari R. Optimization of Traffic Light Control Using Fuzzy Logic Sugeno Method, *International Journal of Global Operations Research*, 2020, pp. 51-61.
10. Tsvetkova V.Yu. Korrelyatsionnyy analiz i oppozitsionnye peremennye [Correlation analysis and opposition variables], *Evropeyskiy zhurnal estestvennoy istorii* [European Journal of Natural History], 2014, pp. 56-58.
11. Bershtein L.S., Belyakov S.L., Bozhenyuk A.V., Rozenberg I.N. Routing in the conditions of uncertainty with the use of fuzzy temporal graphs, *Life Sci Journal*, 2014, No. 11 (7), pp. 182-186.
12. Gorbachev S., Bozhenyuk A., Nikashina P. Optimization of Traffic Flow Based on Periodic Fuzzy Graphs, S. Bhattacharyya et al. (Eds.), *Intelligent Human Centered Computing. Human 2023, Springer Tracts in Human-Centered Computing (STHC)*, 2023, pp 374-383. Available at: https://doi.org/10.1007/978-981-99-3478-2_32.
13. Afanas'eva T.V., Namestnikov A.M., Perfil'eva I.G., Romanov A.A., YArushkina N.G. Prognozirovaniye vremennykh ryadov: nechetkie modeli [Time series forecasting: fuzzy models], Ulyanovsk. 2014, 145 p.
14. Bozhenyuk A.V., Kosenko O., Knyazeva M., Dolgiy A. The Comparative Approach to Solving Temporal-Constrained Scheduling Problem Under Uncertainty, *Lecture Notes in Computer Science*, 2021, pp. 173-183.
15. Knyazeva M., Bozhenyuk A., Kaymak U. Managing temporal uncertainty in multi-mode Z-number fuzzy graph structures, In: *Proceedings of the 11th Conference of the European Society for Fuzzy Logic and Technology, EUSFLAT 2019*, 2020, pp. 580-587.
16. Bozhenyuk A., Belyakov S., Gerasimenko E., Savelyeva M. Fuzzy optimal allocation of service centers for sustainable transportation networks service, *Intelligent Systems Reference Library*, 2017, Vol. 113, pp. 415-437.
17. Çakır E., Ulukan Z., Acarman T. Shortest Fuzzy Hamiltonian Cycle on Transportation Network Using Minimum Vertex Degree and Time-dependent Dijkstra's Algorithm, In: *Proceedings of the 16th IFAC Symposium on Control in Transportation Systems. IFAC-PapersOnLine*. Lille, France, 2021, Vol. 54 (2), pp. 348-353.
18. Cormen T.H., Leiserson C.E., Rivest R.L., Stein C. introduction to algorithms. 2nd ed. London: MIT Press, 2011, 1296 p.
19. Bozhenyuk A., Gerasimenko E., Kacprzyk J., Rozenberg I. Flows in Networks Under Fuzzy Conditions, *Studies in Fuzziness and Soft Computing*. Springer International Publishing, 2017, 168 p.
20. Gureev P.M., Grishin V.N. Tsikly: ot istokov do nashikh dney [Cycles: from the origins to the present day], *Vestnik GUU* [Bulletin of the State University of Management], 2014, pp. 99-106.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Н.Е. Сергеев.

Никашина Полина Олеговна – Южный федеральный университет; e-mail: nikashina@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79381453823; кафедра информационно-аналитических систем безопасности имени профессора Берштейна Л.С.; ассистент.

Боженюк Александр Витальевич – e-mail: avbozhenyuk@sfedu.ru; тел.: +78634371743; кафедра информационно-аналитических систем безопасности имени профессора Берштейна Л.С.; д.т.н.; профессор.

Nikashina Polina Olegovna – Southern Federal University; e-mail: nikashina@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79381453823; the department of information and analytical security systems named after professor Bershtein L.S.; assistant.

Bozhenyuk Alexander Vitalievich – e-mail: avbozhenyuk@sfedu.ru; phone: +78634371743; the department of information and analytical security systems named after professor Bershtein L.S.; dr. of eng. sc.; professor.

Б.К. Лебедев, О.Б. Лебедев, М.А. Ганжур**УПАКОВКА В ПОЛУБЕСКОНЕЧНУЮ ПОЛОСУ НА ОСНОВЕ
ДЕКОМПОЗИЦИИ И ГИБРИДИЗАЦИИ БИОИНСПИРИРОВАННЫХ
МЕТОДОВ**

Объектом исследования является задача прямоугольной упаковки в полубесконечную полосу. Задан набор прямоугольников. Дан один большой объект (называемый полосой), чья ширина D задана, а HP высота – искомое значение переменной. Цель состоит в том, чтобы минимизировать высоту HP полосы, содержащей прямоугольники, помещенные в полосу без их взаимного перекрытия. Для решения задачи упаковки предложен новый гибридный подход на основе декомпозиции общей задачи упаковки и гибридизации биоинспирированных методов, а также новый гибридный подход к декомпозиции общей задачи упаковки. Разработаны новая архитектура и методы решения задачи упаковки, построенные на основе декомпозиции и гибридизации разработанных авторами роевых методов, использующие различные стратегии поиска, функционирующие параллельно-последовательно и реализующие более широкий обзор пространства решений, что позволяет обеспечить более высокую вероятность локализации глобального экстремума за приемлемое время. Разработана методология нового направления поиска решений задач ортогональной упаковки на основе моделей адаптивного поведения биологических систем. Разработан высокоэффективный гибридный биоинспирированный метод решения задач одномерной и прямоугольной упаковки, основанный на декомпозиции задачи на множество подзадач и интеграции методов поисковой оптимизации. Предложены новые механизмы решения задачи упаковки, использующие математические методы, в которых заложены принципы природных механизмов принятия решений. В отличие от канонической парадигмы муравьиного алгоритма агентом на графе поиска решений в качестве решения формируется разбиение множества прямоугольных элементов A на подмножества A_j^k , где A_j^k – подмножество элементов, назначенных агентом в блок. Разработаны поисковые методы для решения задач гильотинного и не гильотинного прямоугольного раскроя. Для проведения объективных экспериментов были использованы известные тестовые задачи, представленные в литературе и Интернет. Получены лучшие результаты по сравнению с тестируемыми методами. Предложенные в работе теоретические положения для решения задач упаковки и раскроя промышленных объектов в условиях единичного производства реализованы в виде методик, алгоритмов и прикладного программного обеспечения. По сравнению с существующими алгоритмами достигнуто улучшение результатов на 3–5%. Временная сложность алгоритма, полученная экспериментальным путем, практически совпадает с теоретическими исследованиями и для рассмотренных тестовых задач составляет $O(n^2)$.

Упаковка в полубесконечную полосу; декомпозиция; одномерная упаковка; роевой интеллект; муравьиная колония; адаптивное поведение; гибридизация; поисковая оптимизация.

B.K. Lebedev, O.B. Lebedev, M.A. Ganzhur**SEMI-INFINITE STRIP PACKAGING BASED ON DECOMPOSITION
AND HYBRIDIZATION OF BIOINSPIRED METHODS**

In this work, the object of study is the problem of rectangular packing in a semi-infinite strip. Given a set of rectangles. Given one large object (called a strip), whose width D is given, and whose height HP is the desired value of the variable. The goal is to minimize the HP height of a strip containing rectangles placed in the strip without overlapping each other. To solve the packaging problem, a new hybrid approach is proposed based on the decomposition of the general packaging problem and hybridization of bioinspired methods, as well as a new hybrid approach to the decomposition of the general packaging problem. New architecture and methods for solving the packing problem have been developed, built on the basis of decomposition and hybridization of swarm methods developed by the authors, using various search strategies, operating in parallel

and sequentially and implementing a wider overview of the solution space, which allows for a higher probability of localizing a global extremum in an acceptable time. A methodology has been developed for a new direction in searching for solutions to orthogonal packing problems based on models of adaptive behavior of biological systems. A highly effective hybrid bioinspired method for solving one-dimensional and rectangular packaging problems has been developed, based on the decomposition of the problem into many subtasks and the integration of search optimization methods. New mechanisms for solving the packaging problem are proposed, using mathematical methods that incorporate the principles of natural decision-making mechanisms. In contrast to the canonical paradigm of the ant algorithm, the agent forms a partition of the set of rectangular elements A into subsets A_{k_i} on the solution search graph as a solution, where A_{k_j} is a subset of elements assigned by the agent to the block. Search methods have been developed for solving problems of guillotine and non-guillotine rectangular cutting. To conduct objective experiments, well-known test tasks presented in the literature and the Internet were used. Better results were obtained compared to the tested methods. The theoretical principles proposed in the work for solving problems of packaging and cutting industrial objects in single production conditions are implemented in the form of methods, algorithms and application software. Compared to existing algorithms, a 3-5% improvement in results was achieved. The time complexity of the algorithm, obtained experimentally, practically coincides with theoretical studies and for the considered test problems is $O(n^2)$.

Semi-infinite strip packing; decomposition; one-dimensional packing; swarm intelligence; ant colony; adaptive behavior; hybridization; search engine optimization.

Введение. Объектом исследования является задача прямоугольной упаковки в полубесконечную полосу (1.5 Dimensional Bin Packing, 1.5 DBP). Задан набор прямоугольников. Дан один большой объект (называемый полосой), чья ширина D задана, а H^p высота – искомое значение переменной. Цель состоит в том, чтобы минимизировать высоту H^p полосы, содержащей прямоугольники, помещенные в полосу без их взаимного перекрытия [1-3].

У 1.5 DBP есть два варианта входных данных: когда набор упаковываемых объектов известен заранее (*offline*-проблема) и когда данные поступают порциями (*online*-проблема) [4, 5].

В данной статье предложен метод для решения задачи *offline*-варианта 1.5 DBP. большой размерности. Этот метод превосходит многие существующие алгоритмы по эффективности и временной производительности и почти всегда позволяет получать оптимальное или близкое к нему решение.

Задачи раскроя и упаковки, ориентированные на единичное производство, относятся к классу NP -трудных задач комбинаторной оптимизации, т.е. для их решения нет методов и алгоритмов, находящих точное решение за полиномиальное время [6-8].

Существующие точные методы решения задач упаковки и раскроя основаны на схеме полного перебора, поэтому они оказываются малоприменимыми для решения задач, встречающихся на практике [9-10]. В связи с NP -трудностью задач раскроя-упаковки одним из актуальных направлений исследований в настоящее время является разработка эффективных приближенных и эвристических методов. Приближенные алгоритмы находят оптимальное решение с определенной точностью, но не гарантируют оптимальной упаковки для любого набора данных [11, 12].

Результатом непрекращающегося поиска наиболее эффективных методов упаковки стало использование бионических методов и алгоритмов [13, 14]. Особенно интенсивно разрабатывается научное направление, объединяющее математические методы, в которых заложены принципы роевого интеллекта (Swarm Intelligence) [15], в которых совокупность простых агентов конструирует стратегию своего поведения без наличия глобального управления [16]. Среди них особенно активно развиваются методы роя частиц, муравьиной и пчелиной колонии [17].

Эффективность биоинспирированного поиска во многом определяется как учетом специфики решаемой задачи, так и использованием новых и модифицированных процедур поиска.

В настоящее время одним из путей, повышения эффективности методов решения задач глобального поиска, является разработка гибридных алгоритмов [6,18]. В гибридных алгоритмах преимущества одного алгоритма могут компенсировать недостатки другого. В работе излагается метод решения задачи одномерной упаковки на основе интеграции модифицированной модели адаптивного поведения муравьиной колонии с конструктивными эвристиками [19]. Предложена композитная архитектура многоагентной системы бионического поиска.

Разработка методов упаковки осуществлена на основе общего концептуального подхода, базирующегося на применении методов искусственного интеллекта, инспирированных природными системами.

Для решения задачи упаковки предложен новый гибридный подход на основе декомпозиции общей задачи и интеграции биоинспирированных методов.

1. Постановка задачи упаковки. Найти: упаковку прямоугольников в полубесконечную полосу с минимальной высотой занимаемой полосы. При этом заданы следующие параметры:

полубесконечная полоса P ;

D – ширина полосы;

H^p – высота занятой части полосы;

$A=\{a_i|i=1,2,...,n\}$ – множество элементов (прямоугольников);

$W=\{w_i|i=1,2,...,n\}$ – вектор ширин прямоугольников;

$H=\{h_i|i=1,2,...,n\}$ – вектор высот прямоугольников.

Вводится прямоугольная система координат XOY , у которой оси OX и OY совпадают соответственно с нижней неограниченной и боковой сторонами полосы. Решение задачи представляется в виде набора координат элементов $\langle X, Y \rangle$, где $X=(x_1, x_2, ..., x_i, ..., x_m)$, $Y=(y_1, y_2, ..., y_i, ..., y_m)$ – векторы координат прямоугольников, (x_i, y_i) – координаты нижнего левого угла прямоугольника соответственно по оси X и Y .

Набор координат элементов $\langle X, Y \rangle$ называется допустимой прямоугольной упаковкой, если выполнены следующие условия:

1. Стороны прямоугольников параллельны граням полосы (условие ортогональности).

2. Прямоугольники не перекрывают друг друга.

3. Прямоугольники не выходят за границы полосы.

При выполнении условий допустимости требуется найти такую упаковку полосы, для которой высота H^p ее занятой части достигает минимума.

Большинство, разработанных к настоящему времени алгоритмов для задачи упаковки в полосу, основанных на эвристических правилах, используют 2 основных подхода: плоские (*plane*); многоуровневые (*level*) [3, 6, 7].

Плоские алгоритмы размещают прямоугольники в пределах полосы строго вплотную друг к другу.

Декодер плоской упаковки «Нижний левый» (*BL*) представлен на рис. 1.

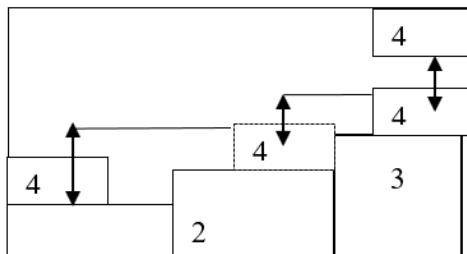


Рис. 1. Декодер плоской упаковки «Нижний левый»

На каждом шаге i : последовательно передвинуть прямоугольник a_i , начиная от верхнего правого угла упакованной площади полосы вниз настолько, насколько это возможно, а затем влево, снова вниз и т.д., до тех пор, пока его можно сдвинуть влево или вниз. Преимущество здесь имеет движение влево.

Основное отличие многоуровневых алгоритмов упаковки заключается в том, что полоса представляется в виде многоуровневой иерархической структуры.

Для решения задачи прямоугольной упаковки в полубесконечную полосу предложен новый гибридный подход на основе декомпозиции общей задачи упаковки и построения поисковой процедуры на основе модифицированного метода муравьиной колонии.

Постулат **декомпозиции** применяется для снижения уровня сложности при решении задачи упаковки путем расчленения системы на подсистемы.

В работе используется следующий подход к упаковке полуограниченной полосы, базирующийся на многоуровневой парадигме. Упаковка полосы осуществляется контейнерами.

На первой стадии формируется множество прямоугольных контейнеров $Q = \{q_k | k = 1, 2, \dots, n_j\}$ с упакованными в них элементами. На второй стадии осуществляется упаковка снизу вверх полуограниченной полосы контейнерами (рис. 2).

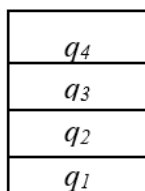


Рис. 2. Упаковка снизу вверх полуограниченной полосы контейнерами

Контейнер q_k представляет собой прямоугольник с шириной, равной ширине полосы – D . Высота контейнера q_k равна $H_k^{q_k}$.

Критерий оптимизации: $F = \sum H_k^{q_k}$, для $\{k | q_k \in Q\}$. Цель оптимизации – минимизация F .

Верхняя и нижняя стороны контейнера обозначаются как «потолок» и «пол» соответственно. Пол и потолок служат основаниями, на которых размещаются элементы. Элементы, расположенные на одной стороне контейнера между краями полосы, образуют блок. На полу контейнера расположен блок элементов «пол», на потолке контейнера – блок «потолок» (рис. 3).

Высота самого высокого прямоугольника в блоке является высотой блока.

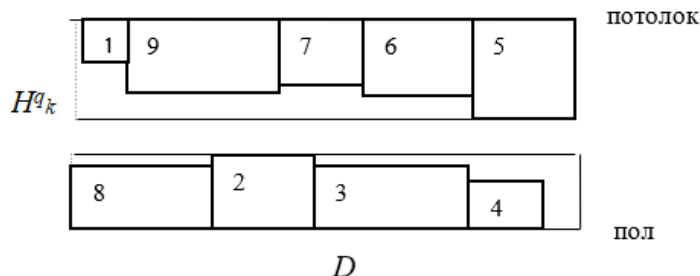


Рис. 3. Пример оснований («пол» и «потолок»), на которых размещаются элементы

Обычно упаковка контейнера элементами выполняется путем последовательного заполнения блоков, начиная с первого. В каждом из которых своя стратегия. Пока есть возможность, элементы пакуются на полу контейнера в блоке «пол» слева направо (рис. 2). Когда вместимость блока «пол» заканчивается, предпринимается попытка упаковки на потолке контейнера в блоке «потолок» справа налево. Если на потолке нет места, то только тогда начинается формирование блоков в новом контейнере.

В работе задача упаковки прямоугольников в полосу решается в три этапа (рис. 4).

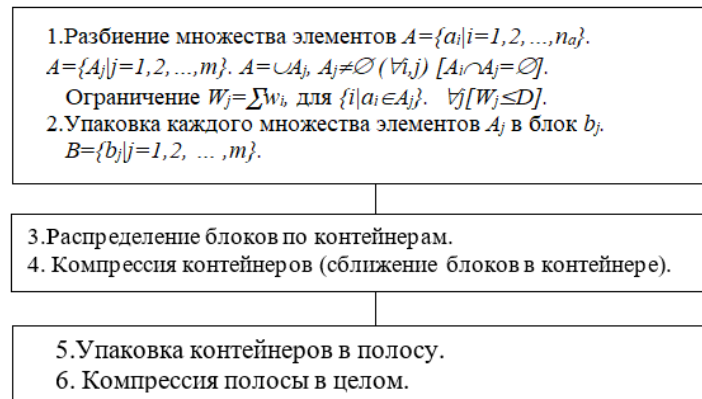


Рис. 4. Процесс решения задачи упаковки прямоугольников в полосу

На первом этапе агентом решается задача упаковки набора элементов прямоугольной формы $A=\{a_i|i=1,2,..., n_a\}$ в множество блоков $B=\{b_j|j=1,2,...,m\}$.

Блоки пронумерованы. Каждый блок b_j включает подмножество A_j элементов, вплотную расположенных на одном уровне (см. рис. 2). $A=\cup A_j$, $A_j \neq \emptyset$ ($\forall i,j$) [$A_i \cap A_j = \emptyset$]. В качестве веса элемента прямоугольной формы a_i $a_i \in A$ служит его ширина w_i .

Определяется суммарный вес W_j подмножества элементов A_j , назначенных в блок b_j .

$$W_j = \sum w_i, \text{ для } \{i|a_i \in A_j\}.$$

Задается максимально допустимый суммарный вес D элементов, назначенных в каждый блок b_j . Вводится ограничение $W_j \leq D$.

Высота h_j^b каждого блока b_j определяется по самому высокому элементу в нем.

На втором этапе блоки помещаются в контейнеры. Блоки с нечетными номерами размещаются на «полу», а блоки с четными номерами размещаются на «потолке» контейнера.

На третьем этапе в каждом контейнере компрессионными алгоритмами блоки и элементы сближаются на минимально допустимое расстояние, исключающее наложение элементов. Возможны три варианта сближения в зависимости от типа разрезов полосы.

Состояние, при котором два прямоугольника соприкасаются друг с другом по вертикали, будем называть конфликтом.

Первый вариант сближения блоков реализуется при использовании гильотинного разреза ленты (рис. 5). В этом случае верхний и нижний блоки контейнера сближаются до их соприкосновения. Пусть h_1^b и h_2^b высоты верхнего и нижнего блоков, входящих в состав контейнера, соответственно. Тогда высота контейнера

q_k определится как $H_k^q = (h_1^b + h_2^b)$. Площадь контейнера q_k определится как $S_k = H_k^q \cdot D$. Пусть $S_9 = \sum s_i$, для $\{i | a_i \in A_j\}$ – суммарная площадь элементов, входящих в состав контейнера q_k , где $s_i = w_i \cdot h_i$ – площадь элемента a_i , A_j – набор элементов, входящих в составе блока b_j , $B = \{b_j | j = 1, 2, \dots, m\}$.

Свободная площадь контейнера q_k определится как $\delta_k = S_k - S_9$.

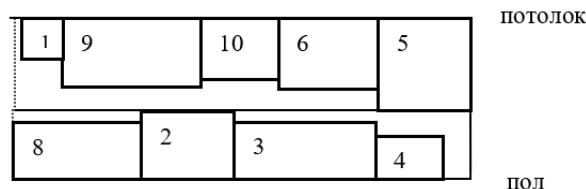


Рис. 5. Сближения блоков при использовании гильотинного разреза ленты

Второй вариант реализуется при использовании гильотинного разреза ленты на контейнеры и не гильотинного разреза контейнеров (методом штамповки). Сближение блоков контейнера выполняется до первого касания элементов по вертикали (рис. 6). Отметим, что положение элементов друг относительно друга по вертикали в обоих блоках зафиксировано. В результате сближения блоков отдельные прямоугольники верхнего уровня будут соприкасаться с прямоугольниками нижнего уровня.

На рис. 6 девятый элемент соприкасается с вторым, а пятый элемент с четвертым.

Высота контейнера $H_k^q = (h_9 + h_2) = (h_5 + h_4)$.

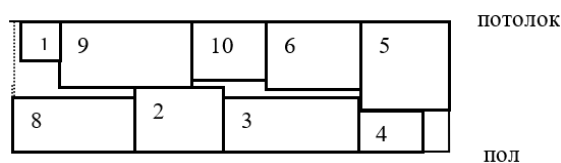


Рис. 6. Использование гильотинного разреза ленты на контейнеры и методом штамповки

При реализации второго варианта сближения блоков в контейнере предварительно прямоугольники, размещенные в блоках, упорядочиваются: в верхнем блоке по возрастанию высоты прямоугольников, а в нижнем блоке по убыванию высоты прямоугольников. Анализ результатов сближения блоков в контейнерах показал, что максимальная плотность упаковки полосы, исключаяющей наложение элементов в процессе сближения блоков, зависит от распределения блоков по контейнерам.

Третий вариант реализуется при использовании не гильотинного разреза всей полосы (методом штамповки). Блоки упорядочены. Рассматривается пара соседних блоков в полосе начиная с самой нижней. Положение элементов по вертикали в нижнем блоке пары зафиксировано. Для каждого прямоугольника, упакованного в верхнем блоке рассматриваемой пары, проверяется, может ли он сместиться вниз, проникая в нижний блок. Если можно сдвинуть его на нижний уровень так, что часть его останется на верхнем, он сдвигается и частично может быть «вжат» в предыдущий уровень.

В результате сближения все прямоугольники верхнего уровня будут соприкасаться с прямоугольниками нижнего уровня (рис. 7).

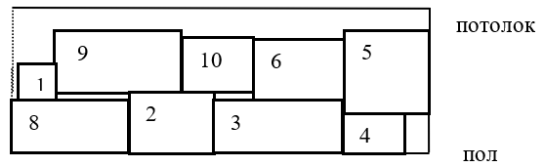


Рис. 7. Результат сближения всех прямоугольников верхнего уровня с прямоугольниками нижнего уровня

Освободившееся таким образом место на потолке верхнего блока может быть использовано элементами, расположенными в последующем блоке полосы (рис. 8). Таким образом, реализуется стратегия плоской упаковки, что позволяет снизить общую высоту полосы и площадь, занимаемую элементами.

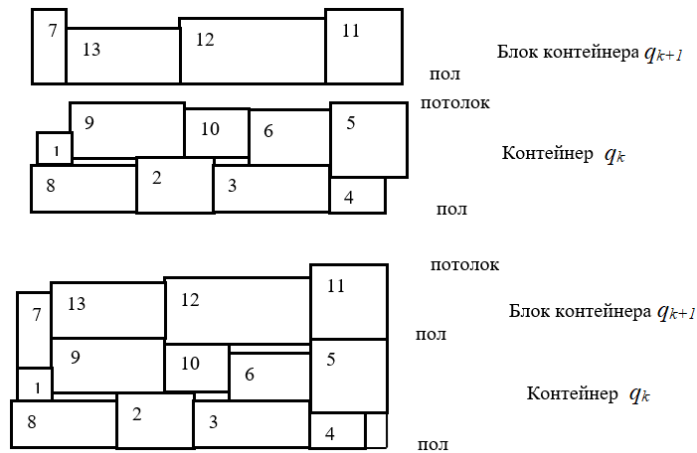


Рис. 8. Освободившееся место на потолке верхнего блока использованное элементами, расположенными в последующем блоке полосы

Анализ результатов третьего варианта сближения блоков в полосе показал, что максимальная плотность упаковки полосы, исключающей наложение элементов в процессе сближения двух блоков к зависит от взаимного расположения по горизонтали прямоугольников в блоках и порядка расположения блоков в полосе снизу вверх.

В связи с этим актуальной является разработка компрессионного алгоритма упорядочивания элементов на верхнем и нижнем блоках контейнера, для максимального сближения элементов двух блоков.

Компрессионные алгоритмы представляют собой процедуры улучшения упаковки. Каждый прямоугольник может располагаться в одной из двух ориентациях. Путем парных перестановок прямоугольников осуществляются дополнительное сближение верхнего и нижнего уровней блока контейнеров. На заключительном этапе производится сжатие по оси OX , и определяется размер заполненной части полосы – H^P .

2. Бионические методы формирования множества прямоугольных контейнеров с упакованными в них элементами. Ядром композитной архитектуры системы прямоугольной упаковки в полубесконечную полосу является подсистема формирования множества прямоугольных контейнеров $Q=\{q_k|k=1,2,...,n_k\}$, включающих блоки с упакованными в них элементами.

Задача формирования множества блоков $B=\{b_j|j=1,2,\dots,m\}$, включающих наборы элементов прямоугольной формы $A=\{a_i|i=1,2,\dots,n\}$, решается алгоритмом одномерной упаковки элементов в одинаковые блоки.

Основу любого алгоритма одномерной упаковки составляют две процедуры: процедура выбора очередного элемента (ПВЭ) и процедура выбора очередного блока (ПВБ) для назначения в него выбранного элемента. В зависимости от способов, лежащих в основе этих процедур, алгоритмы упаковки можно разделить на 4 класса.

1. Порядок выбора элементов и блоков в ПВЭ и ПВБ задается априори.
2. Порядок выбора элементов в ПВЭ задается априори, блоков – в ПВБ на основе эвристики.
3. Порядок выбора элементов в ПВЭ на основе эвристик, блоков в ПВБ – априори.
4. Порядок выбора элементов и блоков в ПВЭ и ПВБ на основе эвристик.

Наименьшей трудоемкостью обладают алгоритмы 1 класса, наибольшей – 4 класса.

Анализ существующих методов и алгоритмов упаковки в блоки [1–11] показал, что в их основе лежит процедура упорядочивания исходного списка элементов, последовательно распределяемых по блокам. Другими словами, в качестве структуры данных, несущих информацию об упаковке, чаще всего используется последовательность номеров прямоугольников, представляющая порядок их укладки, которая называется приоритетным списком. Приоритетный список – это закодированное решение, в терминах генетического алгоритма – «хромосома».

Недостаток этого подхода заключается в том, что для группы элементов, входящих в один блок, их перестановка в списке не изменяет решения, что приводит к ненужным затратам при поиске решения. Пусть имеется некоторое решение задачи упаковки n элементов в m блоков. Пусть n_i – число элементов, уложенных в i -ый блок. Поскольку порядок, в котором элементы множества A_i вошли в i -ый блок не имеет значения, то решению будет соответствовать число списков равное $n_1! \cdot n_2! \cdot \dots \cdot n_i! \cdot \dots \cdot n_m!$. В связи с этим при поиске решения актуальна проблема синтеза и просмотра только одного списка, соответствующего конкретному решению.

Разработаны новые архитектура и методы решения задачи упаковки, построенные на основе декомпозиции и гибридизации разработанных автором роевых методов, использующие различные стратегии поиска, функционирующие параллельно-последовательно и реализующие более широкий обзор пространства решений, что позволяет обеспечить более высокую вероятность локализации глобального экстремума задачи.

Задача одномерной упаковки элементов в одинаковые блоки может быть сформулирована следующим образом. Дано множество прямоугольных элементов $A=\{a_i|i=1,2,\dots,n\}$. Вес элементов задается множеством $W=\{w_i|i=1,2,\dots,n\}$. Обозначим через W_j суммарный вес элементов множества A_j , $W_j=\sum w_i$, для $\{i|a_i \in A_j\}$. Задается максимально допустимый суммарный вес D элементов, множества A_j . Вводится ограничение $\forall j [W_j \leq D]$. Необходимо множество A разбить на минимальное число m непустых и непересекающихся подмножеств A_j . $R=\{A_j|j=1,2,\dots,m\}$. $|R|=m$. $A=\cup A_j$, $A_j \neq \emptyset$, $(\forall i,j) [A_i \cap A_j = \emptyset]$.

В стандартной постановке критерий оптимизации F – минимальное число m подмножеств A_j , таких, что $\cup A_j = A$. $F=m$. Цель оптимизации – минимизация m .

В работе алгоритм одномерной упаковки входит в состав алгоритма прямоугольной упаковки в полубесконечную полосу (1.5 Dimensional Bin Packing, 1.5DBP) с конкретизацией некоторых определений. Множество элементов A_j соответствует множеству элементов a_i , назначенных в блок b_j контейнера при упаковке полубесконечной полосы. Вес прямоугольного элемента a_i равен его ширине w_i .

Все блоки имеют одинаковую ширину D . Высота h_j каждого блока b_j определяется по самому высокому элементу, упакованному в нем. Необходимо множество A разбить на m непустых и непересекающихся подмножеств A_j , таких, чтобы суммарная высота блоков была минимальна. Каждое A_j упаковывается в блок b_j .

Критерий оптимизации $F = \sum h_j$ для $\{j=1, \dots, m\}$. Цель оптимизации – минимизация F .

Для решения задачи одномерной упаковки элементов в блоки применительно к задаче упаковки полубесконечной полосы разработан биоинспирированный алгоритм на основе модифицированной модели адаптивного поведения муравьиной колонии.

Работа муравьиного алгоритмов базируется на использовании коллективной эволюционной памяти (КЭП). КЭП муравьиной колонии представляет собой набор статистических показателей, отражающих для каждого фрагмента решения число ψ показывающее полезность фрагмента при построении решений на предыдущих итерациях алгоритма.

Структура алгоритма одномерной упаковки включает начальную и основную (итерационную) части (рис. 9). Основная часть включает три этапа, выполняемые на одной итерации.

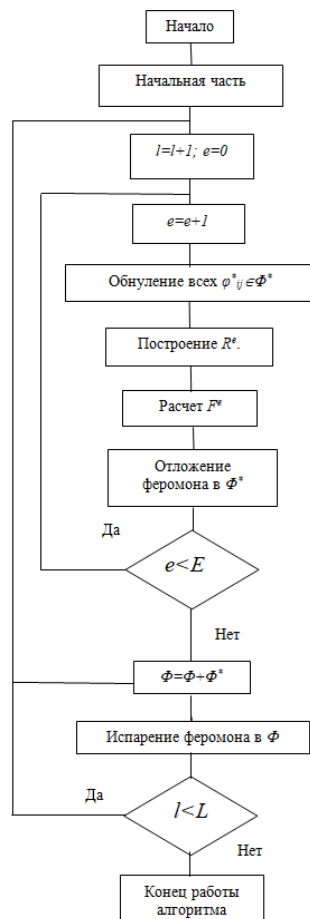


Рис. 9. Структура алгоритма одномерной упаковки включающая начальную и основную части

На начальном этапе алгоритма упаковки:

- ♦ фиксируются входные данные;
- ♦ задаются начальные значения управляющих параметров L – число итераций и K – агентов;
- ♦ формируется полный граф поиска решений $G=(X,U)$. Вершины множества $X=\{x_i|i=1,2,...,n\}$ соответствуют элементам списка $A=\{a_i|i=1,2,...,n\}$. Между вершинами множества X и элементами списка $A=\{a_i|i=1,2,...,n\}$ установлено соответствие $S_1:X \rightarrow A$; $x_i=S_1(a_i)$.

Для отражения коллективной эволюционной памяти в течение жизни популяции агентов и для формирования решения задачи используется полный граф $G=(X,U)$.

В начальной части алгоритма для откладывания феромона формируется множество:

$\Phi=\{\varphi_{ij}|i=1,2,...,n; j=1,2,...,n\}$ феромонных точек, соответствующих ребрам полного графа G . Между Φ и U установлено соответствие $S_2: \Phi \rightarrow U$; $\varphi_{ij}=S_2(u_{ij})$. u_{ij} – ребро, связывающее вершины x_i и x_j .

На всех феромонных точках откладывается одинаковое (начальное) количество феромона Θ/v , где $v=|U|$. Параметр Θ задается априори.

В общем случае поиск решения задачи упаковки осуществляется коллективом муравьев $Z=\{z_e|e=1,2,...,E\}$.

Процесс поиска решений, реализуемый в основной части итерационный. Каждая итерация l включает три этапа. На первом основном этапе каждой итерации каждый агент z_k формирует свое собственное решение R^e . Ядром муравьиного алгоритма является конструктивный алгоритм, с помощью которого агенты на каждой итерации находят решение задачи. В отличие от канонической парадигмы муравьиного алгоритма агентом z_e на графе поиска решений $G=(X,U)$ в качестве решения R^e формируется разбиение множества прямоугольных элементов A на подмножества A_j^e , где A_j^e – подмножество элементов, назначенных агентом z_e в блок b_j^e . $R^e=\{A_j^e|j=1,2,...,n_j\}$.

Для построенного решения R^e рассчитывается целевая функция F^e и откладывается феромон в промежуточное множество феромоновых точек $\Phi^*=\{\varphi_{ij}^*|i=1,2,...,n; j=1,2,...,n\}$.

В работе используется циклический (ant-cycle) метод муравьиных систем. В этом случае феромон, накопленный на всеми агентами популяции, откладывается в феромонных точках Φ после полного формирования решений. Для этих целей используется промежуточное множество $\Phi^*=\{\varphi_{ij}^*|i=1,2,...,n; j=1,2,...,n\}$ феромонных точек, идентичное Φ . $\varphi_{ij}^*=\delta_{ij}^*$, где δ_{ij}^* суммарное количество феромона, отложенного агентами за одну итерацию на φ_{ij}^* .

После построенных агентами множества $Z=\{z_e|e=1,2,...,n_k\}$ множества $R=\{R^e|e=1,2,...,n_e\}$ решений на втором этапе феромон, накопленный в Φ^* откладывается в $\Phi=\{\varphi_{ij}|i=1,2,...,n; j=1,2,...,n\}$, т.е. $\Phi=\Phi+\Phi^*$.

На третьем этапе осуществляется испарение феромона.

На первом этапе итерации каждый агент z_e находит решение в виде совокупности подмножеств $R^e=\{A_1^e, A_2^e, A_3^e, ..., A_m^e\}$, полученных путем разбиения множества элементов $A=\{a_i|i=1,2,...,n\}$ на m непустых и непересекающихся подмножеств. На формируемые подмножества A_j^k накладываются ограничения:

$$\cup A_j^e=A, (\forall i,j)[A_i^e \cap A_j^e=\emptyset], A_j^e \neq \emptyset.$$

Каждое подмножество A_j^e формируется агентом z_k последовательно. Подмножество A_j^e включает элементы, помещаемые в один блок b_j^e . Процесс формирования каждого подмножества элементов A_j^e пошаговый. t – номер шага. Пусть $A_j^e(t)$ – подмножество элементов для размещения в блоке b_j^e , сформированное после выполнения t шагов. На шаге $t=0$ $A_j^e(t)=\emptyset$.

Агенты обладают памятью. На каждом шаге t в памяти агента z_e имеется:

- ♦ номер формируемого блока – j ;
- ♦ количество феромона $\delta_{ij}(t)$ отложенного в каждой феромоновой точке множества $\Phi = \{\varphi_{ij} | i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, n\}$;
- ♦ множество элементов $A_j^e(t)$, уже включенных в формируемое подмножество на шаге t .

В начале каждого шага формируется множество еще не упакованных элементов O_j^e , таких, что если $a_i \in O_j^e$, то элемент a_i , может быть помещен в блок $A_j^e(t)$ без переполнения, т.е. без превышения веса D .

Первый, включаемый на шаге $t=1$ в $A_j^e(t)$ элемент $a_i \in O_j^e$, выбирается случайно.

На каждом последующем шаге t агент z_e применяет вероятностное правило выбора следующего элемента $a_i \in O_j^e$ для включения в $A_j^e(t)$.

Если $O_j^e \neq \emptyset$, то для каждого элемента $a_i \in O_j^e$ определяется соответствующая ему вершина $x_i = S_1(a_i)$ в графе G . Определяется множество вершин $X_i^e = S_1(A_j^e(t))$. Определяется множество ребер $U_i^e \subset U$ полного графа G , связывающих вершину x_i с множеством вершин X_i^e . Определяется множество феромонных точек $\Phi_i^e \subset \Phi$, соответствующих множеству U_i^e . Рассчитывается параметр $f_i^e(t)$ – суммарный уровень феромона на множестве феромонных точек $\Phi_i^e \subset \Phi$.

Вероятность P_i^e включения элемента $a_i \in O_j^e$ в множество $A_j^e(t)$ определяется следующим соотношением:

$$P_{ik} = f_{ik}(t) / \sum_i (f_{ik}(t)), (i | a_i \in O_j^e). \quad (1)$$

Агент z_e с вероятностью P_{ik} выбирает один из элементов $a_i \in O_j^e$, который включается в $A_j^e(t)$. После этого фиксируется размещение элемента a_i в $A_j^e(t)$.

Далее, если O_j^e оказывается пустым, то среди не упакованных элементов выбирается элемент, который помещается в следующий блок A_{j+1}^e .

Описанные действия повторяются при формировании A_{j+1}^e . Процесс завершается тогда, когда $O^e = \emptyset$.

Для построенного агентом z_e решения $R^e = \{A_j^e | j=1, 2, \dots, n_j\}$ рассчитывается значение целевой функции F^e .

Далее на множестве вершин $X_i^e = S_1(A_j^e)$ графа G формируется полный подграф $G_j^e = (X_i^e, U_j^e)$, и определяется множество всех ребер всех подграфов $U^e = \bigcup U_j^e$. Множеству ребер U^e соответствует вспомогательное множество феромонных точек $\Phi_e^* = S_2(U^e)$. $\Phi_e^* \subset \Phi^*$.

Агент z_e откладывает феромон на вспомогательном множестве феромонных точек Φ_e^* .

Количество феромона τ_{ij}^e , откладываемое муравьем z_e в каждой точке $\varphi_{ij}^* \in \Phi_e^*$ определяется следующим образом:

$$\tau_{ij}^e = \Theta / F^e, \quad (2)$$

где Θ – базовая порция феромона. F^e – целевая функция для решения, полученного агентом z_e . Чем меньше F^e , тем больше феромона откладывается каждой точке $\varphi_{ij}^* \in \Phi_e^*$ и, следовательно, тем больше вероятность выбора этих элементов решения R^e при построении решений на следующей итерации.

На втором этапе итерации после того, как каждый муравей построил решение R^e и отложил феромон на соответствующем множестве Φ_e^* феромонных точек φ_{ij}^* , феромон накопленный в феромонных точках множества Φ_e^* добавляется к соответствующим феромонным точкам основного множества Φ .

На третьем заключительном этапе выполняется процедура испарения феромона на всех точках φ_{ij} основного множества Φ , в соответствии с формулой:

$$\tau_{ij} = \rho \tau_{ij}, \quad (3)$$

где τ_{ij} – количество феромона в феромонной точке $\varphi_{ij} \in \Phi$, ρ – коэффициент обновления.

После выполнения всех действий на итерации находится агент с лучшим решением, которое запоминается. Далее осуществляется переход на следующую итерацию.

Временная сложность этого алгоритма зависит от времени жизни колонии l (число итераций), количества вершин графа n и числа муравьев m , и определяется как $O(l \cdot n^2 \cdot m)$.

Алгоритм одномерной упаковки на основе метода муравьиной колонии формулируется следующим образом.

1. На начальном этапе МА упаковки фиксируются входные данные:
 D – ширина полубесконечной полосы P ;
 $A = \{a_i | i = 1, 2, \dots, n\}$ – множество элементов (прямоугольников);
 $W = \{w_i | i = 1, 2, \dots, n\}$ – вектор ширин прямоугольников;
 $H = \{h_i | i = 1, 2, \dots, n\}$ – вектор высот прямоугольников.
 Задаются начальные значения управляющих параметров:
 E – число агентов; L – число итераций.
 2. В соответствии с исходными данными формируется полный граф поиска решений $G = (X, U)$. Установлено соответствие $S_1: X \rightarrow A$; $x_i = S_1(a_i)$.
 3. Формируется Φ множество феромонных точек φ_{ij} , соответствующих ребрам полного графа G . Установлено соответствие $S_2: \Phi \rightarrow U$; $\varphi_{ij} = S_2(u_{ij})$.
 4. Задается значение параметра Θ .
 5. На всех феромонных точках множества $\varphi_{ij} \in \Phi$ откладывается начальное количество феромона Θ .
 6. $l = 1$. (l – номер итерации).
 7. Элементам φ_{ij}^* вспомогательного множества Φ^* феромонных точек присваивается нулевое значение.
 8. $e = 1$. (e – номер агента).
 9. На первом этапе l -й итерации агентом z_k находится соответствующее ему решение задачи упаковки $R^e = \{A_1^e, A_2^e, A_3^e, \dots, A_m^e\}$.
 10. Для решения R^e задачи одномерной упаковки находится значение целевой функции $F^e(l)$.
 11. Для j в пределах от 1 до m формируются подмножества вершин $X_i^e = S_1(A_i^e)$ графа G .
 12. Для j в пределах от 1 до m на базе подмножества вершин X_i^e графа G формируется полный подграф $G_j^e = (X_j^e, U_j^e)$, $X_j^e \subset X$, $U_j^e \subset U$.
 13. Определяется множество всех ребер всех подграфов $U^e = \bigcup U_j^e$. Множеству ребер U^e соответствует вспомогательное множество феромонных точек $\Phi_e^* = S_2(U^e)$. $\Phi_e^* \subset \Phi^*$.
 14. Агент z_e откладывает феромон на феромонных точках множества $\Phi_e^* \subset \Phi^*$.
 15. Если $e < E$, то $e = e + 1$ и переход к пункту 9, иначе переход к пункту 16.
 16. Феромон, накопленный в феромонных точках множества Φ^* , добавляется к соответствующим феромонным точкам основного множества Φ .
 17. Выполняется процедура испарения феромона феромонных точках основного множества Φ .
 18. Если $l < L$, то $l = l + 1$ и переход к пункту 7, иначе переход к пункту 19.
 19. Выбирается лучшее решение, полученное на протяжении всех выполненных итераций.
 20. Конец работы алгоритма.
- 3. Экспериментальные исследования.** Алгоритм упаковки в полубесконечную полосу на основе декомпозиции и гибридизации биоинспирированных методов реализован в виде программы GBP.

Для проведения экспериментальных исследований программы была использована процедура синтеза контрольных примеров с известным оптимумом по аналогии с известным методом AFEKO – Floorplanning Examples with Known Optimal area (20).

Разработанный алгоритм сравнивался с алгоритмами CAGA, PH и DDA.

Алгоритм GAGA, описанный в исследовании [21], сочетает в себе конструктивный метод и генетический метод, поэтому он имеет высокую вычислительную эффективность. Алгоритм исследования PH [22] использует механизмы, инспирированные природой, с высокой вычислительной эффективностью. Алгоритм DDA основан на эвристике динамической декомпозиции.

Для тестирования четырех вышеуказанных алгоритмов используются тестовые задачи SCPL1 ~ SCPL9 из OR-Benchmark. Результаты расчетов представлены в табл. 1, где N – число прямоугольников, H^* оптимальное значение.

Таблица 1

Результаты расчетов

Inst	N	Opt	GAGA	PH	DDA	GBA
		H^*	H	H	H	H
SCPL1	425	110	126.08	183.5	123	121
SCPL2	127	120	140.16	163.5	128	125
SCPL3	225	84	98.84	102	98	90
SCPL4	365	102	108.263	109.5	106	102
SCPL5	165	102	118.89	118	110	102
SCPL6	657	126	142.4	134	132	122
SCPL7	357	198	229.93	242	216	204
SCPL8	475	156	168.419	167	165	164
SCPL9	175	117	129.96	127	125	121

Как видно из табл. 1, результаты алгоритма динамической декомпозиции значительно лучше, чем у трех предыдущих алгоритмов, и некоторые результаты достигли предельной высоты.

Набор данных случайным образом выбран из OR-Benchmark. Элементы имеют ширину 135, длина не ограничена (<http://www.laria.u-picardie.fr/hifi/OR-Benchmark>).

Используя тестовые данные OR-Library, сравниваем разработанный алгоритм с алгоритмами EA и DDA. Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты испытаний

TEST	H^*	Type	n	EA	DDA	GBA
				H	H	H
cgcut1	23	7	16	23	23	23
cgcut2	63	10	23	67	63	63
cgcut3	636	20	62	670	642	640
ngcut1	20	5	10	23	20	20
ngcut2	28	7	17	30	28	28
ngcut3	28	10	21	28	28	28
ngcut4	18	5	7	20	18	18
ngcut5	36	7	14	36	36	36
ngcut6	29	10	15	31	29	29

ngcut7	10	5	8	20	10	10
ngcut8	33	7	13	33	33	33
ngcut9	49	10	18	50	49	49
ngcut10	59	5	13	80	59	59
ngcut11	51	7	15	52	51	51
ngcut12	77	10	22	87	77	77
beng01	30	20	20	30	30	30
beng02	57	40	40	58	57	57
beng03	84	60	60	85	84	84
beng04	107	80	80	108	107	107
beng05	134	100	100	134	134	134
beng06	36	40	40	37	36	36
beng07	67	80	80	67	67	67

Заключение. Разработана методология нового направления поиска решений задач ортогональной упаковки на основе моделей адаптивного поведения биологических систем

Разработан высокоэффективный гибридный биоинспирированный метод решения задач одномерной и прямоугольной упаковки, основанный на декомпозиции задачи на множество подзадач и интеграции методов поисковой оптимизации.

Предложены новые механизмы решения задачи упаковки, использующие математические методы, в которых заложены принципы природных механизмов принятия решений. В отличие от канонической парадигмы муравьиного алгоритма муравьем на графе поиска решений $G=(X,U)$ строится маршрут с разбиением на части и формированием подграфов на вершинах, входящих в каждую часть, на ребрах которых откладывается феромон.

Разработаны поисковые методы для решения задач гильотинного и не гильотинного прямоугольного раскроя.

Разработанные компрессионные алгоритмы формирования карты раскроя на основе биоинспирированного поиска позволяют сократить отходы материала в 2-3 раза.

Для проведения объективных экспериментов были использованы известные тестовые задачи, представленные в литературе и Интернет. Задачи, на которых был протестирован разработанный алгоритм, доступны в библиотеке OR-объектов (<http://www.ms.ic.ac.uk/info.html>). Для составления достоверных выводов был проведен не один, а серия опытов-экспериментов.

Получены лучшие результаты по сравнению с тестируемыми методами.

Предложенные в работе теоретические положения для решения задач упаковки и раскроя промышленных объектов в условиях единичного производства реализованы в виде методик, алгоритмов и прикладного программного обеспечения.

По сравнению с существующими алгоритмами достигнуто улучшение результатов на 3–5 %.

Временная сложность алгоритма, полученная экспериментальным путем, практически совпадает с теоретическими исследованиями и для рассмотренных тестовых задач составляет $O(n^2)$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Stephen C.H. Leung, Defu Zhang. A fast layer-based heuristic for non-guillotine strip packing // Expert System with Application. – 2011. – P. 13032-13042.
2. Тимофеева О.П., Соколова Э.С., Милов К.В. Генетический алгоритм в оптимизации упаковки контейнеров // Тр. НГТУ. Информатика и системы управления. – 2013. – С. 167-172.
3. Валеева А.Ф. Применение конструктивных эвристик в задачах раскроя-упаковки // Приложение к журналу «Информационные технологии». – 2006. – С. 1-24.

4. Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Лебедева Е.М. Модернизированный муравьиный алгоритм синтеза идентифицированного дерева гильотинного разреза при планировании СБИС // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 7. – С. 15-28.
5. Лебедев О.Б., Зорин В.Ю. Упаковка на основе метода муравьиной колонии // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – С. 25-30.
6. Defu Zhang, Yuxin Che, Furong Ye, Yain-Whar Si, Stephen C. A hybrid algorithm based on variable neighbourhood for the strip packing problem // Journal of Combinatorial Optimization. – 2016. – P. 513-530.
7. Ахтямов А.А., Картак В.М. Упаковка и оценка плотности упаковки ортогональных многоугольников в полубесконечную полосу // Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений. – 2014. – С. 117-121.
8. Jaya Thomas, Chaudhari Narendra S. Hybrid approach for 2d strip packing problem using genetic algorithm // Proceedings of the 12th international conference on Artificial Neural Networks: advances in computational intelligence. – 2013. – P. 213-230.
9. Месягутов М.А., Мухачева Э.А., Белов Г.Н., Шайтхауэр Г. Упаковка одномерных контейнеров с продолженным выбором идентичных предметов: точный метод поиска оптимального решения // Автоматика и телемеханика. – 2011. – С. 154-173.
10. Lei Wang, Aihua Yin. A quasi-human algorithm for the two-dimensional rectangular strip packing problem: in memory of Prof. Wenqi Huang // Journal of Combinatorial Optimization. – 2016. – P. 416-444.
11. Потарусов Р.В., Курейчик В.М. Проблема одномерной упаковки элементов // Известия ТРТУ. – 2006. – С. 88-93.
12. Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – 448 с.
13. Лебедев О.Б. Модели адаптивного поведения муравьиной колонии в задачах проектирования. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2013. – 199 с.
14. Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Муравьиные алгоритмы разбиения, использующие представления задачи, отличные от канонического // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2016. – С. 42-47.
15. Blum C., Roli A. Metaheuristics in combinatorial optimization: overview and conceptual comparison // ACM computing surveys. – 2003. – P. 268-308.
16. Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Распределение ресурсов на основе гибридных моделей роевого интеллекта // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2017. – С. 1063-1073.
17. Житников В.П. Задача прямоугольной упаковки в полубесконечную полосу: поиск решения в окрестности локальной нижней границы // Информационные технологии. – 2007. – № 6. – С. 55-61.
18. Raidl G.R. A Unified View on Hybrid Metaheuristics // In: Lecture Notes In Computer Science. – Springer, Verlag, 2006. – P. 1-12.
19. Лебедев Б.К., Лебедев О.Б., Лебедева Е.О. Роевой алгоритм планирования работы многопроцессорных вычислительных систем // Инженерный вестник Дона. – 2017.
20. Cong J., Romesis M., Xie M. Optimality, Scalability and Stability Study of Partitioning and Placement Algorithms // Proc. of the International Symposium on Physical Design. – 2003. – P. 88-94.
21. Hifi M., M'Hallah R. A hybrid algorithm for the two-dimensional layout problem: The cases of regular and irregular shapes // International Transactions in Operational Research. – 2003. – P. 195-216.
22. Zhang DeFu, Han ShuiHua, Ye WeiGuo. A Bricklaying Heuristic Algorithm for the Orthogonal Rectangular Packing Problem // Chinese Journal of Computers. – 2008. – P. 509-515.

REFERENCES

1. Stephen C.H. Leung, Defu Zhang. A fast layer-based heuristic for non-guillotine strip packing, *Expert System with Application*, 2011, pp. 13032-13042.
2. Timofeeva O.P., Sokolova E.S., Milov K.V. Geneticheskiy algoritm v optimizatsii upakovki konteynerov [Genetic algorithm in optimization of container packaging], *Tr. NGTU. Informatika i sistemy upravleniya* [Proceedings of NSTU. Informatics and control systems], 2013, pp. 167-172.

3. Valeeva A.F. Primenenie konstruktivnykh evristik v zadachakh raskroya-upakovki [Application of constructive heuristics in cutting-packing problems], *Prilozhenie k zhurnalu «Informatsionnye tekhnologii»* [Supplement to the journal «Information Technologies»], 2006, pp. 1-24.
4. Lebedev B.K., Lebedev O.B., Lebedeva E.M. Modernizirovannyi murav'inyi algoritim sinteza identifitsirovannogo dereva gil'otinnogo razreza pri planirovanii SBIS [Modernized ant algorithm for synthesizing an identified guillotine cut tree when planning VLSI], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 7, pp. 15-28.
5. Lebedev O.B., Zorin V.Yu. Upakovka na osnove metoda murav'inoi kolonii [Packaging based on the ant colony method], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2010, pp. 25-30.
6. Defu Zhang, Yuxin Che, Furong Ye, Yain-Whar Si, Stephen C. A hybrid algorithm based on variable neighbourhood for the strip packing problem, *Journal of Combinatorial Optimization*, 2016, pp. 513-530.
7. Akhtyamov A.A., Kartak V.M. Upakovka i otsenka plotnosti upakovki ortogonal'nykh mnogougol'nikov v polubeskonechnuyu polosyu [Packing and estimation of the packing density of orthogonal polygons in a semi-infinite strip], *Informatsionnye tekhnologii intellektual'noy podderzhki prinyatiya resheniy* [Information technologies for intelligent decision support], 2014, pp. 117-121.
8. Jaya Thomas, Chaudhari Narendra S. Hybrid approach for 2d strip packing problem using genetic algorithm, *Proceedings of the 12th international conference on Artificial Neural Networks: advances in computational intelligence*, 2013, pp. 213-230.
9. Mesyagutov M.A., Mukhacheva E.A., Belov G.N., Shaytkhauer G. Upakovka odnomernykh konteynerov s prodolzhenym vyborom identichnykh predmetov: tochnyy metod poiska optimal'nogo resheniya [Packing one-dimensional containers with continued selection of identical items: an exact method for finding the optimal solution], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control], 2011, pp. 154-173.
10. Lei Wang, Aihua Yin. A quasi-human algorithm for the two-dimensional rectangular strip packing problem: in memory of Prof. Wenqi Huang, *Journal of Combinatorial Optimization*, 2016, pp. 416-444.
11. Potarusov R.V., Kureychik V.M. Problema odnomernoy upakovki elementov [The problem of one-dimensional packing of elements], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSURE], 2006, pp. 88-93.
12. Karpenko A.P. Sovremennyye algoritmy poiskovoy optimizatsii. Algoritmy, vdokhnovlennyye prirodoy: ucheb. posobie [Modern search engine optimization algorithms. Algorithms inspired by nature: a tutorial]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2016, 448 p.
13. Lebedev O.B. Modeli adaptivnogo povedeniya murav'inoi kolonii v zadachakh proektirovaniya [Models of adaptive behavior of an ant colony in design problems]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2013, 199 p.
14. Lebedev B.K., Lebedev O.B. Murav'inye algoritmy razbieniya, ispol'zuyushchie predstavleniya zadachi, otlichnye ot kanonicheskogo [Ant partitioning algorithms using problem representations other than the canonical one], *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State Transport University], 2016, pp. 42-47.
15. Blum C., Roli A. Metaheuristics in combinatorial optimization: overview and conceptual comparison, *ACM computing surveys*, 2003, pp. 268-308.
16. Lebedev B.K., Lebedev O.B. Raspredelenie resursov na osnove gibridnykh modeley roevogo intelekta [Resource distribution based on hybrid models of swarm intelligence], *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics and optics], 2017, pp. 1063-1073.
17. Zhitnikov V.P. Zadacha pryamougol'noy upakovki v polubeskonechnuyu polosyu: poisk resheniya v okrestnosti lokal'noy nizhney granitsy [The problem of rectangular packing in a semi-infinite strip: searching for a solution in the neighborhood of the local lower boundary], *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technologies], 2007, No. 6, pp. 55-61.
18. Raidl G.R. A Unified View on Hybrid Metaheuristics, In: *Lecture Notes In Computer Science*. Springer, Verlag, 2006, pp. 1-12.
19. Lebedev B.K., Lebedev O.B., Lebedeva E.O. Roevoy algoritim planirovaniya raboty mnogoprotssessornykh vychislitel'nykh sistem [Swarm algorithm for scheduling the operation of multiprocessor computing systems], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2017.

20. *Cong J., Romesis M., Xie M.* Optimality, Scalability and Stability Study of Partitioning and Placement Algorithms, *Proc. of the International Symposium on Physical Design*, 2003, pp. 88-94.
21. *Hifi M., M'Hallah R.* A hybrid algorithm for the two-dimensional layout problem: The cases of regular and irregular shapes, *International Transactions in Operational Research*, 2003, pp. 195-216.
22. *Zhang DeFu, Han ShuiHua, Ye WeiGuo.* A Bricklaying Heuristic Algorithm for the Orthogonal Rectangular Packing Problem, *Chinese Journal of Computers*, 2008, pp. 509-515.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.Г. Коробейников.

Лебедев Борис Константинович – Южный федеральный университет; e-mail: lebedev.b.k@gmail.com; г. Таганрог, Россия; тел.: 89282897933; кафедра систем автоматизированного проектирования; профессор.

Лебедев Олег Борисович – e-mail: lebedev.ob@mail.ru; тел.: 89085135512; доцент.

Ганжур Марина Александровна – Донской государственный технический университет; e-mail: mganzhur@yandex.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; тел.: 89081819111; кафедра вычислительных систем и информационной безопасности; старший преподаватель.

Lebedev Boris Konstantinovich – Southern Federal University; e-mail: lebedev.b.k@gmail.com; Taganrog, Russia; phone: + 79282897933; the department of computer aided design; professor.

Lebedev Oleg Borisovich – e-mail: lebedev.ob@mail.ru; phone: +79085135512; associate professor.

Ganzhur Marina Aleksandrovna – Don State Technical University; e-mail: mganzhur@yandex.ru; Rostov-on-Don, Russia; phone: +79081819111; the department of computing systems and information; senior lecturer.

Раздел II. Анализ данных и моделирование

УДК 517.91: 519.6

DOI 10.18522/2311-3103-2023-4-126-137

С.Г. Буланов

КОМПЬЮТЕРНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ УСТОЙЧИВОСТИ ПО ЛЯПУНОВУ СИСТЕМ НЕЛИНЕЙНЫХ ОБЫКНОВЕННЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

Разрабатывается подход к анализу устойчивости по Ляпунову систем нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений. Подход основан на векторных мультипликативных преобразованиях разностных схем численного интегрирования при ограничениях общего вида. В ходе преобразований величина возмущения решения определяется в виде бесконечного векторного произведения умноженного на возмущение начальных данных. Следовательно, бесконечное векторное произведение определяет характер устойчивости системы. Отсюда следуют критерии устойчивости и асимптотической устойчивости нелинейной системы обыкновенных дифференциальных уравнений в мультипликативной форме. Математическая конструкция критериев влечет возможность их программной реализации, что служит основой компьютеризации анализа устойчивости по Ляпунову. Необходимая в процессе программной реализации замена бесконечного векторного произведения на конечное произведение, сохраняет достоверность анализа устойчивости по предложенным критериям. Далее конструируются разновидности критериев устойчивости в аддитивной и логарифмической форме эквивалентные ранее полученным критериям. При дополнительных ограничениях строятся критерии устойчивости по характеру поведения правой части нелинейной системы ОДУ и ее производных. Представлен программный и численный эксперимент по анализу устойчивости систем нелинейных ОДУ на основе полученных критериев. Эксперимент сводится к оценке величины из левой части критериев. Ее ограниченное изменение соответствует устойчивости, монотонное стремление к нулю характеризует асимптотическую устойчивость, неограниченный рост является признаком неустойчивости. По результатам эксперимента однозначно установлен характер устойчивости исследуемых систем. Предложенный подход дает возможность на практике выполнить анализ устойчивости по Ляпунову нелинейной системы обыкновенных дифференциальных уравнений в режиме реального времени.

Устойчивость по Ляпунову; компьютерный анализ устойчивости; численное моделирование устойчивости.

S.G. Bulanov

A COMPUTER-ORIENTED APPROACH TO THE ANALYSIS OF THE LYAPUNOV STABILITY OF NONLINEAR SYSTEMS OF ORDINARY DIFFERENTIAL EQUATIONS

An approach to the analysis of Lyapunov stability of systems of nonlinear ordinary differential equations is developed. The approach is based on vector multiplicative transformations of numerical integration difference schemes under general constraints. In the course of transformations, the magnitude of the perturbation of the solution is determined as an infinite vector product multiplied by the perturbation of the initial data. Consequently, the infinite vector product determines the nature of the stability of the system. This implies criteria for stability and asymptotic stability of a nonlinear system of ordinary differential equations in multiplicative form.

The mathematical construction of the criteria entails the possibility of their software implementation, which serves as the basis for computerization of the stability analysis according to Lyapunov. The replacement of an infinite vector product by a finite product, which is necessary in the process of software implementation, preserves the reliability of the stability analysis according to the proposed criteria. Further, varieties of stability criteria are constructed in additive and logarithmic form, equivalent to the previously obtained criteria. Under additional restrictions, stability criteria are constructed according to the nature of the behavior of the right side of the nonlinear system of ODEs and its derivatives. A software and numerical experiment is presented to analyze the stability of systems of nonlinear ODEs based on the obtained criteria. The experiment is reduced to estimating the value from the left side of the criteria. Its limited change corresponds to stability, the monotonous tendency to zero characterizes asymptotic stability, and unlimited growth is a sign of instability. According to the results of the experiment, the nature of the stability of the systems under study was unambiguously established. The proposed approach makes it possible in practice to perform a Lyapunov stability analysis of a nonlinear system of ordinary differential equations in real time.

Lyapunov stability; computer stability analysis; numerical modeling of stability.

Введение. Анализ устойчивости по Ляпунову систем обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) необходимо выполнять в различных областях современной науки и техники [1–3]. В частности такая задача возникает при моделировании и анализе устойчивости нелинейных динамических систем с логическими регуляторами. Для ее решения применяют подходы, базирующиеся на развитии метода функций Ляпунова, дивергентного, спектрального-бифуркационного метода, на представлении нелинейных систем с помощью ТС-моделей. Указанные методы позволяют получить конструктивные условия устойчивости и стабилизации некоторых классов управляемых систем [4]. Один из современных подходов к анализу устойчивости связан с предложением ввести понятие ключевая математическая модель. Данный подход позволяет с единой точки зрения рассматривать свойства устойчивости моделей, описываемых обыкновенными дифференциальными уравнениями, дифференциальными уравнениями с запаздыванием, стохастическими дифференциальными уравнениями, дифференциальными включениями, нечеткими дифференциальными уравнениями. На этой основе получены теоремы о взаимосвязи устойчивости решений уравнений различных типов [5].

Традиционно анализ устойчивости систем ОДУ выполняется на основе методов качественной теории [6–8]. Между тем необходимость выполнять анализ устойчивости в режиме реального времени возникает при решении задач сверхоперативного управления, что возможно только средствами вычислительной техники [9, 10]. Это влечет необходимость разработки критериев устойчивости систем нелинейных ОДУ допускающих компьютерную реализацию.

В статье разрабатывается комплекс критериев устойчивости систем нелинейных ОДУ. Первоначально в условиях общего вида конструируются критерии устойчивости на основе преобразования разностных схем численного интегрирования. В дальнейшем требуется получить разновидности критерии устойчивости в аддитивной и логарифмической форме. Кроме того при дополнительных ограничениях необходимо сформулировать критерии устойчивости в зависимости от поведения правой части системы ОДУ и ее производных. Форма конструируемых критериев должна допускать программную реализацию, по результатам которой можно сделать однозначный вывод о характере устойчивости исследуемой системы в режиме реального времени.

Описание метода. Рассматривается задача Коши для нелинейной системы ОДУ

$$\frac{dY}{dt} = F(t, Y), Y(t_0) = Y_0, \quad (1)$$

где функция $F(t, Y)$ определена, непрерывна и непрерывно дифференцируема по t в области $R: \{t_0 \leq t < \infty; \tilde{Y}(t), Y(t): \|\tilde{Y}_0 - Y_0\| \leq \delta, \delta > 0\}$. Предполагается, что для (1) в области R выполнены все условия существования и единственности решения и функция $F(t, Y)$ определена, непрерывна и непрерывно дифференцируема по t , компоненты этой функции удовлетворяют неравенству

$$\begin{aligned} |f_k(t, Y) - f_k(t, \tilde{Y})| &\leq L |y_k - \tilde{y}_k|, \quad L = \text{const}, \quad \forall t \in [t_0, \infty), \quad \forall (t, Y), \\ &\quad (t, \tilde{Y}) \in R, \quad \forall k \in \overline{1, n}. \end{aligned}$$

На произвольном промежутке $[t_0, t]$ решение системы (1) в форме метода Эйлера с остаточным членом на каждом шаге имеет вид:

$$y_{k(i+1)} = y_{ki} + h f_k(t_i, Y_i) + q_{ki} \quad \forall k \in \overline{1, n},$$

где q_{ki} – остаточные члены формулы Тейлора для k -й компоненты решения.

Значение $t \in [t_0, \infty)$ является произвольно фиксированным, при этом индекс i неограниченно растет одновременно с убыванием равномерного шага:

$$t = \text{const}, \quad t = t_{i+1}, \quad h = (t_{i+1} - t_0)/(i+1), \quad i = 0, 1, \dots$$

Точное значение величины возмущения определяется из соотношения

$$\tilde{y}_{k(i+1)} - y_{k(i+1)} = \left(1 + h \frac{f_k(t_i, \tilde{Y}_i) - f_k(t_i, Y_i)}{\tilde{y}_{ki} - y_{ki}} \right) (\tilde{y}_{ki} - y_{ki}) + w_{ki}, \quad \forall k \in \overline{1, n}. \quad (2)$$

Рекуррентное преобразование (2) влечет соотношение

$$\tilde{y}_{k(i+1)} - y_{k(i+1)} = \prod_{\ell=0}^i (1 + h D_{i-\ell}^{(k)}) (\tilde{y}_{k0} - y_{k0}) + L_i^{(k)},$$

где

$$L_i^{(k)} = \sum_{r=1}^i \prod_{\ell=0}^{i-r} (1 + h D_{i-\ell}^{(k)}) w_{k(r-1)} + w_{ki},$$

$$D_i^{(k)} = (f_k(t_i, \tilde{Y}_i) - f_k(t_i, Y_i)) / (\tilde{y}_{ki} - y_{ki}).$$

В рассматриваемых условиях $\lim_{i \rightarrow \infty} L_i^{(k)} = 0, \quad \forall t \in [t_0, \infty), \quad \forall k \in \overline{1, n}$ [11].

Следовательно, для $\forall t \in [t_0, \infty)$ выполняется соотношение

$$\tilde{y}_k(t) - y_k(t) = \lim_{i \rightarrow \infty} \prod_{\ell=0}^i (1 + h D_{i-\ell}^{(k)}) (\tilde{y}_{k0} - y_{k0}) \quad \forall k \in \overline{1, n} \quad (3)$$

смысл которого в том, что для произвольного t величина возмущения равна бесконечному векторному произведению, умноженному на возмущение начальных данных. На этой основе критерии устойчивости и асимптотической устойчивости имеют вид [12, 13]

$$\left| \lim_{i \rightarrow \infty} \prod_{\ell=0}^i (1 + h D_{i-\ell}^{(k)}) \right| \leq \tilde{c}_1, \quad \tilde{c}_1 = \text{const}, \quad \forall t \in [t_0, \infty), \quad \forall k \in \overline{1, n}. \quad (4)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \left| \lim_{i \rightarrow \infty} \prod_{\ell=0}^i (1 + h D_{i-\ell}^{(k)}) \right| = 0 \quad \forall k \in \overline{1, n}. \quad (5)$$

$$\text{Так как для } \forall t \in [t_0, \infty) \text{ согласно (3) } \lim_{i \rightarrow \infty} \prod_{\ell=0}^i (1 + h D_{i-\ell}^{(k)}) = \frac{\tilde{y}_k(t) - y_k(t)}{\tilde{y}_{k0} - y_{k0}}$$

то критерии (4), (5) можно представить в эквивалентной форме

$$\left| \frac{\tilde{y}_k(t) - y_k(t)}{\tilde{y}_{k0} - y_{k0}} \right| \leq \tilde{c}_1, \quad \tilde{c}_1 = \text{const}, \quad \forall t \in [t_0, \infty), \quad \forall k \in \overline{1, n}. \quad (6)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \left| \frac{\tilde{y}_k(t) - y_k(t)}{\tilde{y}_{k0} - y_{k0}} \right| = 0 \quad \forall k \in \overline{1, n}. \quad (7)$$

Форма критериев (4)–(7) влечет возможность компьютерной реализации по ходу приближенного решения системы ОДУ. Для повышения достоверности анализа устойчивости целесообразно использовать методы Рунге-Кутты 4-го, Батчера 6-го, Дормана-Принса 8-го порядка.

Критерии (4)–(7) сводятся к аддитивной и логарифмической форме на основе следующего преобразования под знаком предела в (3)

$$\prod_{\ell=0}^i (1 + h D_{i-\ell}^{(k)}) = e^{\ln \prod_{\ell=0}^i (1 + h D_{i-\ell}^{(k)})} \quad \text{или} \quad \prod_{\ell=0}^i (1 + h D_{i-\ell}^{(k)}) = e^{\sum_{\ell=0}^i \ln(1 + h D_{i-\ell}^{(k)})}. \quad \text{В результате}$$

величина возмущения решения системы (1) определяется из соотношения

$$\tilde{y}_k(t) - y_k(t) = e^{\lim_{i \rightarrow \infty} \sum_{\ell=0}^i \ln(1 + h D_{i-\ell}^{(k)})} (\tilde{y}_{k0} - y_{k0}), \quad \forall k \in \overline{1, n}.$$

Соответственно критерии устойчивости и асимптотической устойчивости преобразуются к аддитивной форме [14, 15]:

$$\lim_{i \rightarrow \infty} \sum_{\ell=0}^i h D_{i-\ell}^{(k)} \leq \tilde{c}_2, \quad \tilde{c}_2 = \text{const}, \quad \forall t \in [t_0, \infty), \quad \forall k \in \overline{1, n}.$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \lim_{i \rightarrow \infty} \sum_{\ell=0}^i h D_{i-\ell}^{(k)} = -\infty.$$

Выражение в левой части аддитивных критериев – предел интегральной суммы, элементами которой являются дискретные функции

$$D^{(k)}(t) = (f_k(t, \tilde{Y}) - f_k(t, Y)) / (\tilde{y}_k(t) - y_k(t)), \quad \forall k \in \overline{1, n}.$$

Следовательно, выражения аддитивных критериев включают определенные интегралы, и критерии можно сформулировать в интегральной форме.

$$\int_{t_0}^t \frac{f_k(t, \tilde{Y}) - f_k(t, Y)}{\tilde{y}_k(t) - y_k(t)} dt \leq \tilde{c}_2, \quad \tilde{c}_2 = \text{const}, \quad \forall t \in [t_0, \infty), \quad \forall k \in \overline{1, n}. \quad (8)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \int_{t_0}^t \frac{f_k(t, \tilde{Y}) - f_k(t, Y)}{\tilde{y}_k(t) - y_k(t)} dt = -\infty \quad \forall k \in \overline{1, n} \quad (9)$$

В переменной $D^{(k)}(t)$ числитель является производной возмущения решения и делится на само возмущение, следовательно существует первообразная:

$$\int_{t_0}^t D^{(k)}(t) dt = \ln \left| \frac{\tilde{y}_k(t) - y_k(t)}{\tilde{y}_k(t_0) - y_k(t_0)} \right|.$$

Соответственно критерии (8) (9) примут вид:

$$\ln \left| \frac{\tilde{y}_k(t) - y_k(t)}{\tilde{y}_k(t_0) - y_k(t_0)} \right| \leq \tilde{c}_2, \quad \tilde{c}_2 = \text{const}, \quad \forall t \in [t_0, \infty), \quad \forall k \in \overline{1, n}.$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \ln \left| \frac{\tilde{y}_k(t) - y_k(t)}{\tilde{y}_k(t_0) - y_k(t_0)} \right| = -\infty \quad \forall k \in \overline{1, n}.$$

Далее приводится вывод критериев устойчивости по характеру поведения правой части нелинейной системы ОДУ и ее производных. Дополнительно предполагается существование и непрерывность в R второй производной решения системы (1) и выполнение для $F'(t, Y)$ аналога условия Липшица:

$$\begin{aligned} |f'_k(t, Y) - f'_k(t, \tilde{Y})| &\leq L_1 |f_k(t, Y) - f_k(t, \tilde{Y})|, \quad L_1 = \text{const}, \quad \forall t \in [t_0, \infty), \\ \forall (t, Y), (t, \tilde{Y}) &\in R, \quad \forall k \in \overline{1, n}. \end{aligned}$$

Кроме того, предполагается что $\exists \Delta_1 \leq \delta$, такое что $\forall \tilde{Y}(t): \|\tilde{Y}_0 - Y_0\| \leq \Delta_1$ выполняется неравенство

$$\begin{aligned} \int_{t_0}^t \frac{f_k(t, \tilde{Y}) - f_k(t, Y)}{\tilde{y}_k(t) - y_k(t)} dt &\leq \tilde{c}_3 \int_{t_0}^t \frac{f'_k(t, \tilde{Y}) - f'_k(t, Y)}{f_k(t, \tilde{Y}) - f_k(t, Y)} dt, \quad \tilde{c}_3 = \text{const}, \quad \tilde{c}_3 > 0, \\ \forall t &\in [t_0, \infty), \quad \forall k \in \overline{1, n} \end{aligned} \quad (10)$$

или следующее неравенство, из которого следует (10)

$$\begin{aligned} \frac{f_k(t, \tilde{Y}) - f_k(t, Y)}{\tilde{y}_k(t) - y_k(t)} &\leq \tilde{c}_4 \frac{f'_k(t, \tilde{Y}) - f'_k(t, Y)}{f_k(t, \tilde{Y}) - f_k(t, Y)}, \quad \tilde{c}_4 = \text{const}, \quad \tilde{c}_4 > 0, \quad \forall t \in [t_0, \infty), \\ \forall k &\in \overline{1, n}. \end{aligned}$$

При выполнении данных ограничений для устойчивости решения системы (1) достаточно существование Δ_2 , $0 < \Delta_2 \leq \delta$, такого что $\forall \tilde{Y}(t): \|\tilde{Y}_0 - Y_0\| \leq \Delta_2$ выполняется неравенство

$$\int_{t_0}^t \frac{f'_k(t, \tilde{Y}) - f'_k(t, Y)}{f_k(t, \tilde{Y}) - f_k(t, Y)} dt \leq \tilde{c}_5, \quad \tilde{c}_5 = \text{const}, \quad \forall t \in [t_0, \infty), \quad \forall k \in \overline{1, n}. \quad (11)$$

Для асимптотической устойчивости решения системы (1) достаточно, чтобы решение было устойчиво и существовало $\Delta_3 \leq \Delta_2$, такое что $\|\tilde{Y}_0 - Y_0\| \leq \Delta_3$ влечет

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \int_{t_0}^t \frac{f'_k(t, \tilde{Y}) - f'_k(t, Y)}{f_k(t, \tilde{Y}) - f_k(t, Y)} dt = -\infty. \quad (12)$$

Критерии устойчивости (11), (12) можно сформулировать в следующей эквивалентной форме. Для устойчивости решения системы (1) достаточно существование Δ_2 , $0 < \Delta_2 \leq \delta$, такого что $\forall \tilde{Y}(t): \|\tilde{Y}_0 - Y_0\| \leq \Delta_2$ выполняется соотношение

$$\left| \frac{f_k(t, \tilde{Y}) - f_k(t, Y)}{f_k(t_0, \tilde{Y}_0) - f_k(t_0, Y_0)} \right| \leq \tilde{c}_5, \quad \tilde{c}_5 = \text{const} \quad \forall t \in [t_0, \infty),$$

$$f_k(t_0, \tilde{Y}_0) - f_k(t_0, Y_0) \neq 0, \quad \forall k \in \overline{1, n}. \quad (13)$$

Для асимптотической устойчивости достаточно, чтобы решение было устойчиво и существовало $\Delta_3 \leq \Delta_2$, такое что $\|\tilde{Y}_0 - Y_0\| \leq \Delta_3$ влечет

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \left| \frac{f_k(t, \tilde{Y}) - f_k(t, Y)}{f_k(t_0, \tilde{Y}_0) - f_k(t_0, Y_0)} \right| = 0, \quad f_k(t_0, \tilde{Y}_0) - f_k(t_0, Y_0) \neq 0, \quad \forall k \in \overline{1, n}. \quad (14)$$

Если $\forall \tilde{Y}(t): \|\tilde{Y}_0 - Y_0\| \leq \Delta_2$ дополнительно потребовать выполнение неравенства

$$\left| \int_{t_0}^t \frac{f'_k(t, \tilde{Y}) - f'_k(t, Y)}{f_k(t, \tilde{Y}) - f_k(t, Y)} dt - \int_{t_0}^t \frac{f_k(t, \tilde{Y}) - f_k(t, Y)}{\tilde{y}_k(t) - y_k(t)} dt \right| \leq c_0, \quad c_0 = \text{const}$$

$$\forall t \in [t_0, \infty), \quad \forall k \in \overline{1, n} \quad (15)$$

то критерии (11)–(14) будут необходимыми и достаточными условиями устойчивости и асимптотической устойчивости.

Неравенство (15) можно преобразовать к виду

$$e^{-c_0} \leq \left| \frac{f_k(t, \tilde{Y}) - f_k(t, Y)}{\tilde{y}_k(t) - y_k(t)} \right| / \left| \frac{f_k(t_0, \tilde{Y}_0) - f_k(t_0, Y_0)}{\tilde{y}_k(t_0) - y_k(t_0)} \right| \leq e^{c_0}, \quad c_0 > 0, \quad c_0 = \text{const},$$

$$\forall t \in [t_0, \infty), \quad \forall k \in \overline{1, n}.$$

Выполнение последнего соотношения при $f_k(t, \tilde{Y}) - f_k(t, Y) \rightarrow 0$ возможно только, если $\tilde{y}_k(t) - y_k(t) \rightarrow 0$, иначе не выполнится неравенство –

$$e^{-c_0} \leq \left| \frac{f_k(t, \tilde{Y}) - f_k(t, Y)}{\tilde{y}_k(t) - y_k(t)} \right| / \left| \frac{f_k(t_0, \tilde{Y}_0) - f_k(t_0, Y_0)}{\tilde{y}_k(t_0) - y_k(t_0)} \right|.$$

Если $\tilde{y}_k(t) - y_k(t) \rightarrow 0$, то необходимо $f_k(t, \tilde{Y}) - f_k(t, Y) \rightarrow 0$, иначе нарушится неравенство –

$$\left| \frac{f_k(t, \tilde{Y}) - f_k(t, Y)}{\tilde{y}_k(t) - y_k(t)} \right| / \left| \frac{f_k(t_0, \tilde{Y}_0) - f_k(t_0, Y_0)}{\tilde{y}_k(t_0) - y_k(t_0)} \right| \leq e^{c_0}.$$

Предложенный подход допускает конструировать критерии устойчивости для производных правой части системы (1) произвольного порядка $\ell \geq 2$, если эти производные существуют. В этом случае критерии устойчивости и асимптотической устойчивости примут вид

$$\int_{t_0}^t \frac{f_k^{(\ell)}(t, \tilde{Y}) - f_k^{(\ell)}(t, Y)}{f_k^{(\ell-1)}(t, \tilde{Y}) - f_k^{(\ell-1)}(t, Y)} dt \leq \tilde{c}_6, \quad \tilde{c}_6 = \text{const} \quad \forall t \in [t_0, \infty), \quad \forall k \in \overline{1, n},$$

$$\forall \tilde{Y}(t): \|\tilde{Y}_0 - Y_0\| \leq \Delta_2,$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \int_{t_0}^t \frac{f_k^{(\ell)}(t, \tilde{Y}) - f_k^{(\ell)}(t, Y)}{f_k^{(\ell-1)}(t, \tilde{Y}) - f_k^{(\ell-1)}(t, Y)} dt = -\infty \quad \forall k \in \overline{1, n}, \quad \forall \tilde{Y}(t): \|\tilde{Y}_0 - Y_0\| \leq \Delta_3.$$

Полученные критерии будут необходимыми и достаточными условиями устойчивости и асимптотической устойчивости при ограничении

$$\left| \int_{t_0}^t \frac{f_k^{(\ell)}(t, \tilde{Y}) - f_k^{(\ell)}(t, Y)}{f_k^{(\ell-1)}(t, \tilde{Y}) - f_k^{(\ell-1)}(t, Y)} dt - \int_{t_0}^t \frac{f_k(t, \tilde{Y}) - f_k(t, Y)}{\tilde{y}_k(t) - y_k(t)} dt \right| \leq c_0, \quad c_0 = \text{const}$$

$$\forall \tilde{Y}(t): \|\tilde{Y}_0 - Y_0\| \leq \Delta_2.$$

При этом дополнительно потребуется выполнение для $F^{(\ell-1)}(t, Y)$ аналога условия Липшица. При переходе к первообразным критерии устойчивости и асимптотической устойчивости примут вид

$$\left| \frac{f_k^{(\ell-1)}(t, \tilde{Y}) - f_k^{(\ell-1)}(t, Y)}{f_k^{(\ell-1)}(t_0, \tilde{Y}_0) - f_k^{(\ell-1)}(t_0, Y_0)} \right| \leq \tilde{c}_7, \quad \tilde{c}_7 = \text{const} \quad \forall t \in [t_0, \infty), \quad (16)$$

$$f_k^{(\ell-1)}(t_0, \tilde{Y}_0) - f_k^{(\ell-1)}(t_0, Y_0) \neq 0, \quad \forall k \in \overline{1, n}.$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \left| \frac{f_k^{(\ell-1)}(t, \tilde{Y}) - f_k^{(\ell-1)}(t, Y)}{f_k^{(\ell-1)}(t_0, \tilde{Y}_0) - f_k^{(\ell-1)}(t_0, Y_0)} \right| = 0, \quad f_k^{(\ell-1)}(t_0, \tilde{Y}_0) - f_k^{(\ell-1)}(t_0, Y_0) \neq 0,$$

$$\forall k \in \overline{1, n}.$$

Получены критерии устойчивости по характеру поведения правой части системы и ее производных. По аналогии с предыдущими критериями, они ориентированы на компьютерную реализацию и должны однозначно определять характер устойчивости исследуемой системы по ходу ее приближенного решения.

Численный и программный эксперимент. Эксперимент проводился с помощью ПК на базе процессора Intel(R) Core(TM) i5-4460 в среде программирования Delphi. На основе программ, реализующих конструкцию критериев (6), (13), (16) выполняется анализ устойчивости нелинейных систем ОДУ. Для каждого уравнения исследуемой системы вычисляется значение выражения из левой части критериев (6), (13), (16) и находится векторная норма. По поведению значений нормы делается вывод о характере устойчивости исследуемой системы [16]. Ограниченное изменение соответствует устойчивости, монотонное стремление к нулю характеризует асимптотическую устойчивость, неограниченный рост является признаком неустойчивости. Приближенные значения возмущенного и невозмущенного решения, входящие в конструкцию критериев (6), (13), (16) находятся с помощью метода Рунге–Кутты 4-го порядка. Для повышения достоверности анализа устойчивости приближенные значения решения, входящие в конструкцию критериев, целесообразно находить на основе кусочно-интерполяционной аппроксимации полиномами Ньютона и Лагранжа, преобразованными к форме с числовыми коэффициентами [17].

Пример 1. Исследуется на устойчивость решение системы

$$y_1' = -y_2 \sqrt{y_1^2 + y_2^2}, \quad y_2' = y_1 \sqrt{y_1^2 + y_2^2}. \quad (17)$$

Известно, что общее решение системы имеет вид $y_1 = c_1 \cos(c_1 t + c_2)$, $y_2 = c_1 \sin(c_1 t + c_2)$. Нулевое решение системы (17) устойчиво, все остальные решения неустойчивы [18].

Первоначально исследуется нулевое решение системы (17). Компьютерный анализ устойчивости выполняется на промежутке $[0, 10^4]$ при значении шага разностной схемы 10^{-3} . Начальные значения компонент возмущенного решения $\tilde{y}_{10} = 10^{-5}$, $\tilde{y}_{20} = 2 \cdot 10^{-5}$. Результаты анализа устойчивости представлены в табл. 1. Во второй строке результаты анализа по критерию (6), в третьей строке по критерию (13), в четвертой по критерию (16).

Таблица 1

Результаты анализа устойчивости нулевого решения системы (17)

t	10^3	2×10^3	3×10^3	4×10^3	5×10^3
norma ₁	1.011	1.021	1.031	1.041	1.049
norma ₂	1.011	1.021	1.031	1.041	1.049
norma ₃	1.011	1.021	1.031	1.041	1.049
t	6×10^3	7×10^3	8×10^3	9×10^3	10^4
norma ₁	1.057	1.065	1.073	1.079	1.085
norma ₂	1.057	1.065	1.073	1.079	1.085
norma ₃	1.057	1.065	1.073	1.079	1.085

Значения нормы тождественно равны по трем критериям и ограничены константой, что свидетельствует об устойчивости нулевого решения системы (17).

Далее выполняется анализ устойчивости ненулевого решения системы (17) – $y_{10} = y_{20} = 0.01$, величина возмущения начальных данных $\delta = 10^{-5}$.

Таблица 2

Результаты анализа устойчивости ненулевого решения системы (17)

t	10^3	2×10^3	3×10^3	4×10^3	5×10^3
norma ₁	14,989	28,631	42,986	58,297	73,921
norma ₂	8,001	14,827	21,477	28,673	36,491
norma ₃	5,671	8,681	14,663	18,798	23,173
t	6×10^3	7×10^3	8×10^3	9×10^3	10^4
norma ₁	89,849	106,075	122,591	139,388	156,460
norma ₂	44,462	52,582	60,846	69,252	77,794
norma ₃	29,333	31,185	40,265	38,682	51,573

Наблюдается монотонный рост значений нормы по всем критериям, что свидетельствует о неустойчивости. Время работы программы при анализе нулевого решения ≈ 1.5 с., ненулевого ≈ 3 с. Полученные результаты анализа устойчивости системы (17) находятся в полном соответствии с представленными в [18].

Пример 2. Исследуется на устойчивость нулевое решение системы

$$\begin{cases} \frac{dy_1}{dt} = -y_1 - y_2 + y_1(y_1^2 + y_2^2), \\ \frac{dy_2}{dt} = y_1 - y_2 + y_2(y_1^2 + y_2^2). \end{cases} \quad (18)$$

Общее решение в аналитическом виде записывается следующим образом:

$$y_1 = \frac{\cos t}{\sqrt{1 + ce^{2t}}}, \quad y_2 = \frac{\sin t}{\sqrt{1 + ce^{2t}}}.$$

Нулевое решение этой системы асимптотически устойчиво справа [19]. Компьютерный анализ устойчивости выполняется при численном значении величины возмущения и шага из примера 1.

Таблица 3

Результаты анализа устойчивости нулевого решения системы (18)

t	10^3	2×10^3	3×10^3	4×10^3	5×10^3
norma ₁	$5,539 \times 10^{-435}$	$5,739 \times 10^{-869}$	$1,849 \times 10^{-1303}$	$7,114 \times 10^{-1738}$	$7,179 \times 10^{-2172}$
norma ₂	$1,544 \times 10^{-434}$	$6,242 \times 10^{-869}$	$1,371 \times 10^{-1303}$	$1,845 \times 10^{-1737}$	$9,466 \times 10^{-2172}$
norma ₃	$5,539 \times 10^{-435}$	$5,739 \times 10^{-869}$	$1,849 \times 10^{-1303}$	$7,114 \times 10^{-1738}$	$7,179 \times 10^{-2172}$
t	6×10^3	7×10^3	8×10^3	9×10^3	10^4
norma ₁	$3,009 \times 10^{-2606}$	$9,684 \times 10^{-3041}$	$8,505 \times 10^{-3475}$	$4,516 \times 10^{-3909}$	$1,254 \times 10^{-4343}$
norma ₂	$1,789 \times 10^{-2606}$	$2,068 \times 10^{-3040}$	$1,348 \times 10^{-3474}$	$2,367 \times 10^{-3909}$	$2,122 \times 10^{-4343}$
norma ₃	$3,009 \times 10^{-2606}$	$9,684 \times 10^{-3041}$	$8,505 \times 10^{-3475}$	$4,516 \times 10^{-3909}$	$1,254 \times 10^{-4343}$

Монотонное убывание значений нормы к нулю по трем критериям свидетельствует об асимптотической устойчивости нулевого решения системы (18).

Таким образом, результаты анализа устойчивости по представленным критериям находятся в полном соответствии с теоретическими оценками устойчивости. Предложенный подход целесообразно применять наряду с другими методами, допускающими компьютерную реализацию [20–22].

Заключение. Представлены критерии устойчивости и асимптотической устойчивости систем нелинейных ОДУ в виде необходимых и достаточных условий. Первоначально критерии получены при ограничениях общего вида на основе рекуррентных преобразований разностных схем численного интегрирования. Далее с помощью эквивалентных преобразований критерии преобразуются в аддитивную и логарифмическую форму. При дополнительных ограничениях конструируются критерии по характеру поведения правой части нелинейной системы ОДУ и ее производных. Форма критериев влечет возможность их программной реализации. Критерии инвариантны относительно правой части системы, разностных схем приближенного решения системы, длины промежутка и шага решения. Выполнена программная реализация критериев и на ее основе проведен анализ систем нелинейных ОДУ с априори известным характером устойчивости. Результаты численного эксперимента позволили достоверно установить характер устойчивости исследуемых систем в режиме реального времени и оказались в полном соответствии с ожидаемыми. В целом предложенный подход может стать основой для компьютеризации анализа устойчивости систем нелинейных ОДУ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Александров А.Ю., Жабко А.П., Косов А.А. Анализ устойчивости и стабилизация нелинейных систем на основе декомпозиции // Сибирский математический журнал. – 2015. – Т. 56, № 6. – С. 1215-1233.

2. Мельников Г.И., Мельников В.Г., Дударенко Н.А., Талапов В.В. Устойчивость движения нелинейных динамических систем при постоянно действующих возмущениях // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2019. – Т. 19, № 2. – С. 216-221.
3. Миронов В.В., Митрохин Ю.С. Технологический подход к исследованию устойчивости динамических систем: прикладные вопросы // Вестник РГРТУ – 2017. – № 59. – С. 127-135.
4. Дружинина О.В., Масина О.Н. О подходах к анализу устойчивости нелинейных динамических систем с логическими регуляторами // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2017. – Т. 13, № 2. – С. 40-49.
5. Дружинина О.В., Масина О.Н. Системный подход к исследованию устойчивости моделей, описываемых дифференциальными уравнениями различных типов // Вестник Российской академии естественных наук. – 2015. – № 3. – С. 24-30.
6. Barreau M., Seuret A., Gouaisbaut F., Baudouin L. Lyapunov stability analysis of a string equation coupled with an ordinary differential system // IEEE Trans. Automatic Control. – 2018. available on HAL.
7. Luyckx L., Loccufier M., Noldus E. Computational methods in nonlinear stability analysis: stability boundary calculations // J. Comput. Appl. Math. – 2004. – Vol. 168, Issue 12. – P. 289-297.
8. Giesl P., Hafstein S. Computation of Lyapunov functions for nonlinear discrete time systems by linear programming // J. Difference Equ. Appl. – 2014. – Vol. 20, Issue 4. – P. 610-640.
9. Olgac N., Sipahi R. A practical method for analyzing the stability of neutral type LTI-time delayed systems // Automatica. – 2004. – Vol. 40, Issue 5. – P. 847-853.
10. Hafstein S. A constructive converse Lyapunov theorem on asymptotic stability for nonlinear autonomous ordinary differential equations // Dynamical Systems. – 2005. – Vol. 20. – P. 281-299.
11. Ромм Я.Е. Компьютерно-ориентированный анализ устойчивости на основе рекуррентных преобразований разностных решений обыкновенных дифференциальных уравнений // Кибернетика и системный анализ. – 2015. – Т. 51, № 3. – С. 107-124.
12. Буланов С.Г. Анализ устойчивости систем линейных дифференциальных уравнений на основе преобразования разностных схем // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2019. – Т. 20, № 9. – С. 542-549.
13. Ромм Я.Е. Компьютерно-ориентированный анализ устойчивости решений дифференциальных систем // Современные наукоемкие технологии. – 2020. – № 4. – С. 42-63.
14. Bulanov S.G. Differential systems stability analysis based on matrix multiplicative criteria // Journal of Physics: Conf. Series. – 2020. 1479 012103.
15. Bulanov S.G. Computer analysis of differential systems stability based on linearization and matrix multiplicative criteria // Journal of Physics: Conf. Series. – 2021. 1902 012101.
16. Буланов С.Г., Джанунц Г.А. Программный анализ устойчивости систем обыкновенных дифференциальных уравнений на основе мультипликативных преобразований разностных схем и кусочно-полиномиальных приближений решения // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2015. – № 2. – С. 10-20.
17. Джанунц Г.А., Ромм Я.Е. Варьируемое кусочно-интерполяционное решение задачи Коши для обыкновенных дифференциальных уравнений с итерационным уточнением // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2017. – Т. 57, № 10. – С. 1641-1660.
18. Чезари Л. Асимптотическое поведение и устойчивость решений обыкновенных дифференциальных уравнений. – Москва: Мир, 1964. – 478 с.
19. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. – Москва: Наука, 1971. – 576 с.
20. Doban A., Lazar M. Computation of Lyapunov functions for nonlinear differential equations via a Yoshizawa-type construction // 10th IFAC Symp. on Nonlinear Control Systems NOLCOS: IFAC-PapersOnLine. – 2016. – P. 29-34.
21. Xiao-Lin L., Yao-Lin J. Numerical algorithm for constructing Lyapunov functions of polynomial differential systems // J. Appl. Math. Comput. – 2009. – Vol. 29, Issue 1-2. – P. 247-262.
22. Zhaolu T., Chuanqing G. A numerical algorithm for Lyapunov equations // J. Appl. Math. Comput. – 2008. – Vol. 202, Issue 1. – P. 44-53.

REFERENCE

1. Aleksandrov A.Y., Zhabko A.P., Kosov A.A. Analiz ustoychivosti i stabilizatsiya nelineynykh sistem na osnove dekompozitsii [Analysis of stability and stabilization of nonlinear systems via decomposition], *Sibirskij matematicheskij zhurnal* [Siberian mathematical journal], 2015, Vol. 56, No. 6, pp. 1215-1233.
2. Mel'nikov G.I., Mel'nikov V.G., Dudarenko N.A., Talapov V.V. Ustoychivost' dvizheniya nelineynykh dinamicheskikh sistem pri postoyanno deystvuyushhikh vozmushheniyah [Stability of nonlinear dynamical system motion under constantly acting perturbations], *Nauchno-tehnicheskij vestnik informatsionnykh tehnologii, mekhaniki i optiki* [Scientific and technical journal of information technologies, mechanics and optics], 2019, Vol. 19, No. 2, pp. 216-221.
3. Mironov V.V., Mitrokhin Yu.S. Tekhnologicheskij podkhod k issledovaniyu ustoychivosti dinamicheskikh sistem: prikladnye voprosy [Constructive approach to the research of dynamic systems stability: applied problems], *Vestnik RGRTU* [Vestnik of RSREU], 2017, No. 59, pp. 127-135.
4. Druzhinina O.V., Masina O.N. O podhodakh k analizu ustoychivosti nelineynykh dinamicheskikh sistem s logicheskimi regulyatorami [On approaches to the stability analysis of nonlinear dynamic systems with logical controllers], *Sovremennye informatsionnye tehnologii i IT-obrazovanie* [Modern Information Technologies and IT-Education], 2017, Vol. 13, No. 2, pp. 40-49.
5. Druzhinina O.V., Masina O.N. Sistemnyy podkhod k issledovaniyu ustoychivosti modeley, opisyyaemykh differentsial'nymi uravneniyami razlichnykh tipov [System approach to stability research of the models described by the differential equations of different types], *Vestnik Rossiyskoy akademii estestvennykh nauk* [Herald of Russian Academy of Natural Sciences], 2015, No. 3, pp. 24-30.
6. Barreau M., Seuret A., Gouaisbaut F., Baudouin L. Lyapunov stability analysis of a string equation coupled with an ordinary differential system, *IEEE Trans. Automatic Control*, 2018, available on HAL.
7. Luyckx L., Loccufier M., Noldus E. Computational methods in nonlinear stability analysis: stability boundary calculations, *J. Comput. Appl. Math.*, 2004, Vol. 168, No. 12, pp. 289-297.
8. Giesl P., Hafstein S. Computation of Lyapunov functions for nonlinear discrete time systems by linear programming, *J. Difference Equ. Appl.*, 2014, Vol. 20, No. 4, pp. 610-640.
9. Olgac N., Sipahi R. A practical method for analyzing the stability of neutral type LTI-time delayed systems, *Automatica*, 2004, Vol. 40, No. 5, pp. 847-853.
10. Hafstein S. A constructive converse Lyapunov theorem on asymptotic stability for nonlinear autonomous ordinary differential equations, *Dynamical Systems*, 2005, Vol. 20, pp. 281-299.
11. Romm Ya.E. Komp'yuterno-orientirovanny analiz ustoychivosti na osnove rekurrentnykh preobrazovaniy raznostnykh resheniy obyknovennykh differentsial'nykh uravneniy [Computer-oriented stability analysis based on recurrent transformation of difference solutions of ordinary differential equations], *Kibernetika i sistemnyy analiz* [Cybernetics and Systems Analysis], 2015, Vol. 51, No. 3, pp. 416-431.
12. Bulanov S.G. Analiz ustoychivosti sistem lineynykh differentsial'nykh uravneniy na osnove preobrazovaniya raznostnykh skhem [Stability analysis of systems of linear differential equations based on transformation of difference schemes], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie], 2019, Vol. 20, No. 9, pp. 542-549.
13. Romm Ya.E. Komp'yuterno-orientirovanny analiz ustoychivosti resheniy differentsial'nykh sistem [Computer-oriented stability analysis of solutions of differential systems], *Sovremennye naukoemkie tehnologii* [Modern high technologies], 2020, No. 4, pp. 42-63.
14. Bulanov S.G. Differential systems stability analysis based on matrix multiplicative criteria, *Journal of Physics: Conf. Series*, 2020, 1479, 012103.
15. Bulanov S.G. Computer analysis of differential systems stability based on linearization and matrix multiplicative criteria, *Journal of Physics: Conf. Series*, 2021, 1902, 012101.
16. Bulanov S.G., Dzhannunts G.A. Programnyy analiz ustoychivosti sistem obyknovennykh differentsial'nykh uravneniy na osnove mul'tiplikativnykh preobrazovaniy raznostnykh skhem i kusochno-polinomial'nykh priblizheniy resheniya [Program analysis of stability of ordinary differential equations systems on the basis of multiplicative transformations of difference schemes and piecewise polynomial approximations of the solution], *Promyshlennyye ASU i kontroly* [Industrial Automatic Control Systems and Controllers], 2015, No. 2, pp. 10-20.

17. Dzhannunts G.A., Romm Ya.E. Var'iruemoe kusochno-interpolyatsionnoe reshenie zadachi Koshi dlya obyknovennykh differentsial'nykh uravneniy s iteratsionnym utochneniem [The varying piecewise interpolation solution of the Cauchy problem for ordinary differential equations with iterative refinement], *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki* [Computational Mathematics and Mathematical Physics Journal], 2017, Vol. 57, No. 10, pp. 1616-1634.
18. Cesari L. Asimptoticheskoe povedenie i ustoychivost' resheniy obyknovennykh differentsial'nykh uravneniy [Asymptotic Behavior and Stability Problems in Ordinary Differential Equations]. Moscow: Mir, 1964, 478 p.
19. Kamke E. Spravochnik po obyknovennym differentsial'nym uravneniyam [Handbook of Exact Solutions for Ordinary Differential Equations]. Moscow: Science, 1971, 576 p.
20. Doban A., Lazar M. Computation of Lyapunov functions for nonlinear differential equations via a Yoshizawa-type construction, *10th IFAC Symp. on Nonlinear Control Systems NOLCOS: IFAC-PapersOnLine*, 2016, pp. 29-34.
21. Xiao-Lin L., Yao-Lin J. Numerical algorithm for constructing Lyapunov functions of polynomial differential systems, *J. Appl. Math. Comput.*, 2009, Vol. 29, No. 1-2, pp. 247-262.
22. Zhaolu T., Chuanqing G. A numerical algorithm for Lyapunov equations, *J. Appl. Math. Comput.*, 2008, Vol. 202, No. 1, pp. 44-53.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Курейчик.

Буланов Сергей Георгиевич – Ростовский государственный экономический университет; e-mail: bulanovtgp@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89281250973; доцент.

Bulanov Sergei Georgievich – Rostov State University of Economics; e-mail: bulanovtgp@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79281250973; associate professor.

УДК 621.9

DOI 10.18522/2311-3103-2023-4-137-151

Е.В. Федорина, И.Ф. Дьяков, О.Г. Крупенников

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕГО РАСКРОЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕСУРС-СТОИМОСТНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ

Применяемые программы и САПР по раскрою различных материалов эффективны в условиях единичного и многономенклатурного мелкосерийного производства с применением группового метода раскроя на заготовки произвольной геометрической формы. При раскрое листового и рулонного металлопроката в условиях крупносерийного и массового производства, характеризующегося индивидуальным раскромом на одноименные заготовки, созданные программы имеют ограниченное применение. Для автоматизированного раскроя в условиях такого производства необходима адаптация применяемых или создание новых систем и программ с применением современных подходов и новой схемы проектирования раскроя на основе использования нового показателя эффективности раскроя с минимизацией себестоимости выпускаемой продукции, ведения расчета для деталей одной группы (по марке и толщине), что позволит рационально подбирать отходы на другие детали данной группы. Для решения поставленной задачи предложена и рассмотрена в статье новая модель оптимизации гильотинного раскроя с минимизацией затрат на металл и снижением себестоимости раскройных изделий. Для реализации автоматизированного проектирования раскроя в зависимости от нового ресурс-стоимостного показателя (РСП) и управления информацией о подетальном раскроме металла в ходе проведенных авторами исследований разработана база данных «Кластер деталей «ПРОМ-2013»» и программа «ПРОМ-2013», позволяющая произвести оценку эффективности раскроя по РСП и выбрать оптимальный вариант. На примере детали «Панель боковины» показаны эффективность разработанного алгоритма и этапы автоматизированного проектирования оптимального раскроя на основе показателя РСП с формированием выходных документов «карт раскроя материалов».

Оптимальный раскрой; ресурс-стоимостной показатель; база данных; программа оптимизации раскроя.

E.V. Fedorina, I.F. Dyakov, O.G. Krupennikov

AUTOMATED DESIGN OF RESOURCE-SAVING CUTTING USING RESOURCE-SAVING COEFFICIENT

The applied programs and cad for cutting various materials are effective in conditions of single and multi-item small-scale production using the group method of cutting into blanks of arbitrary geometric shape. When cutting sheet and rolled metal products in large-scale and mass production, characterized by individual cutting into blanks of the same name, the created programs have limited use. For automated cutting in such production conditions, it is necessary to adapt existing systems and programs or create new ones using modern approaches and a new cutting design scheme based on the use of a new cutting efficiency indicator with minimizing the cost of manufactured products, conducting calculations for parts of the same group (by brand and thickness), which will allow rational selection of waste for other parts of this group. To solve the problem, a new model for optimizing guillotine cutting with minimizing metal costs and reducing the cost of cutting products is proposed and discussed in the article. To implement automated cutting design depending on the new resource-saving coefficient (RSC) and manage information about detailed cutting of metal in the course of the research conducted by the authors, the database «Cluster of parts «PROM-2013»» and the program «PROM-2013» were developed, allowing assessing the efficiency of cutting according to RSC and choosing the best option. Using the example of the «side panel» part, the effectiveness of the developed algorithm and the stages of automated design of optimal cutting based on the RSC indicator with the formation of output documents «material cutting cards» are shown.

Optimal cutting, resource-cost indicator, database, cutting optimization program.

Состояние вопроса. В современных конкурентных условиях производства проблема снижения металлоемкости и экономного потребления металла не только не потеряла своей актуальности, но и ускорились темпы решения этой задачи. Важнейшим резервом экономии металла является оптимизация раскроя металлопроката с альтернативным выбором оптимальных типоразмеров проката от разных производителей-поставщиков.

Существующие методы и алгоритмы оптимального раскроя [1–7], опубликованные в различных изданиях, легли в основу многих программных разработок, широко применяемых на промышленных предприятиях [8]. В качестве основного критерия экономичного и эффективного раскроя выбирается наиболее плотное размещение (максимальное количество) заготовок на материале заданного сортамента. Кроме того, при расчете раскроя исходных материалов согласно традиционной схемы проектирования технологических процессов резки металлопроката определяется наиболее рациональное использование металла, соответствующее максимальному коэффициенту использования материала ($K_{\text{и}}$) и минимальному потреблению материала [9, 10] по каждой детали в отдельности, и невозможно осуществить выбор оптимального раскроя всей номенклатуры деталей.

Экономические факторы все сильнее оказывают влияние на подход к решению проблемы экономии материала. И использование только традиционных показателей (коэффициента раскроя и коэффициента использования материала) для оценки эффективности раскроя уже недостаточно. Необходимо также учитывать экономические аспекты, что позволит существенно увеличить экономию металлоресурсов и связанных с ними затрат, и тем самым снизить себестоимость раскройной продукции.

Основная часть. Расширение списка альтернативных поставщиков металлопроката дает возможность увеличить перечень сортамента металла (включая стоимостные характеристики), подлежащего раскрою. Однако, при выборе выгодного раскроя может сложиться такая ситуация, когда будет отдано предпочтение варианту не с минимальной нормой расхода или с минимальной ценой стали, а с минимальными затратами на металл. Для оценки эффективности раскроя металло-

проката на плоские прямоугольные заготовки в условиях массового и крупносерийного производства предлагается использовать сочетание нескольких показателей с определением комплексного показателя затрат (ресурс-стоимостного показателя (РСП)) и выбором максимально выгодного варианта раскроя с точки зрения его минимального значения.

В связи с этим разработана новая схема для проектирования раскроя, основанная на использовании предложенного ресурс-стоимостного показателя. В схему с введена обратная связь с процессом заказа металла и сортаментом, выпускаемым металлургическими комбинатами (с ценой). Оптимизационный расчет повторяется по циклу до достижения наилучшего (наименьшего) результата РСП. На основании новой схемы расчет оптимизированного раскроя выполняется по усовершенствованному обобщенному алгоритму раскроя металлопроката (рис. 1), предусматривающему три существенных отличия: 1) использование сортамента металлургических заводов (с ценой); 2) выполнение раскроя металла для группы деталей одной марки и толщины; 3) определение критерия оптимизации РСП с выбором наилучшего варианта раскроя по его минимальному значению, при котором заданное количество заготовок будет изготовлено с наименьшей потребностью металла при минимальных затратах [11, 12]. Элементы, выделенные серым цветом на рис. 1, являются авторскими разработками.

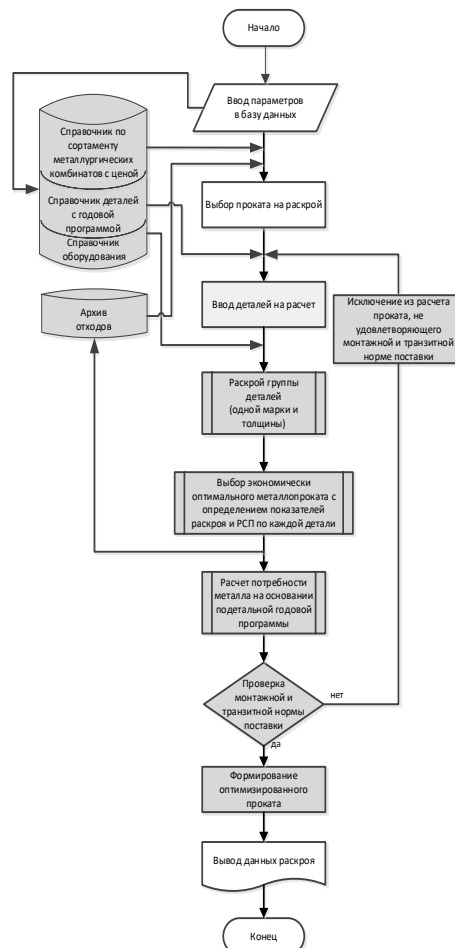


Рис. 1. Обобщенный алгоритм раскроя металлопроката для группы деталей

На основе схемы для проектирования ресурсосберегающего раскроя и усовершенствованного алгоритма разработана новая модель гильотинного раскроя с минимизацией затрат на металл в зависимости от нового ресурс-стоимостного показателя. Задача оптимального раскроя решается в три этапа. На первом этапе среди возможных вариантов укладки заготовки на листе выбирается наилучший вариант раскроя с наибольшим количеством заготовок [13]. На втором этапе при расчете раскроя для деталей одной группы определяется оптимальный вариант с наименьшим расходом металла для изготовления заданного числа заготовок согласно производственному плану.

На данном этапе оптимизация раскроя реализуется решением системы линейных уравнений и задачи одномерного раскроя, представленной математической моделью [13]

$$\sum_{j=1}^w L_j \sum_{k=1}^{g_j} x_{jk} \rightarrow \min,$$

при условиях

$$\sum_{j=1}^w \sum_{k=1}^{g_j} y_{ijk} x_{jk} \geq p_i, \quad i = 1, \dots, v, \quad j = 1, \dots, w,$$

$$\sum_{i=1}^v l_i y_{ijk} \leq L_j, \quad i = 1, \dots, v, \quad j = 1, \dots, w,$$

$$x_{jk} \geq 0 \text{ и целые; } y_{ijk} \geq 0 \text{ и целые,}$$

где x_{jk} – число рулонов j -го типа длиной L_j в k -варианте раскроя; y_{ijk} – число заготовок i -типа в k -варианте раскроя j -типа рулона длиной L_j ; j – индекс типа рулонного материала определенных размеров (по ширине и длине) и одной группы (по толщине и марке стали) ($j=1, \dots, w$); i – индекс наименования заготовок одной группы (по толщине и марке стали) ($i=1, \dots, v$); k – индекс варианта раскроя j -типа материала для заготовок одной группы ($k=1, \dots, g$); z – индекс поставщика проката (листа/ рулона) определенных размеров определенной группы (по толщине и марке стали) ($z=1, \dots, r$).

При продольном раскрое необходимо раскроить рулонный прокат шириной $B_1, B_2, \dots, B_j, \dots, B_w$ и длиной $L_1, L_2, \dots, L_j, \dots, L_w$, на полосы заданной ширины $b_1, b_2, \dots, b_i, \dots, b_v$ ($b_1 > b_2, \dots, \geq b_v$) и в заданном количестве полос p_i ($i=1, 2, \dots, v$). Далее полосы режутся на заготовки шириной b_i и длиной l_i . Количество допустимых вариантов раскроя рулона на полосы зависит от ширины рулона B и количества различных полос v шириной $b_1, b_2, \dots, b_v$. Соблюдая заданную комплектность, составляются планы раскроя, обеспечивающие минимальное количество разрезаемых рулонов. План раскроя рулона шириной B по возможным вариантам представляется в виде:

$$B_1 = a_{11}b_1 + a_{21}b_2 + \dots + a_{i1}b_i + \dots + a_{v1}b_v + \delta_1;$$

$$B_2 = a_{12}b_1 + a_{22}b_2 + \dots + a_{i2}b_i + \dots + a_{v2}b_v + \delta_2;$$

$$\dots\dots\dots;$$

$$B_k = a_{1k}b_1 + a_{2k}b_2 + \dots + a_{ik}b_i + \dots + a_{vk}b_v + \delta_k;$$

$$\dots\dots\dots;$$

$$B_g = a_{1g}b_1 + a_{2g}b_2 + \dots + a_{ig}b_i + \dots + a_{vg}b_v + \delta_g,$$

где a_{ik} – число полос i -типа в k -варианте раскроя; δ_k – отходы, получаемые в k -варианте раскроя.

В связи с незначительными потерями по длине каждой полосы, образующимися отходами можно пренебречь. Перебором комбинаций величин $(a_{1k}, \dots, a_{vk})$ с их значениями определяются все потенциальные планы раскроя по ширине рулона:

$$\begin{aligned} a_{1k} &= 0, 1, \dots, \left\lfloor \frac{B_k}{b_1} \right\rfloor; \\ a_{2k} &= 0, 1, \dots, \left\lfloor \frac{B_k - a_{1k}b_1}{b_2} \right\rfloor; \\ &\dots\dots\dots; \\ a_{vk} &= \left\lfloor \frac{B_k - a_{1k}b_1 - \dots - a_{v-1,k}b_{v-1}}{b_v} \right\rfloor. \end{aligned}$$

Согласно условиям задачи, отбираются варианты с минимальными отходами. Формируется оптимальный план раскроя при условии, что $x_1, x_2, \dots, x_g$ – количество распускаемых рулонов по определенному варианту. На начальном этапе решения задачи минимизируется суммарное количество распускаемых рулонов

$$x_1 + x_2 + \dots + x_k + \dots + x_g \rightarrow \min.$$

При этом система ограничений для продольного вида резки металла представляется в виде:

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1k}x_k + \dots + a_{1g}x_g &\geq [p_1]; \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2k}x_k + \dots + a_{2g}x_g &\geq [p_2]; \\ &\dots\dots\dots; \\ a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{ik}x_k + \dots + a_{ig}x_g &\geq [p_i]; \\ &\dots\dots\dots; \\ a_{v1}x_1 + a_{v2}x_2 + \dots + a_{vk}x_k + \dots + a_{vg}x_g &\geq [p_v]. \end{aligned}$$

Для поперечного раскроя рулона (на заготовки разной длины) по аналогии составляются планы раскроя по возможным вариантам и система ограничений, определяется минимальное суммарное количество поперечно разрезаемого проката: $x'_1 + x'_2 + \dots + x'_k + \dots + x'_g \rightarrow \min.$

Для соблюдения транзитной нормы поставки проката учитывается ограничение:

$$\sum G_j x_{jk} \geq T_w,$$

где G_j – масса рулонного проката, кг; T_w – минимальная транзитная норма, кг.

Для реализации третьего этапа оптимального раскроя по критерию оптимизации решается задача построения раскроя для деталей одной группы всех габаритов проката данной марки и толщины с учетом стоимости на разных комбинатах [14]. Расчет продолжается до полного окончания списка листов/ рулонов.

Определяются оптимальные планы продольных раскроев всех типоразмеров рулонов заданной группы (по толщине и марке стали) шириной $B_1, B_2, \dots, B_j, \dots, B_w$ с определением наилучших планов продольного раскроя и минимального количества разрезаемых рулонов $(X_1, X_2, \dots, X_w)$ каждого типоразмера, для решения задачи поперечного раскроя – соответственно $X'_1, X'_2, \dots, X'_w$ каждого типоразмера.

Далее с учетом стоимости $C_{1z}, \dots, C_{2z}, \dots, C_{jz}, \dots, C_{wz}$ разных габаритов рулонного проката (одной группы) $B_1, \dots, B_2, \dots, B_j, \dots, B_w$ от разных металлургических комбинатов определяется минимум затрат на металл и нахождение минимального значения ресурс-стоимостного показателя (РСП): $RSC \rightarrow \min.$ Для продольного раскроя оцениваются затраты на металл:

$$RSC_j = \begin{vmatrix} C_{11}X_1 & C_{12}X_1 & \dots & C_{1z}X_1 & \dots & C_{1r}X_1 \\ C_{21}X_2 & C_{22}X_2 & \dots & C_{2z}X_1 & \dots & C_{2r}X_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{j1}X_j & C_{j2}X_j & \dots & C_{jz}X_1 & \dots & C_{jr}X_j \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{w1}X_w & C_{w2}X_w & \dots & C_{wz}X_1 & \dots & C_{wr}X_w \end{vmatrix}$$

Таким образом, для заданной группы рулонного проката определяется значение целевой функции, соответствующее наименьшему значению RSC_j для продольного раскроя и RSC_j' для поперечного раскроя.

Выполняя расчет по изложенному алгоритму для каждой группы рулонного металлопроката и для разных видов раскроя, устанавливается минимальная суммарная оценка всех металлоресурсов на производстве и формируется оптимизированный сортамент.

Далее правильность выбора оптимального варианта раскроя и эффективности резки проверяется определением показателей производительности (при продольной PR_j и поперечной резке PR_j') и трудоемкости (при продольной TR_j и поперечной резке TR_j'). На данном этапе решается задача максимизации целевой функции – определение наибольшего значения производительности: $PR_j \rightarrow \max, PR_j' \rightarrow \max$. Соответственно, производительность при продольной (PR_j) и поперечной (PR_j') резке рассчитывается:

$$PR_j = \begin{vmatrix} \frac{N_1 V_{p1}}{X_1 L_1} & \frac{N_1 V_{p2}}{X_1 L_1} & \dots & \frac{N_1 V_{ps}}{X_1 L_1} & \dots & \frac{N_1 V_{pq}}{X_1 L_1} \\ \frac{N_2 V_{p1}}{X_2 L_2} & \frac{N_2 V_{p2}}{X_2 L_2} & \dots & \frac{N_2 V_{ps}}{X_2 L_2} & \dots & \frac{N_2 V_{pq}}{X_2 L_2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{N_j V_{p1}}{X_j L_j} & \frac{N_j V_{p2}}{X_j L_j} & \dots & \frac{N_j V_{ps}}{X_j L_j} & \dots & \frac{N_j V_{pq}}{X_j L_j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{N_w V_{p1}}{X_w L_w} & \frac{N_w V_{p2}}{X_w L_w} & \dots & \frac{N_w V_{ps}}{X_w L_w} & \dots & \frac{N_w V_{pq}}{X_w L_w} \end{vmatrix},$$

$$PR_j' = \begin{vmatrix} \frac{N'_1 b_i V'_{p1}}{X'_1 L_1} & \frac{N'_1 b_i V'_{p2}}{X'_1 L_1} & \dots & \frac{N'_1 b_i V'_{ps}}{X'_1 L_1} & \dots & \frac{N'_1 b_i V'_{pq}}{X'_1 L_1} \\ \frac{N'_2 b_i V'_{p1}}{X'_2 L_2} & \frac{N'_2 b_i V'_{p2}}{X'_2 L_2} & \dots & \frac{N'_2 b_i V'_{ps}}{X'_2 L_2} & \dots & \frac{N'_2 b_i V'_{pq}}{X'_2 L_2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{N'_j b_i V'_{p1}}{X'_j L_j} & \frac{N'_j b_i V'_{p2}}{X'_j L_j} & \dots & \frac{N'_j b_i V'_{ps}}{X'_j L_j} & \dots & \frac{N'_j b_i V'_{pq}}{X'_j L_j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{N'_w b_i V'_{p1}}{X'_w L_w} & \frac{N'_w b_i V'_{p2}}{X'_w L_w} & \dots & \frac{N'_w b_i V'_{ps}}{X'_w L_w} & \dots & \frac{N'_w b_i V'_{pq}}{X'_w L_w} \end{vmatrix},$$

где N_j и N'_j – суммарное количество деталей при продольном и поперечном раскрое минимального суммарного числа рулонов X_j и X'_j соответственно; V_{ps} – максимальная скорость при продольной резке в зависимости от толщины материала м/мин; V'_{ps} – число двойных ходов ползуна/ ножевой балки гильотинного оборудования при поперечной резке с учетом подачи (шага резки, равного ширине заготовки b_i при поперечном раскрое), определяемое по паспортным данным в зависимости от типа режущего оборудования и технических характеристик, дв. х./мин., $s=1, \dots, q$.

Далее решается задача минимизации целевой функции – нахождение наименьшего значения трудоемкости: $TR_j \rightarrow \min, TR_j' \rightarrow \min$. Соответственно, трудоемкость при продольной (TR_j) и поперечной (TR_j') резке на одноименные заготовки определяется:

$$TR_j = \begin{bmatrix} \frac{X_1 L_1}{N_1 V_{p1}} & \frac{X_1 L_1}{N_1 V_{p2}} & \dots & \frac{X_1 L_1}{N_1 V_{ps}} & \dots & \frac{X_1 L_1}{N_1 V_{pq}} \\ \frac{X_2 L_2}{N_2 V_{p1}} & \frac{X_2 L_2}{N_2 V_{p2}} & \dots & \frac{X_2 L_2}{N_2 V_{ps}} & \dots & \frac{X_2 L_2}{N_2 V_{pq}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{X_j L_j}{N_j V_{p1}} & \frac{X_j L_j}{N_j V_{p2}} & \dots & \frac{X_j L_j}{N_j V_{ps}} & \dots & \frac{X_j L_j}{N_j V_{pq}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{X_w L_w}{N_w V_{p1}} & \frac{X_w L_w}{N_w V_{p2}} & \dots & \frac{X_w L_w}{N_w V_{ps}} & \dots & \frac{X_w L_w}{N_w V_{pq}} \end{bmatrix},$$

$$TR'_j = \begin{bmatrix} \frac{X'_1 L_1}{N'_1 b_i V'_{p1}} & \frac{X'_1 L_1}{N'_1 b_i V'_{p2}} & \dots & \frac{X'_1 L_1}{N'_1 b_i V'_{ps}} & \dots & \frac{X'_1 L_1}{N'_1 b_i V'_{pq}} \\ \frac{X'_2 L_2}{N'_2 b_i V'_{p1}} & \frac{X'_2 L_2}{N'_2 b_i V'_{p2}} & \dots & \frac{X'_2 L_2}{N'_2 b_i V'_{ps}} & \dots & \frac{X'_2 L_2}{N'_2 b_i V'_{pq}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{X'_j L_j}{N'_j b_i V'_{p1}} & \frac{X'_j L_j}{N'_j b_i V'_{p2}} & \dots & \frac{X'_j L_j}{N'_j b_i V'_{ps}} & \dots & \frac{X'_j L_j}{N'_j b_i V'_{pq}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{X'_w L_w}{N'_w b_i V'_{p1}} & \frac{X'_w L_w}{N'_w b_i V'_{p2}} & \dots & \frac{X'_w L_w}{N'_w b_i V'_{ps}} & \dots & \frac{X'_w L_w}{N'_w b_i V'_{pq}} \end{bmatrix}.$$

Определение производительности и трудоемкости является, собственно, проверочным расчетом решения поставленной задачи снижения потребления и затрат на металл. Однако, решение задачи оптимального варианта раскроя с максимальной производительностью и минимальной трудоемкостью возможно, как самостоятельное, с трансформацией модели раскроя.

Результаты исследования. Для автоматизированного раскроя листового металлопроката в условиях массового и крупносерийного производства возникла задача создания новой системы классификации деталей. С этой целью проанализирована по различным классификационным признакам номенклатура листоштамповочных деталей (1900 шт.), изготавливаемых в цехах Ульяновского автомобильного завода. По результатам анализа предложен классификатор деталей [15, 16], ставший впоследствии базой для программы по оптимальному раскрою металлопроката «ПРОМ-2013».

На основе классификатора создана и официально зарегистрирована база данных «Кластер деталей ПРОМ-2013» (свидетельство о государственной регистрации базы данных №2017620130) [17] с учетом требований к ним [18–20]. База данных «Кластер деталей ПРОМ-2013» реализована в рамках реляционной модели данных с помощью Microsoft Office Access, обладающей широким спектром функций: связанные запросы, связь с внешними таблицами и базами данных. Управление всеми данными в разработанной базе данных организовано в одном файле «Кластер деталей ПРОМ-2013». База данных (БД) предназначена для сбора, хранения, систематизации и предоставления оперативной информации о поддетальном раскросе металлопроката с обеспечением быстрого поиска необходимых данных по уникальному коду (пятнадцатизначному числу), соответствующему номеру детали. Вся вводимая информация сохраняется в одиннадцати таблицах. Табличные данные объединены в формах, запросах и отчетах установленными связями, позволяющими контролировать вводимые данные о раскросе, и составляют структуру базы данных (рис. 2).

Информационный фонд БД включает поддетальные технико-экономические показатели раскроя, технологию резки, сведения о раскраиваемом металле, об образующихся отходах и их использовании, деталях-донорах (предоставляющих отход) и деталях-акцепторах (потребляющих отход). В БД организован поддетальный архив карт раскроя с оптимальными результатами расчета. При изменении производственных условий и условий поставки металла из спроектированной БД можно быстро извлечь обновленную «Карту раскроя материала», создаваемую как на раскрой детали из листа/рулона, так и на раскрой остатков.

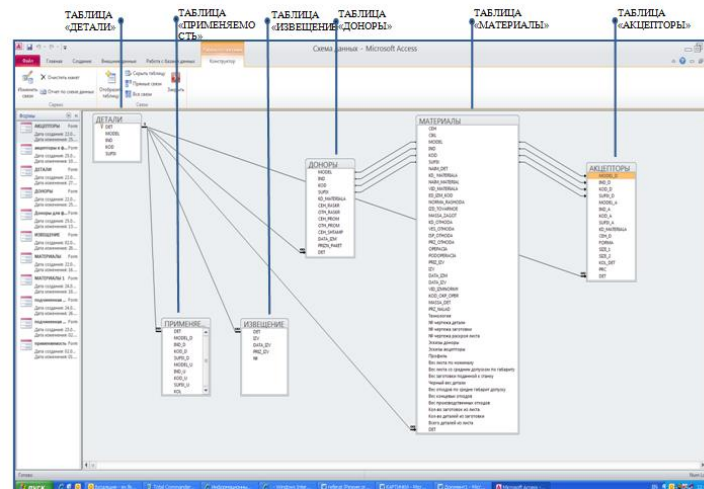


Рис. 2. Структура базы данных «Кластер деталей ПРОМ-2013»

Для решения задач оптимизации раскроя с применением автоматизированного проектирования на основе ресурс-стоимостной оценки металлоресурсов создана новая система. Разработанный программный продукт «ПРОМ-2013» [21, 22] предназначен для проектирования раскроя в условиях крупносерийного и массового производства деталей из листового/ рулонного материала на плоские прямоугольные заготовки с учетом производственных и технологических ограничений и с применением нового показателя оптимизации (РСП). Программа «ПРОМ-2013» официально зарегистрирована (свидетельство о регистрации программы №2016611103) [23] и содержит два интегрированных модуля: выполненных на базе классификаторов действующего производства справочников деталей и материалов (рис. 3), и модуля расчета оптимального раскроя металлопроката с определением нового ресурс-стоимостного показателя [24].

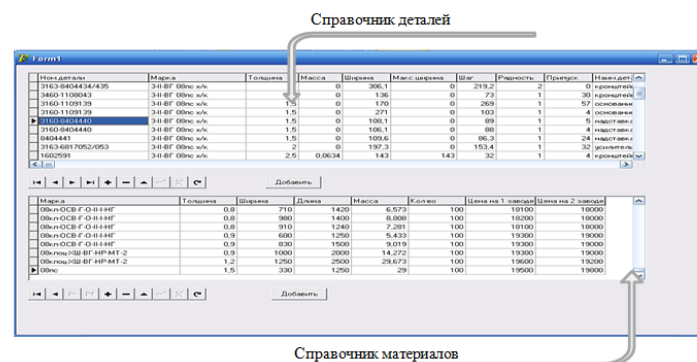


Рис. 3. Фрагмент справочников деталей и материалов

При формировании задания на раскрой по ключевым параметрам толщине и марке материала из справочника материалов выбираются листы (с ценой), и согласно производственному заданию из справочника деталей отбираются детали, изготавливаемые из заданного материала. По окончании формирования задания выполняется расчет, итоговый результат которого представлен на рис. 4.

Рис. 4. Пример итогового результата с определением КИМ и РСР

С помощью программы «ПРОМ-2013» в составе САПР решаются следующие задачи: экономия металла за счет применения экономико-математических методов при расчете оптимального раскроя листового и рулонного проката; определение экономически и технологически обоснованных норм расхода проката; сокращение сроков подготовки производства новых изделий и повышение производительности труда инженерно-технических работников; снижение трудоемкости нормирования технологических процессов; оперативность раскроя поступившего на замену металла и повышение коэффициента его использования при замене; повышение качества проектных работ и технической документации.

Рис. 5. Пример заполнения формы «Детали» - «Карты раскрыя материала»

145

дулей или в комбинации с несколькими модулями при выполнении одного задания на проектирование. На рис. 6 показана схема взаимодействия модулей в системе расчета раскроя. ПМК «ЛИСТ» и ПМК «РУЛОН» (рис. 7) предусматривают работу в режиме подготовки производства и действующего изготовления.

Для расчета планируемого расхода металла с максимальным КИМ и минимальным потреблением предусмотрено два режима на стадии подготовки производства:

- ◆ Расчет группы деталей изделия одного наименования в одном цехе.
- ◆ Расчет группы деталей изделия одного наименования независимо от цеха. Система осуществляет закрепление деталей по цехам с целью оптимального использования отходов и сокращения логистических расходов.



Рис. 6. Схема взаимодействия модулей в системе расчета раскроя



Рис. 7. Подмодули программно-методического комплекса «Рулон»

На стадии изготовления определение фактического расхода проката осуществляется в двух направлениях:

- ◆ Расчет потребности материала по производственному плану (по изделию или поддетальному плану). Этот режим обеспечивает расчет необходимого количества деталей с учетом плана производства изделий, комплектности деталей на заданные изделия и наличия деталей в незавершенном производстве.
- ◆ Оперативный расчет дефицитных деталей при поступлении на раскрой проката с отклонениями от технологии.

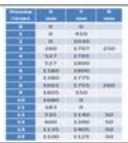
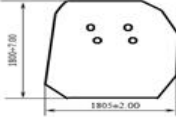
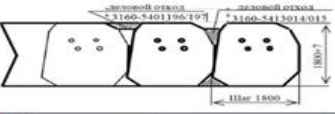
Применение полученных результатов. Тестирование нового программного продукта «ПРОМ-2013», в котором реализованы предложенные модель и алгоритм оптимизации раскроя металлопроката проходило на базе ООО «УАЗ». Основой для

тестирования были полученные решения раскроя заготовок для номенклатуры деталей, изготавливаемых в прессовом цехе ООО «УАЗ», при наличии технологических ограничений. Для этого были отобраны заготовки-представители различных видов. Полученные результаты в ходе тестирования (техничко-экономические показатели раскроя: норма расхода, потребность в металле, коэффициент использования материала, критерий оптимизации РСП) сопоставлены с технологическими данными решения раскроя на производстве. Система также протестирована на этапе ТПП новых образцов автомобилей УАЗ-«Patriot» для прогнозирования конкурентоспособности.

Эффективность разработанного алгоритма по оптимизации раскроя с применением ПО «ПРОМ-2013» показана на примере детали «Панель боковины». Предложен экономически более выгодный вариант раскроя в зависимости от показателя РСП с заказом рулонного металлопроката на другом металлургическом комбинате и экономией 36,8 тонн и 1,64 млн. руб. Осуществлен подбор отходов для изготовления других деталей данной группы. Результатом проектирования раскроя с применением «ПРОМ-2013» является формирование карт раскроя для детали-донора и деталей-акцепторов. Общие характеристики этапов проектирования оптимального раскроя приведены в табл. 1 с исчерпывающей информацией, касающейся расчетных и проектных процедур в рамках использования САПР.

Таблица 1

Этапы проектирования раскроя заготовок детали «Панель боковины»

Этапы работ	Эскиз	Фото
1 Построение фасонной заготовки по узловым точкам, заданным в координатной форме		
2 Проектирование оптимальных геометрических размеров заготовки Формирование данных для последующего раскроя проката на заготовке	Данные для раскроя: тип укладки - односторонняя ширина полосы - 1800 мм переноска по шагу - 0 мм по ширине - 0 мм, по длине - 5 мм 	
3 Составление схемы оптимального раскроя рулона	Концевой притес для получения последней детали - 10 мм Заготовки удаляются на переднее станилинующее устройство, Отходы удаляются в тип и по фронт. Норма расхода L - 23,050 кг, КПМТ - 0,369. 	
4 Подбор отходов для изготовления более мелких деталей - рациональное использование металла	Детские отходы-высечки от отрезки заготовки используются на детали: «Панель пола наливной горюющей» (масса 0,36 кг) и «Крышка пола наливной горюющей» (масса 0,206 кг), КПМТ - 0,393. 	
5 Формирование выходного документа - карты раскроя детали-донора		
6 Формирование выходных документов - карт раскроя деталей-акцепторов		

Заключение. Разработанные и официально зарегистрированные база данных и программа САПР «ПРОМ-2013», использующие созданные математическую модель и алгоритм, образовали автоматизированную систему проектирования раскроя открытой архитектуры, работающую в режиме технологической подготовки производства и в режиме текущего производства. Программа «ПРОМ-2013» успешно прошла промышленное опробование в ООО «УАЗ» и внедрена в производство в составе автоматизированного рабочего места технолога по раскрою и технологии резки металла с повышением коэффициента использования материала на 3,4–6,8 %, суммарной экономией металла 149 тонн и экономическим эффектом 7,35 млн. рублей, подтвержденным актами внедрения ООО «УАЗ».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гимади Э.Х. О некоторых математических моделях и методах планирования крупномасштабных проектов // Модели и методы оптимизации. – Новосибирск: Наука, 1988. – С. 89-115.
2. Мухачева А.С., Валеева А.Ф., Картак В.М. Задачи двухмерной упаковки в контейнеры: новые подходы к разработке методов локального поиска оптимума. – М.: МАИ, 2004. – 193 с.
3. Мухачева Э.А., Верхотуров М.А., Мартынов В.В. Модели и методы расчета раскроя-упаковки геометрических объектов. – Уфа: УГАТУ, 1998. – 216 с.
4. Липовецкий А.И. Геометрический подход к вычислению оптимума в задаче прямоугольного раскроя // Тр. Санкт-Петербургского математического общества. – 2007. – Т. 13. – С. 121-142.
5. Сиразетдинов Т.М. Проектирование гильотинного раскроя листового и рулонного материала с использованием послонных алгоритмов: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.12. – Уфа, 2004. – 139 с.
6. Файзрахманов Р.И. Оптимизация процесса раскроя промышленных материалов по критерию минимума материальных потерь при наличии технологических ограничений: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. – Уфа, 2011. – 139 с.
7. Фроловский В.Д. Оптимальное группирование геометрических объектов при проектировании карт раскроя материалов // Программные продукты и системы. – 2000. – № 3. – С. 47-48.
8. Федорина Е.В., Дьяков И.Ф. Применение САПР для автоматизации проектирования раскроя // Вестник УлГТУ. – 2023. – № 1 (101). – С. 29-34.
9. Амбос Э., Нойбауер А., Освальд Ю. и др. Экономия сырья и материалов. – М.: Металлургия, 1989. – 255 с.
10. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. – 6-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979. – 520 с.
11. Мищенко О.В., Федорина Е.В. Разработка технологических процессов раскроя металлопроката холодноштамповочного производства с использованием прогрессивных методов математического моделирования // Известия МГТУ «МАМИ». Серия «Технология машиностроения и материалы». – 2014. – Т. 2, № 1 (19). – С. 33-35.
12. Федорина Е.В., Дьяков И.Ф., Мищенко О.В. Моделирование при оценке металлоемкости продукции // Вузовская наука в современных условиях: сборник материалов 47-й научно-технической конференции. Ч. 1. – Ульяновск: УлГТУ, 2014. – С. 103-106.
13. Бабаев Ф.В. Оптимальный раскрой материалов с помощью ЭВМ. – М.: Машиностроение, 1982. – 168 с.
14. Филимонов В.И., Дьяков И.Ф., Мищенко О.В., Федорина Е.В. Моделирование технологических процессов раскроя металлопроката холодноштамповочного производства // Современные технологии обработки металлов давлением: моделирование, проектирование, производство: материалы международной научно-технической конференции. – М.: Университет машиностроения, 2013. – С. 240-243.
15. Дьяков И.Ф., Федорина Е.В., Мищенко О.В. Классификация деталей для моделирования техпроцесса раскроя металлопроката // Вузовская наука в современных условиях: сборник материалов 48-й научно-технической конференции. Ч. 1. – Ульяновск: УлГТУ, 2014. – С. 103-106.

16. Федорина Е.В., Федорина Е.В., Дьяков И.Ф. Кластер номенклатуры листоштамповочных деталей при проектировании раскроя металлопроката // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2018. – № 1 (25). – С. 203-219.
17. Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2017620130 Российская Федерация. Кластер деталей «ПРОМ-2013» / Дьяков И.Ф., Федорина Е.В. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный технический университет». – № 2016621352; дата поступления 11.10.2016; дата государственной регистрации в Реестре баз данных 1.02.2017. – 81 с.
18. Райан Д. Инженерная графика в САПР. – М.: Мир, 1989. – 391 с.
19. Системы управления базами данных и знаний. – М.: Финансы и статистика, 1991. – 352 с.
20. Хорафас Д., Легг С. Конструкторские базы данных. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.
21. Кокорин В.Н., Федорина Е.В., Шакирзянов Р.Ф. Применение программы «ПРОМ-2013» для оценки раскроя металла // Вузовская наука в современных условиях: сборник материалов 48-й научно-технической конференции. Ч. 1. – Ульяновск: УлГТУ, 2014. – С. 74-78.
22. Федорина Е.В., Дьяков И.Ф., Мищенко О.В., Кокорин В.Н. ПРОМ-2013 – Ресурсно-стоимостная оценка эффективности раскроя металлопроката для холодноштамповочного производства // Прогрессивные методы и технологическое оснащение процессов обработки металлов давлением: Матер. международной научно-технической конференции. – СПб.: БГТУ, 2014. – С. 307-310.
23. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016611103 Российской Федерации. Программа раскроя металлопроката «ПРОМ-2013» / Дьяков И.Ф., Федорина Е.В., Креценова К.А. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный технический университет». – №2015661985; дата поступления 8.12.2015; дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 26.01.2016. – 19 с.
24. Федорина Е.В., Дьяков И.Ф. Автоматизированное проектирование ресурсосберегающих технологий раскроя металлопроката в условиях холодноштамповочного производства металлопроката // Автоматизация и современные технологии. – 2018. – № 7 (72). – С. 307-313.

REFERENCES

1. Gimadi E.Kh. O nekotorykh matematicheskikh modelyakh i metodakh planirovaniya krupnomasshtabnykh projektov [On some mathematical models and methods for planning large-scale projects], Modeli i metody optimizatsii [Models and methods of optimization]. Novosibirsk: Nauka, 1988, pp. 89-115.
2. Mukhacheva A.S., Valeeva A.F., Kartak V.M. Zadachi dvukhmernoy upakovki v konteynery: novye podkhody k razrabotke metodov lokal'nogo poiska optimum [Problems of two-dimensional packaging in containers: new approaches to the development of methods for local search for the optimum]. Moscow: MAI, 2004, 193 p.
3. Mukhacheva E.A., Verkhoturov M.A., Martynov V.V. Modeli i metody rascheta raskroya-upakovki geometricheskikh ob"ektov [Models and methods for calculating cutting and packing of geometric objects]. Ufa: UGATU, 1998, 216 p.
4. Lipovetskiy A.I. Geometricheskyy podkhod k vychisleniyu optimuma v zadache pryamougol'nogo raskroya [Geometric approach to calculating the optimum in the problem of rectangular cutting], Tr. Sankt-Peterburgskogo matematicheskogo obshchestva [Proceedings of the St. Petersburg Mathematical Society], 2007, Vol. 13, pp. 121-142.
5. Sirazetdinov T.M. Proektirovanie gil'otinnogo raskroya listovogo i rulonnogo materiala s ispol'zovaniem posloynykh algoritmov: dis. ... kand. tekhn. nauk [Design of guillotine cutting of sheet and roll material using layer-by-layer algorithms: cand. of eng. sc. diss.]: 05.13.12. Ufa, 2004, 139 p.
6. Fayzrakhmanov R.I. Optimizatsiya protsessa raskroya promyshlennykh materialov po kriteriyu minimuma material'nykh poter' pri nalichii tekhnologicheskikh ogranicheniy: dis. ... kand. tekhn. nauk [Optimization of the process of cutting industrial materials according to the criterion of minimum material losses in the presence of technological limitations: cand. of eng. sc. diss.]: 05.13.01. Ufa, 2011, 139 p.
7. Frolovskiy V.D. Optimal'noe gruppirovaniye geometricheskikh ob"ektov pri proektirovanii kart raskroya materialov [Optimal grouping of geometric objects when designing cutting charts for materials], Programmye produkty i sistemy [Software products and systems], 2000, No. 3, pp. 47-48.

8. *Fedorina E.V., D'yakov I.F.* Primenenie SAPR dlya avtomatizatsii proektirovaniya raskroya [Application of CAD for automation of cutting design], *Vestnik UIGTU* [Bulletin of UISTU], 2023, No. 1 (101), pp. 29-34.
9. *Ambos E., Noybauer A., Osval'd Yu. i dr.* Ekonomiya syr'ya i materialov [Saving raw materials and materials]. Moscow: Metallurgiya, 1989, 255 p.
10. *Romanovskiy V.P.* Spravochnik po kholodnoy shtampovke [Handbook of Cold Forming]. 6th ed. Leningrad: Mashinostroyeniye. Leningr. otd-nie, 1979, 520 p.
11. *Mishchenko O.V., Fedorina E.V.* Razrabotka tekhnologicheskikh protsessov raskroya metalloprokata kholodnoshtampovochного производства s ispol'zovaniem progressivnykh metodov matematicheskogo modelirovaniya [Development of technological processes for cutting cold-forming metal products using advanced methods of mathematical modeling], *Izvestiya MGTU «MAMI». Seriya «Tekhnologiya mashinostroyeniya i materialy»* [Proceedings of MSTU "MAMI". Series "Mechanical Engineering Technology and Materials"], 2014, Vol. 2, No. 1 (19), pp. 33-35.
12. *Fedorina E.V., D'yakov I.F., Mishchenko O.V.* Modelirovaniye pri otsenke metalloemkosti produktsii [Modeling in assessing the metal consumption of products], *Vuzovskaya nauka v sovremennykh usloviyakh: sbornik materialov 47-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [University science in modern conditions: collection of materials of the 47th scientific and technical conference]. Part 1. Ul'yanovsk: UIGTU, 2014, pp. 103-106.
13. *Babaev F.V.* Optimal'nyy raskroy materialov s pomoshch'yu EVM [Optimal cutting of materials using a computer]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1982, 168 p.
14. *Filimonov V.I., D'yakov I.F., Mishchenko O.V., Fedorina E.V.* Modelirovaniye tekhnologicheskikh protsessov raskroya metalloprokata kholodnoshtampovochного производства [Modeling of technological processes for cutting cold-forming metal products], *Sovremennyye tekhnologii obrabotki metallov davleniem: modelirovaniye, proektirovaniye, proizvodstvo: materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Modern technologies for metal forming: modeling, design, production: materials of the international scientific and technical conference]. Moscow: Universitet mashinostroyeniya, 2013, pp. 240-243.
15. *D'yakov I.F., Fedorina E.V., Mishchenko O.V.* Klassifikatsiya detaley dlya modelirovaniya tekhnoprotsessa raskroya metalloprokata [Classification of parts for modeling the technological process of cutting rolled metal], *Vuzovskaya nauka v sovremennykh usloviyakh: sbornik materialov 48-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [University science in modern conditions: collection of materials of the 48th scientific and technical conference]. Part 1. Ul'yanovsk: UIGTU, 2014, pp. 103-106.
16. *Fedorina E.V., Fedorina E.V., D'yakov I.F.* Klaster nomenklatury listoshtampovochnykh detaley pri proektirovanii raskroya metalloprokata [Cluster of nomenclature of sheet metal stamping parts when designing cutting of rolled metal], *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* [Models, systems, networks in economics, technology, nature and society], 2018, No. 1 (25), pp. 203-219.
17. *D'yakov I.F., Fedorina E.V.* Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii bazy dannykh №2017620130 Rossiyskaya Federatsiya. Klaster detaley «PROM-2013» [Certificate of state registration of the database No. 2017620130 Russian Federation. Cluster of parts "PROM-2013"]. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ulyanovsk State Technical University". No. 2016621352; date of admission 10/11/2016; date of state registration in the Database Register 02/1/2017, 81 p.
18. *Rayan D.* Inzhenernaya grafika v SAPR [Engineering graphics in CAD]. Moscow: Mir, 1989, 391 p.
19. *Sistemy upravleniya bazami dannykh i znaniy* [Database and knowledge management systems]. Moscow: Finansy i statistika, 1991, pp. 352.
20. *Khorafas D., Legg S.* Konstruktorskie bazy dannykh [Design databases]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1990, 224 p.
21. *Kokorin V.N., Fedorina E.V., Shakirzyanov R.F.* Primeneniye programmy «PROM-2013» dlya otsenki raskroya metalla [Application of the PROM-2013 program for assessing metal cutting], *Vuzovskaya nauka v sovremennykh usloviyakh: sbornik materialov 48-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [University science in modern conditions: collection of materials of the 48th scientific and technical conference]. Part 1. Ul'yanovsk: UIGTU, 2014, pp. 74-78.

22. Fedorina E.V., D'yakov I.F., Mishchenko O.V., Kokorin V.N. PROM-2013 – Resursno-stoimostnaya otsenka effektivnosti raskroya metalloprokata dlya kholodnoshtampovogochnogo proizvodstva [PROM-2013 – Resource-cost assessment of the efficiency of cutting rolled metal for cold forming production], *Progressivnye metody i tekhnologicheskoe osnashchenie protsessov obrabotki metallov davleniem: Mater. mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Progressive methods and technological equipment of metal forming processes: Mater. international scientific and technical conference], Saint Petersburg: BGTU, 2014, pp. 307-310.
23. D'yakov I.F., Fedorina E.V., Kreshchenova K.A. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM №2016611103 Rossiyskaya Federatsiya. Programma raskroya metalloprokata «PROM-2013» [Certificate of state registration of a computer program No. 2016611103 Russian Federation. Metal cutting program “PROM-2013”]. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ulyanovsk State Technical University". No. 2015661985; date of admission 12/8/2015; date of state registration in the Register of Computer Programs 01/26/2016, 19 p.
24. Fedorina E.V., D'yakov I.F. Avtomatizirovannoe proektirovanie resursosberegayushchikh tekhnologiy raskroya metalloprokata v usloviyakh kholodnoshtampovogochnogo proizvodstva metalloprokata [Automated design of resource-saving technologies for cutting rolled metal in conditions of cold stamping production of rolled metal], *Avtomatizatsiya i sovremennye tekhnologii* [Automation and modern technologies], 2018, No. 7 (72), pp. 307-313.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Ю.А. Кравченко.

Федорина Елена Викторовна – Ульяновский государственный технический университет; e-mail: ev.fedorina@sollers-auto.com; г. Ульяновск, Россия; тел. +79093587646; соискатель ученой степени кандидата наук.

Дьяков Иван Федорович – e-mail: i.dyakov@ulstu.ru; д.т.н.; профессор.

Крупенников Олег Геннадьевич – e-mail: krupennikov_oleg@mail.ru; кафедра инновационных технологий в машиностроении; к.т.н.; доцент.

Fedorina Elena Viktorovna – Ulyanovsk State Technical University; e-mail: ev.fedorina@sollers-auto.com; Ulyanovsk, Russia; phone: +79093587646; applicant for the scientific degree of Candidate of Sciences.

Dyakov Ivan Fedorovich – e-mail: i.dyakov@ulstu.ru; dr. of eng. sc.; professor.

Krupennikov Oleg Gennadievich – e-mail: krupennikov_oleg@mail.ru; the department of innovative technologies in mechanical engineering; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 004.89

DOI 10.18522/2311-3103-2023-4-151-162

В.А. Частикова, Д.А. Любич

НЕЙРОСЕТЕВОЙ МЕТОД ПОВЕДЕНЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ДИНАМИКИ НАЖАТИЯ КЛАВИШ*

На сегодняшний день причиной большого количества утечек информации является компрометация данных учетных записей. В связи с этим все более актуальной задачей становится внедрение дополнительных средств идентификации и аутентификации. В данной работе на основе методов машинного обучения предложена технология использования динамики нажатия клавиш для идентификации авторизованных пользователей. Для анализа динамики нажатия применяется аппарат глубоких нейронных сетей. В работе проанализированы такие поведенческие характеристики, как время нажатия клавиши, время между нажатиями клавиш, время между отпусканием первой клавиши и нажатием второй. В процессе исследований было предложено использовать следующие архитектуры глубоких нейронных сетей: сверточные и рекуррентные нейронные сети. Первичную обра-

* Работа выполнена в рамках гранта ИБ МТУСИ № 04/22-д.

ботку входных данных осуществляет скользящее окно, которое формирует блоки данных определенного размера. Для дальнейшего анализа уже структурированного массива данных была выбрана одномерная сверточная нейронная сеть, так как она хорошо справляется с задачами обработки данных, представленных в виде последовательности. Для анализа временных зависимостей используется рекуррентная нейронная сеть, а именно архитектура LSTM, лучшие всего показавшая себя при обработке последовательностей переменной длины и меньше других подверженная затуханию и взрыву градиента. В процессе экспериментальной проверки эффективности предложенной в работе методики поведенческого анализа пользователей на основе динамики нажатия клавиши были реализованы следующие архитектуры: 2xLSTM, 1D CHC + LSTM, 1D CHC + 2xLSTM. По результатам обучения моделей было выявлено, что лучшей точностью обладает система, основанная на архитектуре 1D CHC + 2xLSTM с размером скользящего окна равном 50. Валидационная точность данной архитектуры составила 98,29%. Были построены ROC-кривые, которые подтвердили эффективность данной архитектуры, а также рассчитана F-мера, показавшая, что наибольшая производительность бинарной классификации достигается при использовании архитектуры 1D CHC + 2xLSTM с размером скользящего окна равном 50 и равна 99,39%.

Биометрическая идентификация; рекуррентная нейронная сеть; сверточная нейронная сеть; поведенческий анализ; скользящее окно; динамика нажатия клавиши; информационная безопасность.

V.A. Chastikova, D.A. Lyubich

NEURAL NETWORK METHOD OF USER BEHAVIOR ANALYSIS BASED ON KEYSTROKE DYNAMICS

The reason for most of the information leaks is the compromise of account data. In this regard, the introduction of additional means of identification and authentication is relevant. To increase efficiency, these systems are developed using machine learning. The use of neural networks is currently the most promising approach to improving the security of systems due to their speed and accuracy. This paper discusses the use of keystroke dynamics to identify authorized users. Artificial neural networks are used to analyze the dynamics of pressing. In this paper, such characteristics as the time of pressing a key, the time between keystrokes, the time between releasing the first key and pressing the second were analyzed. Both convolutional and recurrent neural networks were used. The primary processing of input data was carried out by a sliding window that formed data blocks of a certain size. For further processing of already structured data, a one-dimensional convolutional neural network was chosen, since it is well suited for processing data presented in the form of a sequence. A recurrent neural network, namely the LSTM architecture, was used to process time dependencies, since it processes variable-length sequences best and is less susceptible to gradient decay and explosion than others. For experimental verification of the effectiveness of this technique, the following architectures were implemented: 2xLSTM, 1D SNC + LSTM, 1D SNC + 2xLSTM. Based on the results of model training, it was revealed that the system based on the 1D SNC + 2xLSTM architecture with a sliding window size of 50 has the highest accuracy. The validation accuracy of this architecture was 98.29%. ROC curves were constructed, which confirmed the effectiveness of this architecture. The F-measure was calculated, which showed that the highest performance of binary classification is achieved when using the 1D SNC + 2xLSTM architecture with a sliding window size of 50 and equal to 99.39%.

Biometric identification; recurrent neural network; convolutional neural network; behavioral analysis; sliding window; keystroke dynamics; information security.

Введение. С каждым годом уровень цифровизации и автоматизации всех сфер нашей жизни растет в геометрической прогрессии. Огромные объемы информации собираются и хранятся на серверах компаний. Согласно исследованиям IDC (International Data Corporation) за 2020 год объем данных в мире достиг 59 зеттабайт (59 триллионов гигабайт) и продолжает расти согласно закону Мура – в два раза каждые два года. К 2025 году прогнозируется 175 зеттабайт информации во всем мире.

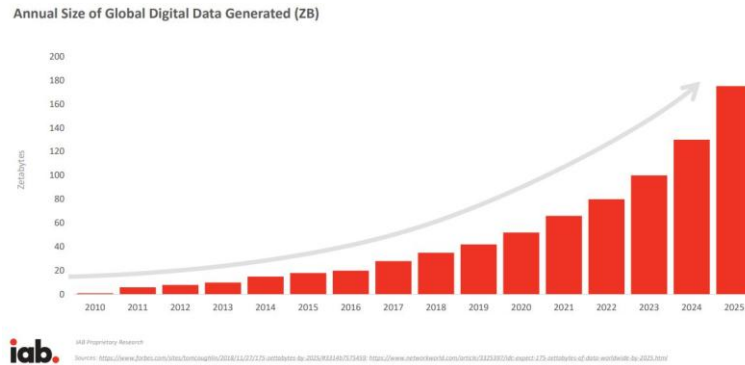


Рис. 1. Общий объем цифровой информации в мире [2]

С увеличением объемов данных увеличивается и количество утечек информации. Согласно многочисленным отчетам компаний, занимающихся расследованием инцидентов в сфере информационной безопасности, более половины утечек информации происходят из-за скомпрометированной учетной записи. Чтобы предотвратить атаки с использованием учетной записи сотрудника, специалистами в сфере информационной безопасности разрабатываются и внедряются средства защиты на основе современных технологий, таких как нейронные сети, искусственные иммунные системы. Самым популярным методом такого рода защиты на данный момент является многофакторная аутентификация. Она предотвращает авторизацию нарушителя, укравшего логин и пароль учетной записи пользователя.

С развитием нейронных сетей возросла актуальность и эффективность биометрических систем аутентификации пользователей. Нейронные сети стали быстрее и точнее обрабатывать биометрическую информацию пользователей, что сделало данную технологию самым популярным средством многофакторной аутентификации [3, 4].

Биометрические данные делится на два вида:

- ◆ Статический (физиологический) – анализ неизменных физиологических характеристик человека, таких как геометрия лица, отпечатки пальцев, сетчатка глаза, геометрия ладони.
- ◆ Динамический (поведенческий) – анализ поведенческих характеристик человека, таких как подпись, динамика нажатия клавиш, походка, голос.

В настоящее время набирают популярность системы аутентификации, построенные на анализе поведенческих характеристик. Наиболее актуальные из них: голос, динамика нажатия клавиш и подпись. Использование анализа динамики нажатия клавиш для аутентификации пользователей является самым удобным методом двухфакторной аутентификации, так как не требует дополнительных устройств. Данный метод может быть интегрирован в процесс авторизации пользователя при входе в систему, либо работать постоянно в фоновом режиме.

Целью данной работы является построение методики поведенческого анализа пользователей на основе динамики нажатия клавиш.

Материалы и методы исследования. Принцип идентификации пользователей на основе цифрового почерка строится на анализе временных характеристик нажатия клавиш. Основными такими характеристиками являются:

- ◆ время нажатия клавиши (H);
- ◆ время между нажатиями клавиш (DD-time);
- ◆ время между отпусканием первой клавиши и нажатием второй (UD-time).

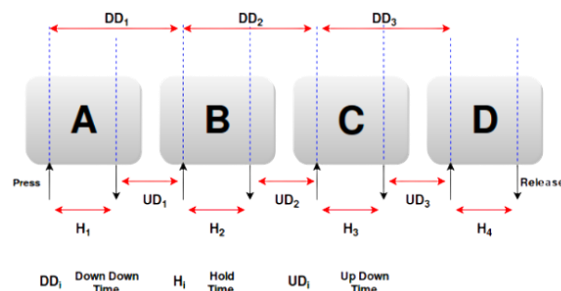


Рис. 2. Временные характеристики динамики нажатия клавиш

Существуют два метода анализа временных характеристик нажатия клавиш: статистический и нейросетевой.

Статистические модели вычисляют средние значения, отклонения и другие математические характеристики между различными нажатиями клавиш. Принимая эти результаты за индивидуальные характеристики нажатия клавиш, система изучает индивидуальные шаблоны нажатий с помощью обычного алгоритма машинного обучения. Однако трудно проанализировать сложное и разнообразное поведение человека при нажатии клавиш, используя только статистические характеристики нажатия клавиш. Когда система содержит большой объем персональных данных о нажатии клавиш, она может характеризовать только частичное поведение при печати, что приводит к низкой точности. Таким образом, надежность и масштабируемость модели, созданной с помощью этого метода, оставляют желать лучшего.

Нейросетевые методы анализа динамики нажатия клавиш позволяют обрабатывать большие объемы данных и выделять скрытые зависимости между временными характеристиками. Основные подходы:

1. Рекуррентные нейронные сети (RNN) – входные данные представляются в виде последовательности векторов, где каждый вектор содержит информацию о времени нажатия клавиши, времени ее отпущения и других характеристиках нажатия.
2. Сверточные нейронные сети (CNN) – входные данные представляются в виде спектрограмм, которые отображают динамику нажатия клавиш в течение времени.
3. Комбинации рекуррентной и сверточной нейронных сетей (RNN + CNN) – перед тем как представить входные данные в виде последовательности векторов для обработки RNN, производится процесс свертки CNN.

В целом, нейросетевые методы обладают высокой точностью. Однако для их эффективного применения необходимо иметь большой объем данных и достаточно мощный вычислительный ресурс для обучения нейронных сетей.

Рассмотрим основные преимущества нейросетевых алгоритмов.

Обнаружение сложных и неочевидных закономерностей. Нейронные сети обладают способностью находить и моделировать сложные и нелинейные взаимосвязи в данных.

Автоматическое извлечение признаков. Нейронные сети могут самостоятельно извлекать значимые признаки из входных данных без явного определения или предварительной обработки признаков.

Гибкость и адаптивность. Нейронные сети способны обучаться на данных и адаптироваться к изменениям в распределении или характере данных.

Улучшенная точность прогнозирования. За счет своей способности обнаруживать сложные закономерности и автоматически извлекать признаки, нейронные сети могут предоставлять более точные прогнозы или классификации в сравнении со статистическими моделями.

Работа с неструктурированными данными. Нейронные сети могут эффективно работать с неструктурированными данными, включая сырые временные ряды или последовательности нажатия клавиш.

Возможность обучения на больших объемах данных. Нейронные сети способны использовать большие объемы данных для обучения и достижения более высокой точности.

Рекуррентные нейронные сети. Рекуррентные нейронные сети (РНС) – это класс нейронных сетей, предназначенный для обработки последовательностей данных. Они обладают способностью сохранять информацию о предыдущих состояниях, что позволяет учиться на зависимостях внутри последовательностей и моделировать долгосрочные зависимости. РНС состоит из повторяющегося блока, который принимает на вход текущий элемент последовательности и скрытое состояние, и генерирует новое скрытое состояние. Таким образом, РНС может улавливать контекстуальную информацию и динамику в последовательностях переменной длины. На рис. 3 представлена схема рекуррентной нейронной сети.

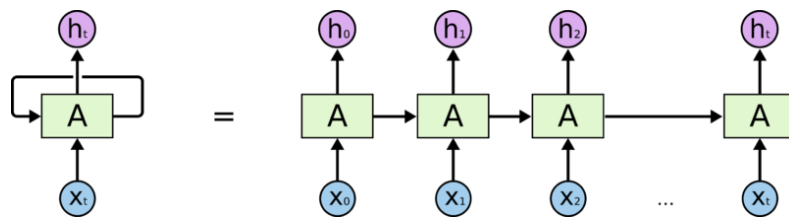


Рис. 3. Схема РНС [5]

Существуют различные архитектуры РНС, которые применяются для анализа последовательностей переменной длины. Наиболее распространенные архитектуры:

- ♦ Простые рекуррентные нейронные сети. Это базовая архитектура РНС, в которой каждый блок имеет одно скрытое состояние. Однако, простые РНС имеют проблему затухания или взрыва градиента и не всегда способны улавливать долгосрочные зависимости.

- ♦ LSTM (Long Short-Term Memory). LSTM – это модификация РНС, которая вводит дополнительные "ворота" для контроля потока информации. Они включают в себя ворота забывания, входа и выхода, которые помогают моделировать долгосрочные зависимости и контролировать поток информации через время [6, 7].

- ♦ GRU (Gated Recurrent Unit). GRU – это еще одна модификация РНС, которая также использует ворота, но имеет более простую структуру, чем LSTM. GRU имеет ворота обновления и ворота сброса, которые позволяют моделировать и запоминать информацию на разных временных масштабах.

Для поведенческого анализа пользователей на основе динамики нажатия клавиш больше всего подходит архитектура LSTM. Она лишена большинства недостатков простой РНС, обладает гибкостью и позволяет обрабатывать последовательности переменной длины.

Сверточные нейронные сети. Сверточная нейронная сеть (СНС) – это класс нейронных сетей, который специализируется на обработке изображений. СНС хорошо улавливают локальный контекст, когда носители информации находятся рядом. Архитектура сверточной нейронной сети представлена на рис. 4.

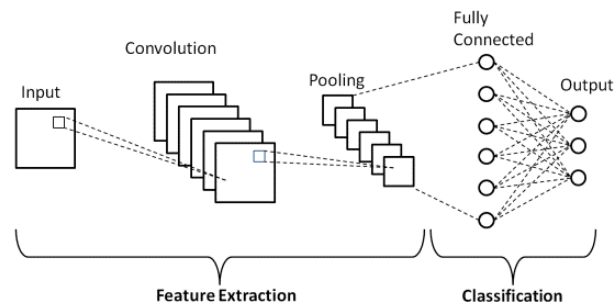


Рис. 4. Архитектура сверточной нейронной сети [8]

Основные виды сверточных нейронных сетей:

♦ 1D CNN (одномерные сверточные нейронные сети). Предназначены для обработки последовательностей данных, где каждый элемент в последовательности имеет одну или несколько признаков.

♦ 2D CNN (двумерные сверточные нейронные сети). Предназначены для обработки двумерных данных, таких как изображения. В этом случае данные представляются в виде матрицы или тензора, где каждый элемент матрицы представляет пиксель изображения или значение признака.

♦ 3D CNN (трехмерные сверточные нейронные сети). Предназначены для обработки трехмерных данных, таких как объемные изображения (например, медицинские сканы) или видео. В этом случае данные представляются в виде трехмерного тензора, где каждый элемент представляет объемный пиксель или значение признака.

Для анализа динамики нажатия клавиш была выбрана одномерная сверточная нейронная сеть, так как она:

1. Хорошо подходит для обработки данных, представленных в виде последовательности, так как она способна обнаруживать локальные временные зависимости и выявлять шаблоны изменений во времени.
2. Способна локально свертывать и обнаруживать признаки во временных рядах.
3. Имеет небольшое количество параметров, что делает ее более эффективной в обучении. Это особенно важно, когда необходимо работать с большими объемами данных.
4. Позволяет гибко настраивать размер сверточного окна для поиска различных закономерностей.

Эксперименты. В ходе исследования были проведены эксперименты с различными архитектурами нейронных сетей, их комбинациями и размерами скользящего окна. Были протестированы следующие архитектуры:

- 1) 1D CNN + LSTM

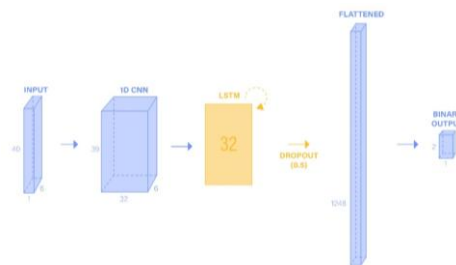


Рис. 5. Архитектура 1D CNN + LSTM

2) 1D CHC + 2xLSTM

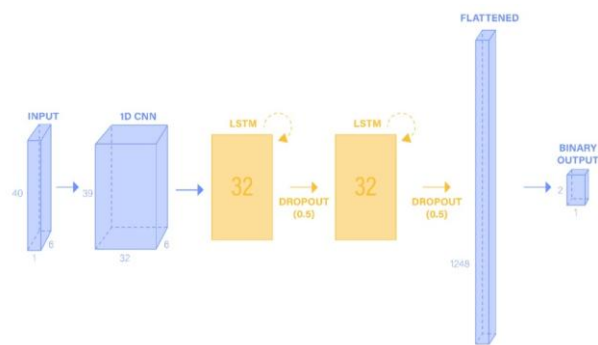


Рис. 6. Архитектура 1D CNN + 2xLSTM

3) 2xLSTM

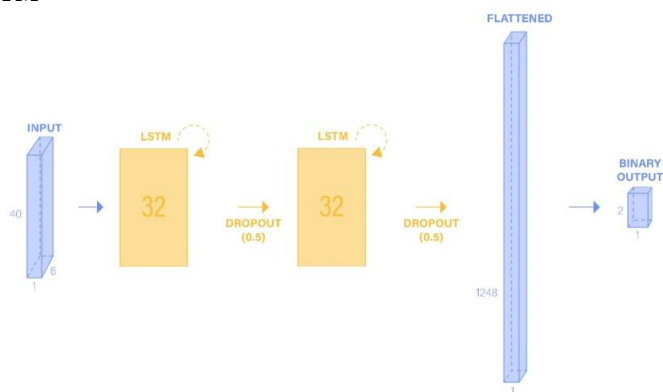


Рис. 7. Архитектура 2xLSTM

Скользящее окно в экспериментах имело размер 20, 30, 40 и 50. Результаты этих исследований представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты обучения моделей

Модель	Параметры				
	Размер окна	Потери	Точность	Валидационные потери	Валидационная точность
1D CHC+ 2xLSTM PHC	20	0.2494	0.8960	0.2424	0.9033
	30	0.1410	0.9414	0.1423	0.9410
	40	0.0686	0.9751	0.0831	0.9697
	50	0.0502	0.9817	0.0521	0.9829
1D CHC + LSTM PHC	20	0.2507	0.8927	0.2335	0.9001
	30	0.1092	0.9558	0.1043	0.9561
	40	0.0757	0.9718	0.0824	0.9707
	50	0.0211	0.9927	0.0188	0.9957
2xLSTM PHC	40	0.1911	0.9198	0.1815	0.9277

Из таблицы следует, что самой эффективной моделью является комбинация 1D CNN и двух LSTM, а размер окна – 50. Точность данной модели равняется 0.9927.

Также были построены ROC графики, позволяющие оценить качество бинарной классификации.

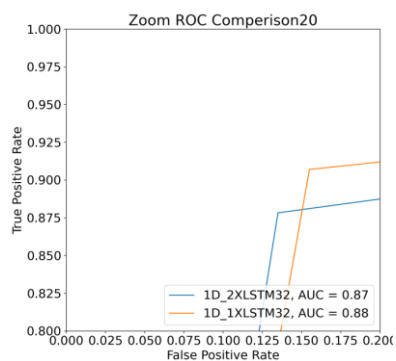


Рис. 8. ROC график для моделей с размером окна 20

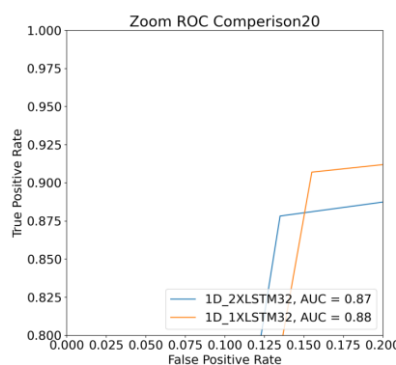


Рис. 9. ROC график для моделей с размером окна 30

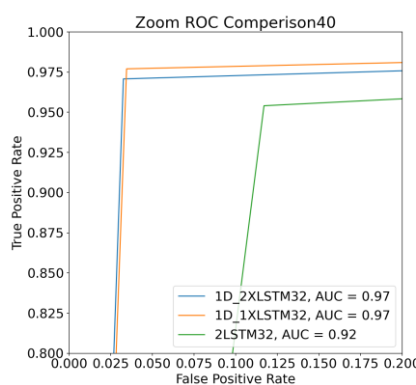


Рис. 10. ROC график для моделей с размером окна 40

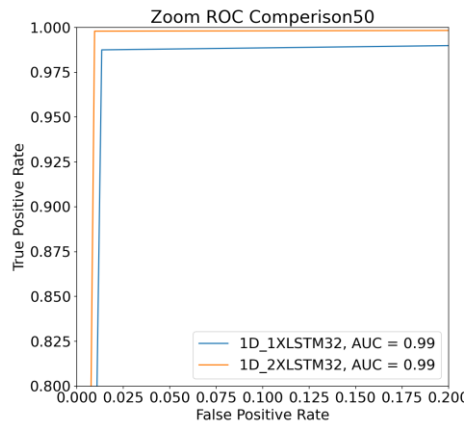


Рис. 11. ROC график для моделей с размером окна 50

Была рассчитана F-мера, которая позволяет оценить производительность бинарной классификации. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

F-мера рассматриваемых моделей

Модель	Размер окна	F-мера
1D CHC+ 2xLSTM PHC	20	0.8602
	30	0.9428
	40	0.9677
	50	0.9937
1D CHC + LSTM PHC	20	0.8658
	30	0.9299
	40	0.9699
	50	0.9864
2xLSTM PHC	40	0.9167

Исходя из результатов исследований, можно сделать вывод о том, что лучшей моделью с точки зрения точности является комбинация 1D CHC и двух LSTM PHC с размером скользящего окна 50.

Выводы. Как уже было сказано ранее, наибольшая точность системы достигается при размере скользящего окна равном 50. Однако в данном случае требуется достаточно большой объем входных данных для определения нарушителя. Поэтому для поведенческого анализа пользователя в режиме реального времени может быть уместно использовать меньший размер, например, 40.

Кроме того, для большей точности необходимо использовать данные конкретного пользователя при обучении. В таком случае можно использовать еще меньший размер скользящего окна, что позволит обнаружить вторжение раньше. В данном случае потребуется обучать модель для каждого отдельного пользователя, что может быть довольно проблематично и ресурсозатратно.

Разработанная методика может значительно повысить безопасность информационной системы и предотвратить утечки информации. Ее можно применять как самостоятельное средство защиты, так и как модуль уже существующей системы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Николенко С.И., Кадурич А., Архангельская Е.В.* Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей. – 2018. – 481 с.
2. When Simple Statistical Algorithms Outperform Deep Learning: A Case of Keystroke Dynamics // Ahmed Anu Wahab, Daqing Hou. – Режим доступа: <https://www.scitepress.org/Papers/2023/116841/116841.pdf> (дата обращения: 1.06.2023).
3. *Частикова В.А., Васильев Е.Д., Бабич Д.В.* Нейросетевая методика идентификации лиц в видеопотоке в условиях ограниченности данных // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. – 2019. – № 3 (246). – С. 85-90.
4. *Частикова В.А., Титова А.А., Войлова Д.О.* Аналитический обзор методов идентификации личности на основе биометрических характеристик // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. – 2022. – № 1 (296). – С. 92-112.
5. Данные. – Режим доступа: <https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Данные> (дата обращения: 20.04.2023).
6. Understanding LSTM Networks. – Режим доступа: <http://colah.github.io/posts/2015-08-Understanding-LSTMs/> (дата обращения: 1.06.2023).
7. *Частикова В.А., Жерлицын С.А., Воля Я.И., Сотников В.В.* Нейросетевая технология обнаружения аномального сетевого трафика // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2020. – № 1 (49). – С. 20-32.
8. Basic CNN Architecture: Explaining 5 Layers of Convolutional Neural Network. – Режим доступа: <https://www.upgrad.com/blog/basic-cnn-architecture/> (дата обращения: 1.06.2023).
9. *Гелиг А.Х., Матвеев А.С.* Введение в математическую теорию обучаемых распознающих систем и нейронных сетей: учеб. пособие: монография. – М.: Изд-во СПбГУ, 2014. – 224 с.
10. *Круглов В.В., Борисов В.В.* Искусственные нейронные сети. Теория и практика: монография. – 2-е изд., стер. – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 382 с.
11. *Франсуа Шолле.* Глубокое обучение на Python. – СПб.: Изд-во «Питер», 2020. – 576 с.
12. *Гудфеллоу Ян, Бенджио Йозуа.* Глубокое обучение. – М.: Изд-во «ДМК Пресс», 2017. – 654 с.
13. *Воропа В.А.* Биометрическая идентификация личности. – М.: Изд-во «Горячая Линия – Телеком», 2021. – 228 с.
14. *Хайкин С.* Нейронные сети. Полный курс. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2018. – 1104 с.
15. *Рышард Т.* Элементарное введение в технологию нейронных сетей с примерами программ. – М., 2011. – 408 с.
16. *Пал С., Джудли А.* Библиотека Keras – инструмент глубокого обучения. М.: ДМК Пресс, 2018. – 294 с.
17. *Васильев А.Н., Тархов Д.А.* Принципы и техника нейросетевого моделирования. – М.: Высшая школа, 2014. – 218 с.
18. *Chastikova V.A., Sotnikov V.V.* Method of analyzing computer traffic based on recurrent neural networks // Journal of Physics: Conference Series. International Conference "High-Tech and Innovations in Research and Manufacturing," HIRM 2019. – 2019. – P. 012133.
19. *Частикова В.А., Жерлицын С.А.* Нейросетевая методика идентификации личности по рисунку вен ладони // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 4 (228). – С. 192-200.
20. *Частикова В.А., Жерлицын С.А., Войлова Д.О.* Нейросетевая система биометрической идентификации личности по голосу // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. – 2023. – № 1 (316). – С. 70-79.
21. *Артюшина Л.А., Троицкая Е.А.* Некоторые подходы к оценке информативности параметров идентификации пользователей по клавиатурному почерку на основе поведенческой биометрии // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2022. – № 22. – С. 30-38.
22. *Шарилов Р.Р., Ситников А.Н.* Проблемы при разработке систем распознавания пользователей по клавиатурному почерку // Вестник технологического университета. – 2019. – Т. 22, № 10. – С. 143-147.
23. *Еременко Ю.И., Олюнина Ю.С.* Об определении наиболее значимых параметров клавиатурного почерка с помощью регрессионного анализа // Системы управления и информационные технологии. – 2018. – № 2 (72). – С. 28-31.

REFERENCES

1. *Nikolenko S.I., Kadurin A., Arkhangel'skaya E.V.* Glubokoe obuchenie. Pogruzhenie v mir neyronnykh setey [Deep learning. Dive into the world of neural networks], 2018, 481 p.
2. When Simple Statistical Algorithms Outperform Deep Learning: A Case of Keystroke Dynamics // Ahmed Anu Wahab, Daqing Hou. Available at: <https://www.scitepress.org/Papers/2023/116841/116841.pdf> (accessed 1 June 2023).
3. *Chastikova V.A., Vasil'ev E.D., Babich D.V.* Neyrosetevaya metodika identifikatsii lits v videopotoke v usloviyakh ogranichenosti dannykh [Neural network technique for identifying faces in a video stream in conditions of limited data], *Vestnik Adygeyskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 4: Estestvenno-matematicheskie i tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Adygea State University. Series 4: Natural, mathematical and technical sciences], 2019, No. 3 (246), pp. 85-90.
4. *Chastikova V.A., Titova A.A., Voylova D.O.* Analiticheskiy obzor metodov identifikatsii lichnosti na osnove biometricheskikh kharakteristik [Analytical review of personal identification methods based on biometric characteristics], *Vestnik Adygeyskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 4: Estestvenno-matematicheskie i tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Adygea State University. Series 4: Natural, mathematical and technical sciences], 2022, No. 1 (296), pp. 92-112.
5. Danye [Data]. Available at: <https://www.tadviser.ru/index.php/Stat'ya:Danye> (accessed 20 April 2023).
6. Understanding LSTM Networks. Available at: <http://colah.github.io/posts/2015-08-Understanding-LSTMs/> (accessed 1 June 2023).
7. *Chastikova V.A., Zherlitsyn S.A., Volya Ya.I., Sotnikov V.V.* Neyrosetevaya tekhnologiya obnaruzheniya anomal'nogo setevogo trafika [Neural network technology for detecting anomalous network traffic], *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: management and high technologies], 2020, No. 1 (49), pp. 20-32.
8. Basic CNN Architecture: Explaining 5 Layers of Convolutional Neural Network Available at: <https://www.upgrad.com/blog/basic-cnn-architecture/> (accessed 1 June 2023).
9. *Gelig A.Kh., Matveev A.S.* Vvedenie v matematicheskuyu teoriyu obuchaemykh raspoznavayushchikh sistem i neyronnykh setey: ucheb. posobie: monografiya [Introduction to the mathematical theory of learning recognition systems and neural networks: textbook. manual: monograph]. Moscow: Izd-vo SPbGU, 2014, 224 p.
10. *Kruglov V.V., Borisov V.V.* Iskusstvennye neyronnye seti. Teoriya i praktika: monografiya [Artificial neural networks. Theory and practice: monograph]. 2nd ed. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2002, 382 p.
11. *Fransua Sholle.* Glubokoe obuchenie na Python [Deep learning in Python]. St. Petersburg: Izd-vo «Piter», 2020, 576 p.
12. *Gudfellow Yan, Bendzhio Ioshua.* Glubokoe obuchenie [Deep learning]. Moscow: Izd-vo «DMK Press», 2017, 654 p.
13. *Vorona V.A.* Biometricheskaya identifikatsiya lichnosti [Biometric personal identification]. Moscow: Izd-vo «Goryachaya Liniya – Telekom», 2021, 228 p.
14. *Khaykin S.* Neyronnye seti. Polnyy kurs [Neural networks. Full course]. 2nd ed. Moscow: Vil'yams, 2018, 1104 p.
15. *Ryshard T.* Elementarnoe vvedenie v tekhnologiyu neyronnykh setey s primerami program [An elementary introduction to neural network technology with example programs], Moscow, 2011, 408 p.
16. *Pal S., Dzhulli A.* Biblioteka Keras – instrument glubokogo obucheniya [The Keras library is a deep learning tool]. Moscow: DMK Press, 2018, 294 p.
17. *Vasil'ev A.N., Tarkhov D.A.* Printsipy i tekhnika neyrosetevogo modelirovaniya [Principles and techniques of neural network modeling]. Moscow: Vysshaya shkola, 2014, 218 p.
18. *Chastikova V.A., Sotnikov V.V.* Method of analyzing computer traffic based on recurrent neural networks, *Journal of Physics: Conference Series. International Conference "High-Tech and Innovations in Research and Manufacturing," HIRM 2019*, 2019, pp. 012133.
19. *Chastikova V.A., Zherlitsyn S.A.* Neyrosetevaya metodika identifikatsii lichnosti po risunku ven ladoni [Neural network technique for identifying a person by the pattern of the veins of the palm], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 4 (228), pp. 192-200.

20. Chastikova V.A., Zherlitsyn S.A., Voylova D.O. Neyrosetevaya sistema biometricheskoy identifikatsii lichnosti po golosu [Neural network system for biometric identification of a person by voice], *Vestnik Adygeyskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 4: Estestvenno-matematicheskie i tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Adygea State University. Series 4: Natural, mathematical and technical sciences], 2023, No. 1 (316), pp. 70-79.
21. Artyushina L.A., Troitskaya E.A. Nekotorye podkhody k otsenke informativnosti parametrov identifikatsii pol'zovateley po klaviaturnomu pocherku na osnove povedencheskoy biometrii [Some approaches to assessing the information content of user identification parameters based on keyboard handwriting based on behavioral biometrics], *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer technologies, control, radio electronics], 2022, No. 22, pp. 30-38.
22. Sharipov R.R., Sitnikov A.N. Problemy pri razrabotke sistem raspoznavaniya pol'zovateley po klaviaturnomu pocherku [Problems in developing user recognition systems based on keyboard handwriting], *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2019, Vol. 22, No. 10, pp. 143-147.
23. Eremenko Yu.I., Olyunina Yu.S. Ob opredelenii naibolee znachimyykh parametrov klaviaturnogo pocherka s pomoshch'yu regressionnogo analiza [On determining the most significant parameters of keyboard handwriting using regression analysis], *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii* [Control systems and information technologies], 2018, No. 2 (72), pp. 28-31.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Р.А. Дьяченко

Частикова Вера Аркадьевна – Кубанский государственный технологический университет; e-mail: chastikova_va@mail.ru; г. Краснодар, Россия; тел.: +79184635536; кафедра кибербезопасности и защиты информации; к.т.н.; доцент.

Любич Денис Андреевич – e-mail: denis23042002@mail.ru; тел: +79886042610; кафедра кибербезопасности и защиты информации; студент.

Chastikova Vera Arkadyevna – Kuban State Technological University; e-mail: chastikova_va@mail.ru; Krasnodar, Russia; phone: +79184635536; the department of cybersecurity and information protection; cand. of eng. sc.; associate professor.

Lyubich Denis Andreevich – e-mail: denis23042002@mail.ru; phone: +79886042610; the department of cybersecurity and information protection; student.

УДК 004.032

DOI 10.18522/2311-3103-2023-4-162-174

С.М. Гушанский, В.С. Потапов

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫХ КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ, ПОДАВЛЕНИЯ И КОРРЕКЦИИ ОШИБОК В КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЯХ

В последние годы квантовые информационные системы привлекают все большее внимание исследователей в области информатики и физики. Однако, внедрение и практическое применение квантовых вычислений ограничено влиянием шумов и ошибок, которые возникают в квантовых системах. Для реализации эффективного управления и повышения надежности квантовых информационных систем необходимо разработать методы, способные подавлять и корректировать ошибки в процессе квантовых вычислений. Цель данной работы состоит в разработке и исследовании модели управления, основанной на помехоустойчивых квантовых вычислениях, а также методов подавления и коррекции ошибок в квантовых вычислениях. В работе предлагается комбинация различных подходов, включающих использование кодов коррекции ошибок, алгоритмов подавления шумов и методов оптимального управления квантовыми информационными системами. В ходе исследования

была разработана модель управления, которая позволяет эффективно обрабатывать информацию в квантовых системах, учитывая наличие шумов и ошибок. Были проведены эксперименты с использованием реальных квантовых устройств, чтобы оценить эффективность предложенной модели. Результаты экспериментов показывают, что разработанный метод способен значительно улучшить надежность и точность квантовых вычислений. Предложенная модель управления на основе помехоустойчивых квантовых вычислений и методы подавления и коррекции ошибок представляют собой значимый вклад в развитие квантовых информационных систем. Дальнейшее развитие и оптимизация предложенного подхода могут привести к созданию более надежных и эффективных квантовых систем, способных к решению сложных вычислительных задач.

Моделирование; квантовая ошибка; кубит; модель квантовой системы; запутывание; суперпозиция; квантовый оператор.

S.M. Gushanskiy, V.S. Potapov

DEVELOPMENT AND STUDY OF A CONTROL MODEL BASED ON NOISE-RESISTANT QUANTUM COMPUTING, SUPPRESSION AND CORRECTION OF ERRORS IN QUANTUM COMPUTING

In recent years, quantum information systems have attracted increasing attention of researchers in the field of computer science and physics. However, the introduction and practical application of quantum computing is limited by the influence of noise and errors that occur in quantum systems. To implement effective control and improve the reliability of quantum information systems, it is necessary to develop methods that can suppress and correct errors in the process of quantum computing. The purpose of this work is to develop and study a control model based on noise-immune quantum computing, as well as methods for suppressing and correcting errors in quantum computing. The paper proposes a combination of different approaches, including the use of error correction codes, noise suppression algorithms, and methods for optimal control of quantum information systems. In the course of the study, a control model was developed that allows efficient processing of information in quantum systems, taking into account the presence of noise and errors. Experiments were carried out using real quantum devices to evaluate the effectiveness of the proposed model. The experimental results show that the developed method can significantly improve the reliability and accuracy of quantum computing. The proposed control model based on noise-immune quantum computing and methods for suppressing and correcting errors represent a significant contribution to the development of quantum information systems. Further development and optimization of the proposed approach can lead to the creation of more reliable and efficient quantum systems capable of solving complex computational problems.

Modeling; quantum error; qubit; model of a quantum system; entanglement; superposition; quantum operator.

Введение. Квантовые информационные системы [1] обещают революционизировать область вычислений и информационных технологий, предоставляя огромный потенциал для решения сложных задач, которые на сегодняшний день остаются недоступными для классических компьютеров. Квантовые вычисления [2] основываются на принципах квантовой механики [3], что позволяет использовать явления, такие как квантовая суперпозиция и запутанность [4], для эффективной и параллельной обработки информации. Однако на пути к реализации полноценных квантовых вычислений стоят значительные технические и фундаментальные вызовы. Квантовые системы чрезвычайно чувствительны к воздействию внешних помех [5], что приводит к ошибкам в ходе вычислений. Такие ошибки могут быстро разрушить результаты квантовых вычислений и снизить эффективность системы. В данном исследовании фокусируемся на разработке и исследовании модели управления на основе помехоустойчивых квантовых вычислений, направленной на подавление и коррекцию ошибок в квантовых вычислениях. Целью является создание эффективного метода управления квантовыми информацион-

ными системами, который позволит минимизировать влияние помех и ошибок на результаты квантовых вычислений. Для достижения данной цели предполагается изучение современных методов квантовой коррекции ошибок [6] и разработка новых подходов к управлению квантовыми системами. Также будет проведен анализ различных типов помех, которые могут возникать в квантовых вычислениях, и исследованы методы их подавления. Исследование может включать разработку новых квантовых алгоритмов с учетом коррекции ошибок, а также определение оптимальных стратегий управления для различных типов квантовых информационных систем. Квантовая коррекция ошибок является процессом обнаружения и исправления ошибок, которые могут возникать в квантовых системах в результате взаимодействия с окружающей средой или внутренних помех. Ошибки могут включать декогеренцию [7], ошибки гейтов, ошибки измерения и другие нежелательные эффекты, которые могут искажать квантовое состояние системы.

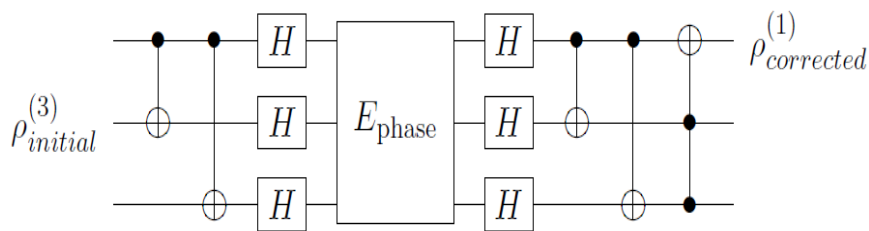


Рис. 1. Схема исправления фазовой ошибки

Основные принципы квантовой коррекции ошибок основаны на использовании квантовой избыточности и квантовой параллельности. Ключевые идеи включают в себя кодирование информации, измерение квантовых состояний и обратную связь для исправления ошибок. Одним из примеров метода квантовой коррекции ошибок является код Шора [8]. Он использует квантовое кодирование и измерение для обнаружения и исправления ошибок в квантовых состояниях. Код Шора включает в себя использование квантовых битов (кубитов [9]) и дополнительных проверочных кубитов, которые позволяют обнаруживать ошибки и восстанавливать исходное состояние. Процесс квантовой коррекции ошибок обычно включает следующие шаги:

1. Квантовое кодирование [10]: исходная информация кодируется в состояния кубитов таким образом, чтобы обнаружить и исправить ошибки. Для этого используются специальные квантовые коды, такие как код Шора или коды стабилизации.
2. Измерение и проверка: кубиты проверяются на наличие ошибок путем измерения и сравнения с ожидаемыми результатами. Если обнаруживается ошибка, система переходит к следующему шагу.
3. Обратная связь и исправление: если ошибка обнаружена, используется обратная связь для коррекции состояния кубитов. Это может включать применение операций коррекции ошибок или перекодирование состояния [11] для исправления ошибок.
4. Повторение процесса: шаги 2 и 3 могут повторяться несколько раз для достижения более высокой точности и надежности исправления ошибок.

Квантовая коррекция ошибок является активной областью исследований в квантовой информатике, и существуют различные подходы и методы для реализации этого процесса. Некоторые из них включают применение поверхностных кодов, кодов Китаева, кодов Стейнера [12] и других помехоустойчивых кодов. Ос-

новная сложность квантовой коррекции ошибок заключается в сохранении квантовой суперпозиции и когерентности состояний при исправлении ошибок. Взаимодействие с окружающей средой может приводить к декогеренции и потере когерентности, что затрудняет процесс исправления ошибок. Поэтому разработка эффективных методов квантовой коррекции ошибок требует учета этих факторов и разработки алгоритмов, способных сохранять когерентность квантовых состояний. Составим формальную постановку задач:

- ◆ Разработка математической модели квантовых вычислений, учитывающей возможность возникновения ошибок и помех в квантовых системах.
- ◆ Исследование методов коррекции ошибок, применимых к квантовым вычислениям, с целью обеспечения надежности и точности результатов.
- ◆ Разработка метода, направленного на повышение помехоустойчивости в квантовых вычислениях.
- ◆ Разработка модели управления, которая включает в себя систему мониторинга и адаптации квантовых вычислений, позволяющую эффективно реагировать на возможные ошибки и помехи.
- ◆ Проведение экспериментов и исследований, чтобы оценить эффективность разработанных методов и модели управления в реальных квантовых вычислительных системах.
- ◆ Анализ и обобщение результатов исследований с целью улучшения помехоустойчивости и надежности квантовых вычислений.

1. Модель управления на основе помехоустойчивых квантовых вычислений, подавления и коррекции ошибок в квантовых вычислениях. Квантовые системы страдают от шума из-за того, что вентили подвержены ошибкам. Кроме того, кубиты страдают от декогеренции, т.е. кубиты спонтанно взаимодействуют с окружающей средой и теряют состояния. Следовательно, вывод квантовой схемы ошибочен. Более глубокая квантовая схема требует больше времени для выполнения и подвержена влиянию декогеренции. Большее количество вентиля [13] в схеме также увеличивает накопление ошибки вентиля. Параллельные операции вентиля на разных кубитах могут влиять на производительность друг друга, что известно, как перекрестные помехи.

1.1. Ошибка гейтов. Квантовые вентили реализуются импульсами [14], и импульсы могут быть ошибочными. Например, рассмотрим вентиль $R_Y(\pi/2)$. Из-за вариации импульс, предназначенный для $\pi/2$ оборота, может не привести к точному $\pi/2$ обороту, и он может занижать или переключивать, что приводит к ошибочной логической операции. В результате сбои шлюза вызваны ошибочными логическими операциями. Для существующих систем ошибки вентиля с двумя кубитами (например, ошибка CNOT [15]) на порядок больше, чем ошибки вентиля с одним кубитом. Квантовая схема с большим количеством вентиля будет накапливать больше отказов вентиля, что снижает надежность квантовой программы. Следовательно, целью компиляции и устойчивого к ошибкам отображения является уменьшение количества вентиля в квантовой схеме.

1.2. Релаксация и дефазировка. Декогеренция связана с коротким временем жизни кубита. Кубиты могут взаимодействовать с окружающей средой и самопроизвольно терять свое сохраненное состояние. Например, на рис. 2 показан эффект релаксации, один из видов декогеренции. В результате релаксации [16] кубит в состоянии 1 спонтанно теряет энергию и оказывается в состоянии 0. Декогерентизация кубита обычно характеризуется временем релаксации T_1 и временем дефазировки T_2 . Если время стробирования равно t_g , то примерно $1 - \exp(-t_g/T_1)$ – это вероятность ошибки [17], при которой состояние $|1\rangle$ будет демпфировано. Это означает, что если время операции велико, кубит будет терять свое состояние.

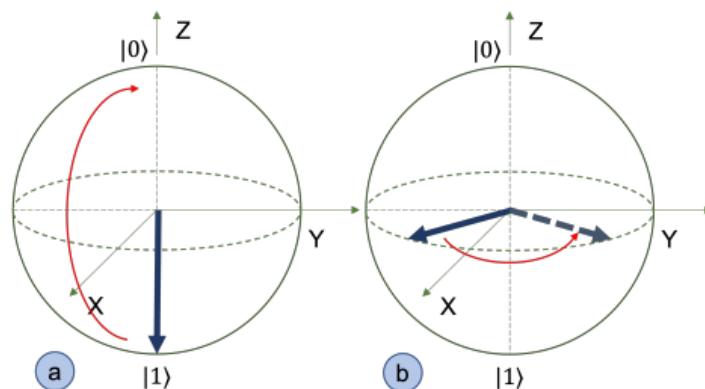


Рис. 2. Иллюстрация: а – релаксации и б – дефазировки состояний кубита

1.3. Ошибка измерения. Чтение кубита, содержащего состояние 1, может привести к состоянию 0 и наоборот из-за ошибки считывания; это возникает из-за несовершенства измерительной схемы. Вероятность ошибки считывания можно определить количественно с помощью простого метода. Это влечет за собой подготовку кубита во всех двоичных состояниях (т.е. 0 и 1 для одного кубита) и его считывание (как подготовка, так и измерение несколько раз). Кубиты на машинах IBM изначально установлены в 0 состоянии по умолчанию. Следовательно, чтобы подготовить состояние «1», к состоянию 0 необходимо применить вентиль квантового NOT(X). В идеале, если повторим процесс подготовки состояния 0 или 1 и считывания N раз, он должен все время генерировать 0 или 1. Однако из-за ошибки считывания в некоторых случаях может быть прочитан перевернутый бит. Например, скажем, состояние 0 подготовлено и измерено 1000 раз. Из этих 1000 попыток 900 раз считывается 0, а остальные 100 раз считывается 1. Таким образом, коэффициент ошибки измерения $M(01)$ будет равен $100/1000 = 0,1$ (M_{xy} обозначает вероятность считывания состояния 'y', в то время как подготовленный состояние 'x', таким образом, $M(00) = 900/1000 = 0,90$). Для характеристики считывания с несколькими кубитами применяется тот же протокол. Однако количество двоичных состояний, которые необходимо подготовить и прочитать, будет больше. Например, чтобы охарактеризовать систему с 3 кубитами, необходимо подготовить и измерить $2^3 = 8$ бинарных состояний (000, 001, 010, ..., 110 и 111) (каждое N раз). В отличие от ошибки затвора и декогеренции, которые зависят от количества затворов в схеме, ошибка считывания не зависит от количества затворов. Это зависит исключительно от читаемого состояния.

1.4. Ошибка перекрестных помех. Перекрёстные помехи [18] – ещё один вид ошибок, присутствующих в квантовых системах. Эффект операции вентилей на одном кубите теоретически не должен зависеть от того, что происходит с другими кубитами. Импульсы используются для создания квантовых вентилей. Однако стробирующий импульс, предназначенный для одного кубита, может случайно возбудить нежелательный кубит, что известно как «перекрестные помехи». Перекрёстные помехи могут вызвать условную зависимость в ошибках вентилей.

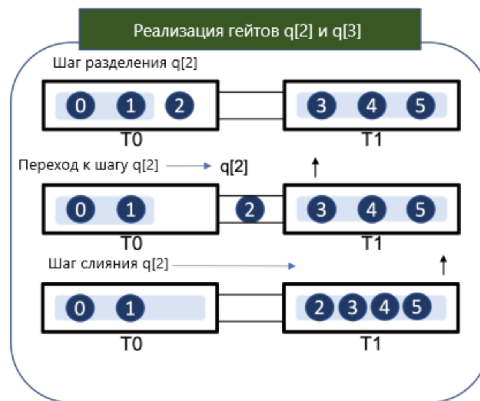


Рис. 3. Обзор потока программы для квантовых систем

Входные данные представляют собой грубую оценку решения, а выходные данные представляют собой несколько улучшенное приближение. Затем этот вывод используется в качестве предположения для следующей итерации, и с каждым циклом результат становится ближе к правильному решению. Проблема разбивается на ряд более мелких задач, которые можно оценить независимо в вариационном алгоритме, при этом сумма всех выходных данных соответствует интересующему приближительному решению. Процесс повторяется до тех пор, пока не будет выполнен эвристический критерий остановки, что обычно эквивалентно достижению энергетического порога.

Проблема сначала устанавливается, а затем транслируется/оптимизируется с помощью программного обеспечения, чтобы ее можно было эффективно решить с помощью аппаратного обеспечения или симуляторов в любой вычислительной экосистеме. Программный пакет обычно содержит языки программирования, компиляторы для сопоставления алгоритмов с машинами, инструменты моделирования, отладки и оптимизации, помогающие в эффективной реализации алгоритмов в системах. Инструменты моделирования, в частности для квантовых компьютеров, могут позволить программисту моделировать каждую квантовую операцию и отслеживать квантовое состояние, которое возникновение, а также его прогрессирования во времени. Эти возможности необходимы для отладки как приложений, так и нового оборудования. Оценщики ресурсов и другие инструменты оптимизации позволят быстро оценить производительность и ресурсы кубитов, необходимые для запуска различных квантовых алгоритмов. Это позволяет компилятору преобразовывать желаемые вычисления в эффективную форму, сводя к минимуму количество кубитов или операций с кубитами, необходимых для рассматриваемого оборудования. Эвристика оптимизации также будет зависеть от типа оборудования, на котором будет выполняться квантовая программа. Каждое оборудование представляет собой уникальный набор задач. В этом разделе мы рассмотрим эвристики компиляции, сопоставления и оптимизации, используемые для двух наиболее распространенных квантовых аппаратных средств – сверхпроводящих квантовых компьютеров и квантовых компьютеров с ловушками ионов. В результате этого наблюдения было разработано несколько алгоритмов отображения с учетом шума [19], [20]. Ключевой стратегией является приоритизация менее ошибочных кубитов для выполнения большинства операций гейтов. Чтобы повысить вероятность успеха программы, предлагается использовать дисперсию кубитов. В модели выбирается набор кубитов с наивысшей совокупной силой связи. Совокупная

сила связи [21] отражает две вещи: (а) кубит связан с большим количеством соседей, что благоприятно для оптимальной маршрутизации, и (б) операции с двумя кубитами между кубитом и его соседями будут менее ошибочными. В некоторых исследованиях предлагаются два подхода, (а) поиск изоморфного подграфа [23] и (б) жадный поиск [24], чтобы найти лучшее распределение программных (логических) кубитов по аппаратным кубитам [22].

1.5. Описание разработанной модели управления на основе помехоустойчивых квантовых вычислений. С учетом теоретического базиса описанных квантовых примитивов разработана модель управления на основе помехоустойчивых квантовых вычислений, подавления и коррекции ошибок в квантовых вычислениях основана на вариационных квантовых схемах (ВКС). ВКС широко используются в краткосрочных квантовых алгоритмах для различных задач, таких как подготовка основного состояния, оценка собственной энергии, сжатие квантовых данных, компиляция квантовых схем. Дадим чистое состояние продукта в качестве входных данных, итеративно обновите параметры схемы на основе результатов измерений и, наконец, выведем желаемое состояние. В ВКС выходные состояния служат базовыми состояниями квантового кода, а его кодировщик задается квантовой схемой. Предположим, у нас есть устройство с аппаратным графом подключения G . Вершины обозначают кубиты, а ребра обозначают соседние пары кубитов. К каждому кубиту можно применять однокубитные гейты, а к соседним кубитам – двухкубитные гейты. Мы стремимся найти K -мерный ККИО, который может обнаруживать набор ошибок $\mathcal{E} = E_\mu$, а схема кодирования должна быть как можно более мелкой. Перед запуском алгоритма разрабатываем многоуровневую ВКС, которая эффективна для графа связности. Обозначим количество слоев ВКС как L , максимально допустимое количество слоев как $L_{\max}$, эволюцию ВКС как $U(\theta)$, где θ – параметры схемы. Начинаем с $L = 1$ и выбираем начальное θ случайным образом. Кроме того, тщательно выбираем $k = \log(K)$ физических кубитов для подготовки логических данных, где логарифм дается по основанию 2. Сначала инициализируем выбранные кубиты одной из K бинарных строк $|0\rangle, |1\rangle, \dots, |K-1\rangle$, а остальные кубиты инициализируем $|0\rangle^{\otimes(n-k)}$. Эти состояния охватывают пространство входного кода

$$C_{in} = \text{span}\{|0\rangle|0\rangle^{\otimes(n-k)}, \dots, |K-1\rangle|0\rangle^{\otimes(n-k)}\}, \quad (1)$$

где C_{in} – код с расстоянием $d = 1$. Функции стоимости можно оценить, запустив определенные схемы и выполнив измерения. Для оценки $\langle \psi_j | E_\mu | \psi_j \rangle$ подготавливаем начальное состояние $|j-1\rangle|0\rangle^{\otimes(n-k)}$, эволюционируем систему с ВКС $U(\theta)$, затем измеряем локальную наблюдаемую E_μ . Если ошибки $E_{\mu_1}, E_{\mu_2}, \dots$ коммутируют, их можно измерить одновременно в одном измерении. Чтобы оценить $|\langle \psi_i | E_\mu | \psi_j \rangle|$, начинаем с $|j-1\rangle|0\rangle^{\otimes(n-k)}$, затем последовательно эволюционируем систему с $U(\theta)$, E_μ и $U(\theta)$, затем измеряем конечное состояние в вычислительном базисе. Измерениям помогает постселекция: сначала измеряем $n-k$ вспомогательных кубитов, если результат $|0\rangle^{n-k}$, измеряем оставшиеся k кубитов. Обозначим вероятность получения двоичной строки $|i-1\rangle|0\rangle^{\otimes(n-k)}$ как p_{ij} ,

$\langle \psi_j | E_\mu | \psi_j \rangle = \sqrt{p_{ij}}$. В приведенном выше описании предполагаем, что набор ошибок E состоит только из ошибок Паули. Не имеет значения, включает ли E неунитарные или неэрмитовы члены. С этим справится добавление вспомогательных кубитов или вращения Паули. Оптимизация θ состоит из двух этапов. Первый и основной этап – это мини-пакетное обучение. После выборки начального θ минимизируем $C_{n,K,\varepsilon}^{l_2}$ с мини-пакетным градиентным спуском. В рамках каждой итерации отбираем подмножество $\mathcal{E}_S \subset \mathcal{E}$, оцениваем соответствующую частичную «2-нормовую функцию стоимости C » и ее градиент с помощью измерений, затем выполним один градиентный спуск со скоростью обучения η . Необходимое количество измерений для оценки $C_{n,K,\varepsilon}^{l_2}(\theta)$ с точностью до аддитивной ошибки имеет порядок $O(K^2 |\mathcal{E}_S|^2 / \varepsilon^2)$. Градиент можно оценить с помощью конечной разности или комбинации цепного правила и правила сдвига параметра. Мини-пакетный градиентный спуск обеспечивает более надежную сходимость и позволяет избежать попадания в ловушку локального минимума. Повторяем выборку и градиентный спуск до сходимости. Причина, по которой сначала минимизируем $C_{n,K,\varepsilon}^{l_2}$, заключается в том, что она сходится намного быстрее, чем $C_{n,K,\varepsilon}^{l_1}$. Кроме того, $C_{n,K,\varepsilon}^{l_2}$ дифференцируемо, а $C_{n,K,\varepsilon}^{l_1}$ – нет. Если набор ошибок E состоит из слишком большого числа членов, многообещающим альтернативным методом является построение «классических теней» для каждого базисного состояния $|\psi_j\rangle$, а затем использование теней для классической оценки функций стоимости. После обучения мини-пакетов, если $C_{n,K,\varepsilon}^{l_2}$ относительно мало (например, $C_{n,K,\varepsilon}^{l_2} < 0,01$), оцениваем $C_{n,K,\varepsilon}^{l_1}$ и подстроим параметры θ относительно него, так как $C_{n,K,\varepsilon}^{l_1}$ напрямую связано с неточностью кода.

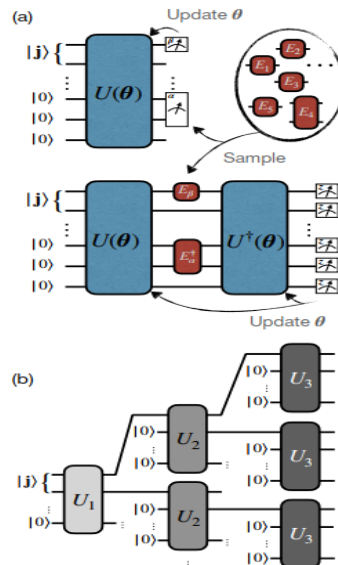


Рис. 4. Схематическая иллюстрация разработанной модели и конкатенации квантового кода

Используем метод Пауэлла, безградиентный оптимизатор для тонкой настройки. Если $C_{n,K,\varepsilon}^{l_1}$ меньше приемлемого допуска стоимости $C_{tol}^{l_1}$, останавливаем оптимизацию и выводим окончательные параметры θ . Устанавливаем толерантность как

$$C_{tol}^{l_1} \equiv 1 \times 10^{-6}. \quad (2)$$

1.5.1. Уменьшение ошибок измерения. Окончательное состояние квантовой схемы измеряется после завершения ее выполнения. Однако из-за ошибки считывания чтение кубита, содержащего 1, может привести к 0 и наоборот; это возникает из-за несовершенства схемы измерения. Например, измерение одного кубита выполняется в два этапа в сверхпроводящем квантовом оборудовании IBM: (а) выполнение считывающего импульса на канале считывания кубита и (б) запись связанного сигнала [25], который измеряет энергетическое состояние кубита, на канал приобретения. Сигнал, собранный в ходе сбора данных, суммируется для получения единого комплексного значения, которое затем наносится на график I-Q плоскости, где 0 и 1 означают отдельные кластеры [26]. Чтобы классифицировать измеренное состояние (0 или 1) из мнимой и действительной составляющих комплексного значения, IBM в настоящее время использует линейный классификатор.

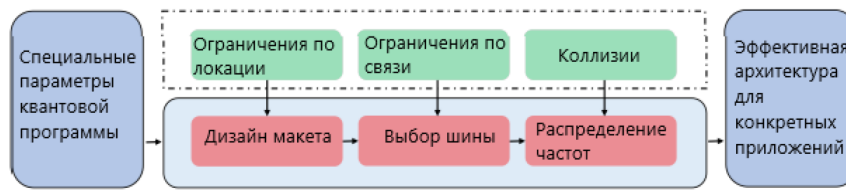


Рис. 5. Модель управления на основе помехоустойчивых квантовых вычислений

Для обучения классификатора используется синтетический набор данных. Чтобы построить этот набор данных, кубит многократно подготавливается в состояниях 0 и 1, после чего выполняются операции измерения. Входными объектами для классификатора являются действительные и мнимые компоненты, а фактические состояния – это метки. Когда истинное состояние ближе к 1, ошибка значительно увеличивается. Значительная зона перекрытия, создаваемая линейной границей решения между состояниями 1 и 1, способствует увеличению ошибки.

2. Сравнительный анализ моделей управления на основе помехоустойчивых квантовых вычислений, подавления и коррекции ошибок в квантовых вычислениях. Выполним сравнительный анализ различных моделей управления на основе помехоустойчивых квантовых вычислений, подавления и коррекции ошибок в квантовых вычислениях, который позволяет выделить достоинства каждой модели и понять, в каких сценариях они могут быть наиболее эффективными.

3-кубитный код:

♦ Достоинства: прост в реализации и эффективен для исправления одиночных ошибок в квантовых состояниях. Это может быть полезно для квантовых вычислений с небольшим числом кубитов, где существует высокая вероятность возникновения одиночных ошибок.

♦ Ограничения: не способен обрабатывать множественные ошибки и не предоставляет полного решения для более сложных видов помех.

Код исправления $X+Z$ ошибок:

♦ Достоинства: обеспечивает более высокую помехоустойчивость, так как способен обрабатывать как ошибки по X -оси, так и по Z -оси, что увеличивает общую надежность квантовых вычислений.

♦ Ограничения: сложнее в реализации и требует дополнительных ресурсов. Эффективен при наличии множественных ошибок, но не всегда является оптимальным выбором для простых систем.

Код Шора:

♦ Достоинства: один из наиболее мощных и продвинутых методов коррекции ошибок в квантовых вычислениях. Может обрабатывать как одиночные, так и множественные ошибки, а также производить детекцию ошибок без их исправления.

♦ Ограничения: требует значительных вычислительных и ресурсных затрат. Реализация и применение сложны.

Код "переворота":

♦ Достоинства: прост в реализации и может эффективно исправлять ошибки на основе инверсии состояний кубитов. Подходит для систем с ограниченным числом кубитов.

♦ Ограничения: не так мощен, как некоторые другие коды коррекции ошибок, и не способен обрабатывать сложные виды помех.

Разработанная модель имеет ряд преимуществ согласно показателям, представленным в табл. 1. Общими достоинствами всех моделей являются увеличение надежности квантовых вычислений, снижение вероятности ошибок и увеличение точности результатов. Однако каждая модель имеет свои ограничения и требует сбалансированного выбора в зависимости от конкретных задач и ресурсов.

Таблица 1

Сравнительный анализ моделей управления на основе помехоустойчивых квантовых вычислений, подавления и коррекции ошибок в квантовых вычислениях

	Код "переворота"	Код Шора	3-кубитный код	Разработанная модель
Процент исправленной ошибки, %	80	86	87	91
Время выполнения, мс	1120	1450	1050	1090
Сложность выполнения	$O(\log n)$	$O(n)$	$O(n^2)$	$O(n)$
Сложность интеграции в вычислительный процесс	$O(n^3)$	$O(n^3)$	$O(n)$	$O(\log n)$

Заключение. В статье рассмотрены технологии квантового оборудования, которые находятся в центре исследований, а также стек квантового программного обеспечения с упором на эвристики компиляции, сопоставления и оптимизации.

В последние несколько лет квантовые вычисления переживают устойчивый период роста. Однако чтобы обещания квантовых вычислений стали реальностью, нужны инновации на разных уровнях вычислительного стека. Только улучшения аппаратного обеспечения и изобретения новых квантовых алгоритмов будет не-

достаточно, и нужен промежуточный стек, который устранил разрыв между алгоритмом и аппаратным обеспечением. Поскольку полноценное исправление ошибок на устройствах будет невозможно, устранение ошибок – это способ двигаться вперед в обозримом будущем. Поэтому были рассмотрены различные типы ошибок, с которыми сталкиваются квантовые системы, их влияние на производительность программы, а также рассмотрели недавнюю литературу, касающуюся оптимизации и смягчения влияния шума на надежность квантовой программы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bernstein E., Vazirani U. Quantum complexity theory // In Proceedings of the 25th ACM Symposium on the Theory of Computing. – 1993. – P. 11-20.
2. Кайе Ф., Лафлам П. Введение в квантовые вычисления. – М.; Ижевск: РХД, 2009. – 360 с.
3. Phillips D.E., Eleischnauer A., Mair A., Walsworth P.L., Lukin M.D. Storage of light in Atomic Vapor // Physical Review Letters. – Januar 2001. – Vol. 86, No. 05.
4. Guzik V., Gushanskiy S., Polenov M., Potapov V. Complexity Estimation of Quantum Algorithms Using Entanglement Properties // 16th International Multidisciplinary Scientific Geo Conference (SGEM). – Bulgaria, 2016. – P. 20-26.
5. Eckert A., Jozsa R. Quantum Computation and Shor's Factoring Algorithm // Rev. Mod. Phys. – 1996. – 68 (3). – P. 733-753.
6. Altaisky M.V., Zolnikova N.N., Kaputkina N.E., Krylov V.A., Lozovik Yu.E., S. Dattani Nikesh. Entanglement in a quantum neural network based on quantum dots. – URL: <http://arxiv.org/pdf/1512.01141v1.pdf> (дата обращения: 20.06.2023).
7. Barenco A., Bennett C.H., Cleve R. et al. Elementary gates for quantum computation // Phys. Rev. A. – 1995 – Nov. – Vol. 52, No. 5. – P. 3457-3467.
8. Maurer P.C., Kucsko G., Latta C., Jiang L., Yao N.Y., Bennett S.D., M.D. Lukin. Room-Temperature Quantum Bit Memory Exceeding One Second // Science. – 2012. – 336, 1283.
9. Boneh D. and Lipton R.J. Quantum cryptanalysis of hidden linear functions // In Don Coppersmith, editor, CRYPTO '95, Lecture Notes in Computer Science. – Springer – Verlag, 1995. – P. 424-437.
10. Rieffel E., Polak W. An introduction to quantum computing nonphysicists // ACM Computing Surveys. – 2000. – Vol. 32, No 3. – P. 300-335.
11. Kim Y.H., Kulik S.P., Shih Y. Quantum Teleportation with a Complete Bell State Measurement // J. Mod. Opt. – 2001. – 49, Issue 1. – P. 221-236.
12. Du-an L.-M., Lukin M.D., Cirac J.I., Zoller P. Long-distance quantum communication with atomic ensembles and linear optics // Nature. – November 2001. – Vol. 414.
13. Kak S. On Quantum Neural Computing // Inf. Sci. – 1995. – Vol. 83. – P. 143-160.
14. Christof Zalka. Grover's quantum searching algorithm is optimal // Phys. Rev. A60. – 1999. – P. 2746-2751.
15. Neumann P., et al. Quantum register based on coupled electron spins in a room-temperature solid // Nature Physics. – 2010. – P. 1-5. – DOI: 10.1038/NPHYS1536.
16. Marshall A. Fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry // Mass Spectrom Rev. – 17. – P. 1-35.
17. Werner R.F. Quantum states with Einstein – Podolsky – Rosen correlations admitting a hidden-variable model // Phys. Rev. A. – 1989. – Vol. 40. – P. 4277.
18. Кутаев А., Шень А., Вялый М. Классические и квантовые вычисления. – М.: МЦНМО, 1999. – 192 с.
19. Гузик В.Ф., Гушанский С.М., Ляпунова Е.В., Потанов В.С. Основы теории построения квантовых компьютеров и моделирование квантовых алгоритмов: монография. – М.: Физматлит, 2019. – 285 с.
20. Richard G. Milner. A Short History of Spin // Contribution to the XVth International Workshop on Polarized Sources, Targets, and Polarimetry. – Charlottesville, Virginia, USA, September 9 - 13, 2013. – arXiv:1311.5016.
21. Raedt K.D., Michielsen K., De Raedt H., Trieu B., Arnold G., Marcus Richter, Th Lip-pert, Watanabe H., and Ito N. Massively parallel quantum computer simulator // Computer Physics Communications. – 176. – P. 121-136.

22. Boixo S., Isakov S.V., Smelyanskiy V.N., Babbush R., Ding N., Jiang Z., Martinis, J.M., and Neven H. Characterizing quantum supremacy in near-term devices // arXiv pre-print arXiv:1608.00263.
23. Stierhoff G.C., Davis A.G. A History of the IBM Systems Journal In: IEEE Annals of the History of Computing. – Vol. 20, Issue 1. – P. 29-35.
24. Collier, David. The Comparative Method. In Ada W. Finifter, ed. Political Sciences: The State of the Discipline II. Washington, DC: American Science Association. – P. 105-119.
25. Hales S. Hallgren An improved quantum Fourier transform algorithm and applications // Proceedings of the 41st Annual Symposium on Foundations of Computer Science. November 12–14, 2000. – 515 p.
26. Kleppner D., Kolenkow R. An Introduction to Mechanics. – 2nd ed. – Cambridge: Cambridge University Press, 2014. – 49 p.

REFERENCES

1. Bernstein E., Vazirani U. Quantum complexity theory, In *Proceedings of the 25th ACM Symposium on the Theory of Computing*, 1993, pp. 11-20.
2. Kaye F., Laflamme R. Введение в квантовые вычисления [Introduction to Quantum Computing]. Moscow; Izhevsk: RKhD, 2009, 360 p.
3. Phillips D.E., Eleischnauer A., Mair A., Walsworth P.L., Lukin M.D. Storage of light in Atomic Vapor, *Physical Review Letters*, Januar 2001, Vol. 86, No. 05.
4. Guzik V., Gushanskiy S., Polenov M., Potapov V. Complexity Estimation of Quantum Algorithms Using Entanglement Properties, *16th International Multidisciplinary Scientific Geo Conference (SGEM)*. Bulgaria, 2016, pp. 20-26.
5. Eckert A., Jozsa R. Quantum Computation and Shor's Factoring Algorithm, *Rev. Mod. Phys.*, 1996, 68 (3), pp. 733-753.
6. Altaisky M.V., Zolnikova N.N., Kaputkina N.E., Krylov V.A., Lozovik Yu.E., S. Dattani Nikesh. Entanglement in a quantum neural network based on quantum dots. Available at: <http://arxiv.org/pdf/1512.01141v1.pdf> (accessed 20 June 2023).
7. Barenco A., Bennett C.H., Cleve R. et al. Elementary gates for quantum computation, *Phys. Rev. A*, 1995 – Nov., Vol. 52, No. 5, pp. 3457-3467.
8. Maurer P.C., Kucsko G., Latta C., Jiang L., Yao N.Y., Bennett S.D., M.D. Lukin. Room-Temperature Quantum Bit Memory Exceeding One Second, *Science*, 2012, 336, 1283.
9. Boneh D. and Lipton R.J. Quantum cryptanalysis of hidden linear functions, In Don Coppersmith, editor, *CRYPTO '95, Lecture Notes in Computer Science*. Springer – Verlag, 1995, pp. 424-437.
10. Rieffel E., Polak W. An introduction to quantum computing nonphysicists // *ACM Computing Surveys*. – 2000. – Vol. 32, No 3. – P. 300-335.
11. Kim Y.H., Kulik S.P., Shih Y. Quantum Teleportation with a Complete Bell State Measurement, *J. Mod. Opt.*, 2001, 49, Issue 1, pp. 221-236.
12. Du-an L.-M., Lukin M.D., Cirac J.I., Zoller P. Long-distance quantum communication with atomic ensembles and linear optics, *Nature*, November 2001, Vol. 414.
13. Kak S. On Quantum Neural Computing, *Inf. Sci.*, 1995, Vol. 83, pp. 143-160.
14. Christof Zalka. Grover's quantum searching algorithm is optimal, *Phys. Rev. A* 60, 1999, pp. 2746-2751.
15. Neumann P., et al. Quantum register based on coupled electron spins in a room-temperature solid, *Nature Physics*, 2010, pp. 1-5. DOI: 10.1038/NPHYS1536.
16. Marshall A. Fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry, *Mass Spectrom Rev.*, 17, pp. 1-35.
17. Werner R.F. Quantum states with Einstein – Podolsky – Rosen correlations admitting a hidden-variable model, *Phys. Rev. A*, 1989, Vol. 40, pp. 4277.
18. Kitaev A., Shen' A., Vyalyy M. Klassicheskie i kвантовые вычисления [Classical and quantum computing]. Moscow: MTSNMO, 1999, 192 p.
19. Guzik V.F., Gushanskiy S.M., Lyapunsova E.V., Potapov V.S. Osnovy teorii postroeniya kвантовых komp'yutеров i modelirovanie kвантовых алгоритмов: monografiya [Fundamentals of the theory of constructing quantum computers and modeling of quantum algorithms: monograph]. Moscow: Fizmatlit, 2019, 285 p.

20. Richard G. Milner. A Short History of Spin, *Contribution to the XVth International Workshop on Polarized Sources, Targets, and Polarimetry*. Charlottesville, Virginia, USA, September 9 - 13, 2013. arXiv:1311.5016.
21. Raedt K.D., Michielsen K., De Raedt H., Trieu B., Arnold G., Marcus Richter, Th Lip-pert, Watanabe H., and Ito N. Massively parallel quantum computer simulator, *Computer Physics Communications*, 176, pp. 121-136.
22. Boixo S., Isakov S.V., Smelyanskiy V.N., Babbush R., Ding N., Jiang Z., Martinis, J.M., and Neven H. Characterizing quantum supremacy in near-term devices, *arXiv pre-print arXiv:1608.00263*.
23. Stierhoff G.C., Davis A.G. A History of the IBM Systems Journal In: *IEEE Annals of the History of Computing*, Vol. 20, Issue1, pp. 29-35.
24. Collier, David. The Comparative Method. In Ada W. Finifter, ed. *Political Sciences: The State of the Discipline II*. Washington, DC: American Science Association, pp. 105-119.
25. Hales S. Hallgren An improved quantum Fourier transform algorithm and applications, *Proceedings of the 41st Annual Symposium on Foundations of Computer Science*. November 12-14, 2000, P. 515.
26. Kleppner D., Kolenkow R. *An Introduction to Mechanics*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2014, 49 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Ю.А. Кравченко.

Гушанский Сергей Михайлович – Южный федеральный университет; e-mail: smgushanskiy@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371656; кафедра вычислительной техники; к.т.н.ж доцент.

Потопов Виктор Сергеевич – e-mail: vpotapov@sfedu.ru; тел.: 88634371656; кафедра вычислительной техники; ассистент.

Gushanskiy Sergey Mikhailovich – Southern Federal University; e-mail: smgushanskiy@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371656; the department of computer engineering; cand. of eng. sc.; associate professor.

Potapov Viktor Sergeevich – e-mail: vpotapov@sfedu.ru; phone: +78634371656; the department of computer engineering; assistant.

УДК 621.396.946

DOI 10.18522/2311-3103-2023-4-174-191

**Махмуд Хуссейн Ахмед Махмуд, К.Е. Румянцев,
Аль-Бегат Адиль Хамид Шакир**

АНАЛИЗ ВОСХОДЯЩЕГО ЛАЗЕРНОГО КАНАЛА СПУТНИКОВОЙ КОММУНИКАЦИИ В УСЛОВИЯХ АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

По сравнению с традиционной спутниковой радиосвязью методы лазерной связи демонстрируют более высокую производительность с точки зрения доступных скоростей передачи данных, а также гарантируют снижение массогабаритных показателей, уменьшение веса и мощности аппаратуры на летательном аппарате. В системе спутниковой связи лазерный передатчик генерирует узкий пучок модулированного излучения. Лазерный луч, распространяющийся в атмосфере по направлению к оптическому приемнику, может испытывать значительные случайные флуктуации оптической интенсивности из-за турбулентности, что приводит к потере мощности и ухудшению характеристик системы. В системе с мультиплексированием поднесущих (SCM) несколько несущих информацию радиосигналов электрически модулируются на разных поднесущих радиочастотах. Аналоговые или цифровые сигналы, несущие информацию, могут иметь различные форматы модуляции. Высокая устойчивость к воздействию турбулентности атмосферы достигается с помощью однополосной модуляции. Оптическое излучение с одной боковой полосой (OSSB) обычно генерируется с использованием модулятора Маха-Цендера (MZM) с двумя

плечами. В статье проанализирован канала спутниковой связи в условиях атмосферной турбулентности, где однополосное оптическое излучение с модулировано радиосигналом на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией. Разработана модель канала связи, учитывающая как атмосферную турбулентность, так и основные параметры передающей и приёмной станций. Численные результаты, представленные в исследовании лазерной спутниковой связи, основаны на атмосферной высотной модели структурной характеристики флуктуаций показателя преломления Хафнагеля-Валли. Проведенный анализ позволяет оценить влияние на принимаемую мощность оптического излучения атмосферной турбулентности, ошибки наведения и диаметра приёмной апертуры телескопов при передаче лазерного сигнала между наземной станцией и спутником для системы лазерной связи.

Спутниковая связь; лазерная система; однополосное оптическое излучение; квадратурная фазовая манипуляция; радиосигнал на поднесущей частоте; атмосферная турбулентность; ошибка наведения; оптический модулятор Маха-Цендера.

Hussein Ahmed Mahmood, K.Y. Rumyantsev, Al-Begat Adil Hameed Shakir

CHANNEL ANALYSIS OF OPTICAL SINGLE SIDEBAND QUADRATURE PHASE SHIFT KEYING WITH SUBCARRIER RADIO SIGNAL FOR LASER SATELLITE COMMUNICATIONS UNDER ATMOSPHERIC TURBULENCE

Compared to traditional satellite radio communication, laser communication techniques demonstrate greater performance in terms of available data rates, and also guarantee a reduction in size, weight and power of the communication subsystem. In a satellite laser communication system, a laser source generates a narrow beam of radiation at the transmitter. A laser beam propagating through the atmosphere towards an optical receiver can experience large random fluctuations in optical intensity due to turbulence, which can lead to loss of power in the receiver and degrade system performance. In a subcarrier multiplexing (SCM) system, multiple information is electrically modulated at different radio carrier frequencies. Analog or digital signals carrying information may have different modulation formats. Optical single sideband radiation (OSSB) is typically generated using a dual drive Mach-Zehnder modulator (MZM). In the article, the analysis channel for optical single-sideband quadrature phase-shift keying transmitted signal was proposed for different distances under atmospheric turbulence conditions. The numerical results of laser satellite communications are based on an atmospheric altitude model of the structural characteristic of Hufnagel-Valley (H-V) refractive index fluctuations. The performance analysis makes it possible to estimate the effect of atmospheric turbulence, pointing error, and the diameter of the received aperture on the received power during transmission of a laser signal between a ground station and a satellite for a laser communication system, where the optical wave is a collimated beam with a wavelength of 1550 nm.

Satellite communications; laser system; single-sideband optical radiation; quadrature phase shift keying; radio signal at subcarrier frequency; atmospheric turbulence; pointing error; Mach-Zehnder optical modulator.

Введение. Объем данных, генерируемых и передаваемых в системах спутниковой связи, постоянно увеличивается. Поскольку радиочастотные системы работают на пределе своих возможностей из-за технологических и нормативных проблем, лазерная связь определена как ключевая технология, ведущая к смене парадигмы спутниковой связи.

К преимуществам оптической связи по сравнению с радиосвязью относятся более широкая полоса пропускания, большая пропускная способность, меньшее энергопотребление, более компактное оборудование, высокая защищенность от прослушивания и лучшая защита от помех [1, 5, 6]. Более того, спрос на высокоскоростную передачу данных с космических наблюдательных платформ неуклонно растет [2]. Оптическая связь играет важную роль для передачи данных с высокой скоростью по линиям земля-космос и космос-земля [3–5].

В нисходящей линии при распространении лазерного луча в вакууме исключено поглощение и рассеяние излучения, а также не учитываются фазовые искажения. Лазерный луч подвергается воздействию плотной атмосферы тропосферы лишь на конечном участке трассы распространения. Наоборот, в восходящей линии лазерный луч, генерируемый наземной станцией, по направлению к искусственному спутнику Земли (ИСЗ) подвергается воздействию плотной атмосферы тропосферы. Помимо атмосферного затухания и мерцаний излучения [8] в восходящей линии необходимо учитывать дрейф луча, который увеличивает ошибку наведения лазерной системы спутниковой связи [9]. Экспериментальные исследования спутниковой связи показывают, что при передаче информации по восходящей линии не гарантируется непрерывное отслеживание направления на корреспондента и временная синхронизация, часто наблюдается прерывание связи.

Атмосферная турбулентность вызывает флуктуации принимаемой оптической мощности [16]. На качество лазерной связи влияют прежде всего сцинтилляции излучения. Поэтому актуальной задачей является оценка влияния турбулентности атмосферы на спутниковую связь, особенно в восходящей линии связи [6, 7]. Следовательно, особую важность приобретает оценка влияния на качество спутниковой связи возникающих за счет атмосферной турбулентности таких параметров как расширение и дрейф луча, ослабление и мерцание излучения в атмосфере на соответствующих длинах волн оптического излучения, искажение волнового фронта, флуктуации угла прихода и ошибка наведения.

Для организации высокоскоростной спутниковой связи предусматривается мультиплексирование радиосигналов на разных поднесущих частотах (SCM). После переноса в оптический диапазон длин волн сформированное излучение передается в свободном пространстве на оптической несущей частоте [10, 28]. Возможна чисто аналоговая оптическая однополосная схема SCM, совместимая с требуемыми скоростями основной полосы частот с использованием микроволновых фильтров нижних частот, смесителей, сумматоров и делителей [11]. Кроме того, общий электрический приемопередатчик может быть интегрирован с использованием технологии монолитных микроволновых интегральных схем [12]. Высокая устойчивость к хроматической дисперсии достигается с помощью оптической модуляции с одной боковой полосой (OSSB) [13]. Генерация сигналов OSSB методом фазового сдвига изучена с использованием внешнего модулятора Маха-Цендера (MZM) с двумя печами [14].

Для эффективного подавления одной из оптических боковых полос разность мощностей модулирующих сигналов в обоих плечах и отклонение фазы от требуемого значения в $\pi/2$ в нижнем плече должны быть ограничены погрешностями до 3 дБ и $\pm 5^\circ$ соответственно [15].

Цель настоящего исследования состоит в оценке влияния на принимаемую мощность оптического излучения атмосферной турбулентности, ошибки наведения и диаметра принимаемой апертуры при передаче данных между наземной станцией и спутником для лазерной системы, где оптическая волна представляет собой коллимированный пучок.

Генерация оптического излучения с квадратурной фазовой манипуляцией радиосигналов на поднесущей частоте с одной боковой полосой. На рис. 1 представлена структура оптического когерентного передатчика [19] на основе двух параллельно соединенных интерферометров Маха-Цендера (I/Q оптических модуляторов) с использованием преобразования Гильберта для генерации оптического излучения с одной боковой полосой и передачей данных радиосигналами на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией.

Лазерный источник генерирует непрерывное излучение с длиной волны λ_{opt} , круговой частотой $w_{opt} = c / \lambda_{opt}$, начальной фазой φ_{opt} и постоянной интенсивностью (мощностью) P_{opt} . Здесь $c = 300\,000$ км/с – скорость распространения оптического излучения в вакууме.

Интенсивность электрического поля непрерывного лазерного сигнала определяется формулой

$$E_{in}(t) = \frac{\sqrt{P_{opt}}}{2} \cdot [\exp(j \cdot w_{opt}t + j \cdot \varphi_{opt})] . \quad (1)$$

Входная волна оптического модулятора I/Q от оптического когерентного источника (лазера) разделяется на две составляющие $E_{SP1}(t)$ и $E_{SP2}(t)$ в оптическом делителе излучения с коэффициентами ветвления соответственно K_{SP1} и K_{SP2} и внутренними потерями γ_{SP} . Кроме того, $K_{SP1} + K_{SP2} = 1$ и

$$E_{SP1}(t) = K_{SP1} \cdot 10^{-0,1 \gamma_{SP} [\text{дБ}]} \cdot E_{in}(t) ;$$

$$E_{SP2}(t) = K_{SP2} \cdot 10^{-0,1 \gamma_{SP} [\text{дБ}]} \cdot E_{in}(t) .$$

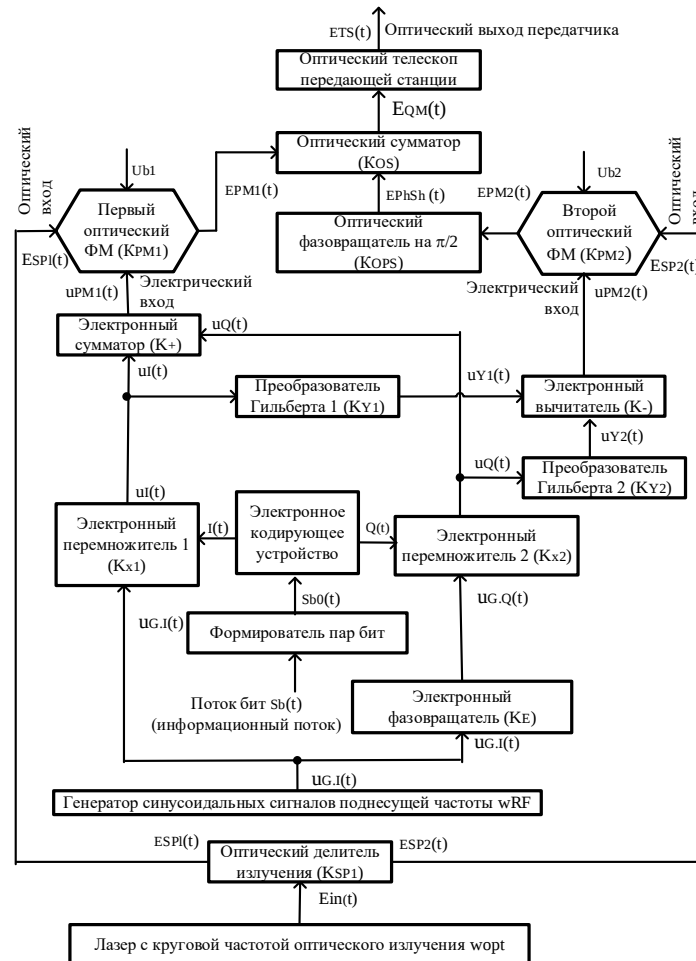


Рис. 1. Оптический передатчик, формирующий оптическое излучение с одной боковой полосой с квадратурной фазовой манипуляцией радиосигналов на поднесущей частоте

При идеальном делении $K_{SP1} = K_{SP2} = K_{SP} = 0,5$ на выходах оптического разветвителя формируются два одинаковых излучения

$$E_{SP1}(t) = E_{SP2}(t) = E_{SP}(t) = 0,5 \cdot 10^{-0,1 \cdot \gamma_{SP}[\text{дБ}]} \cdot E_{in}(t). \quad (2)$$

Входной лазерный сигнал, поступающий в интерферометр Маха-Цандера, имеет отдельные верхний и нижний электроды, на которые подаются напряжения

$$\begin{aligned} u_{MZM1h}(t) &= u_{1h}(t) + U_{b1h}; \\ u_{MZM1d}(t) &= u_{1d}(t) + U_{b1d}, \end{aligned} \quad (3)$$

которые переключают электрические поля в плечах оптического интерферометра Маха Цандера.

Для достижения максимальной эффективности электрооптического устройства в качестве подложки в интерферометрах используются кристаллы ниобата лития LiNbO_3 . Выбор рабочей точки модулятора достигается подачей на отдельную систему электродов постоянных напряжений смещения U_{b1h} и U_{b1d} , обеспечивающих заданный фазовый сдвиг между оптическими волнами в плечах интерферометра.

Выходная оптическая волна интерферометра Маха-Цандера с коэффициентом передачи K_{MZM1} описывается формулой [18]

$$E_{PM1}(t) = \frac{K_{MZM1} E_{SP1}(t)}{2} \left\{ \exp \left[j \frac{\pi}{U_\pi} u_{MZM1h}(t) \right] + \exp \left[j \frac{\pi}{U_\pi} u_{MZM1d}(t) \right] \right\}. \quad (4)$$

На рис. 2 представлена векторная диаграмма распределения сигналов с квадратурной фазовой манипуляцией QPSK. Точки на диаграмме образуют созвездие фазовых манипуляций из четырех точек. Все точки созвездия расположены на единичной окружности.

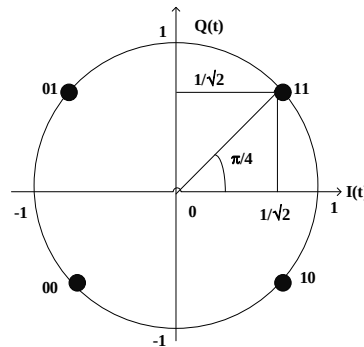


Рис. 2. Векторная диаграмма сигналов с манипуляцией QPSK

Квадратурная фазовая манипуляция требует двух колебаний, синфазной и квадратурной составляющих с одной и той же круговой поднесущей радиочастотой ω_{RF} , но сдвинутых по фазе на 90° . Это достигается использованием генератора синусоидальных сигналов поднесущей радиочастоты ω_{RF} и электронного фазовращателя на $\varphi_{RF} = \pi/2$.

При использовании электронного фазовращателя с коэффициентом передачи K_E на входах электронных умножителей появляются радиосигналы с одинаковой круговой частотой поднесущей ω_{RF} и начальной фазой φ_{RF} :

$$u_{G,I}(t) = I(t) \cdot U_G \cdot \cos(\omega_{RF}t + \varphi_{RF}); \quad (5)$$

$$\begin{aligned} u_{G,Q}(t) &= K_E \cdot Q(t) \cdot U_G \cdot \cos(\omega_{RF}t + \varphi_{RF} + \pi/2) = \\ &= -K_E \cdot Q(t) \cdot U_G \cdot \sin(\omega_{RF}t + \varphi_{RF}). \end{aligned} \quad (6)$$

На выходах электронных умножителей с коэффициентами передачи $K_{\times 1}$ и $K_{\times 2}$ формируются радиосигналы $u_I(t)$ и $u_Q(t)$ с одинаковой круговой частотой поднесущей ω_{RF} и начальной фазой φ_{RF} :

$$u_I(t) = K_{\times 1} \cdot u_{G,I}(t) = K_{\times 1} \cdot I(t) \cdot U_G \cdot \cos(\omega_{RF}t + \varphi_{RF}); \quad (7)$$

$$u_Q(t) = K_{\times 2} \cdot u_{G,Q}(t) = -K_{\times 2} \cdot K_E \cdot Q(t) \cdot U_G \cdot \sin(\omega_{RF}t + \varphi_{RF}). \quad (8)$$

После преобразований Гильберта над радиосигналами (7) и (8) формируются радиосигналы с квадратурной фазовой манипуляцией, направляемые на электроды интерферометров Маха-Цендера в оптическом I/Q-модуляторе [19]

$$\begin{aligned} u_{1h}(t) = u_{1d}(t) &= K_+ U_G [K_{\times 1} I(t) \cdot \cos(\omega_{RF}t + \varphi_{RF}) - K_{\times 2} K_E Q(t) \sin(\omega_{RF}t + \varphi_{RF})]; \\ u_{2h}(t) = u_{2d}(t) &= \\ &= K_- U_G [K_{Y1} \cdot K_{\times 1} \cdot I(t) \cdot \sin(\omega_{RF}t + \varphi_{RF}) + K_{Y2} K_{\times 2} K_E \cdot Q(t) \cdot \cos(\omega_{RF}t + \varphi_{RF})]. \end{aligned} \quad (9)$$

На рис. 3 показан рассчитанный по формуле (9) спектр радиосигнала с поднесущей частотой 10 ГГц, начальной фазой $\varphi_{RF} = 0$ и квадратурной фазовой манипуляцией. Коэффициенты передачи всех функциональных устройств, присутствующие в формуле (9), приняты равными 1.

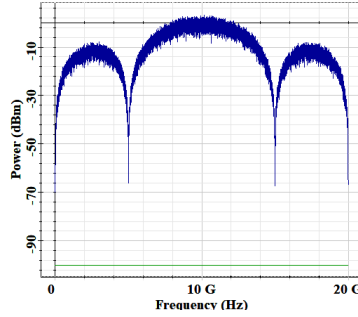


Рис. 3. Спектральная плотность мощности для радиосигнала QPSK

После подстановки (9) в (4) находим интенсивность выходной оптической волны верхнего интерферометра Маха-Цендера с коэффициентом пропускания K_{MZM1} и базовым напряжением 2 В для обеспечения сдвига фаз на $\pi/2$

$$\begin{aligned} E_{PM1}(t) &= j \cdot K_{MZM1} E_{SP1}(t) \\ &\cdot \exp \left[j \frac{\pi}{U_\pi} K_+ K_{\times 1} U_G \cdot I(t) \cdot \cos(\omega_{RF}t + \varphi_{RF}) \rightarrow \right. \\ &\left. \leftarrow -j \frac{\pi}{U_\pi} K_+ K_{\times 2} K_E U_G \cdot Q(t) \cdot \sin(\omega_{RF}t + \varphi_{RF}) \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

Интенсивность оптической волны $E_{PM2}(t)$ на выходе нижнего интерферометра Маха-Цендера с коэффициентом передачи K_{MZM2}

$$\begin{aligned} E_{PM2}(t) &= j \cdot K_{MZM2} \cdot E_{SP2}(t) \\ &\cdot \exp \left[j \frac{\pi}{U_\pi} K_- K_{Y1} K_{\times 1} U_G \cdot I(t) \cdot \sin(\omega_{RF}t + \varphi_{RF}) + j \frac{\pi}{U_\pi} K_- K_{Y2} K_{\times 2} K_E U_G \right. \\ &\left. \cdot Q(t) \cdot \cos(\omega_{RF}t + \varphi_{RF}) \right] \end{aligned} \quad (11)$$

после оптического фазовращателя на $\pi/2$ с коэффициентом передачи K_{OPS} , оптическое излучение приобретает вид

$$E_{OPS}(t) = -K_{OPS}K_{MZM2}E_{SP2}(t) \cdot \exp \left[j \frac{\pi}{U_{\pi}} K_{-} K_{Y1} K_{\times 1} U_G I(t) \cdot \sin(\omega_{RF}t + \varphi_{RF}) \right] + \leftarrow \right. \\ \left. + j \frac{\pi}{U_{\pi}} K_{-} K_{Y2} K_{\times 2} K_E U_G Q(t) \cdot \cos(\omega_{RF}t + \varphi_{RF}) \right]. \quad (12)$$

На выходе оптического сумматора формируется оптическое поле с интенсивностью

$$E_{QM}(t) = E_{PM1}(t) + E_{OPS}(t).$$

С учетом (10) и (12) на выходе оптического телескопа с коэффициентом пропускания K_{opt} формируется выходной сигнал передающей станции

$$E_{TS}(t) = K_{opt} \cdot E_{QM}(t) = K_{opt} \cdot [E_{PM1}(t) + E_{OPS}(t)].$$

Причём

$$E_{TS}(t) = j \cdot K_{opt} K_{MZM1} \cdot E_{SP1}(t) \cdot \exp \left[j \frac{\pi}{U_{\pi}} K_{+} K_{\times 1} U_G \cdot I(t) \cdot \cos(\omega_{RF}t + \varphi_{RF}) \right] \cdot \exp \left[-j \frac{\pi}{U_{\pi}} K_{+} K_{\times 2} K_E U_G \cdot Q(t) \cdot \sin(\omega_{RF}t + \varphi_{RF}) \right] \rightarrow \leftarrow \\ \leftarrow -K_{opt} K_{OPS} K_{MZM2} \cdot E_{SP2}(t) \cdot \exp \left[j \frac{\pi}{U_{\pi}} K_{-} K_{Y1} K_{\times 1} U_G \cdot I(t) \cdot \sin(\omega_{RF}t + \varphi_{RF}) \right] \cdot \exp \left[j \frac{\pi}{U_{\pi}} K_{-} K_{Y2} K_{\times 2} K_E U_G \cdot Q(t) \cdot \cos(\omega_{RF}t + \varphi_{RF}) \right]. \quad (13)$$

Применяя разложение Якоби–Ангера [20, 21] к формуле (13), получаем представление комплексного сигнала I/Q модулятора в спектральной (а) и временной (б) областях, как показано на рис. 4.

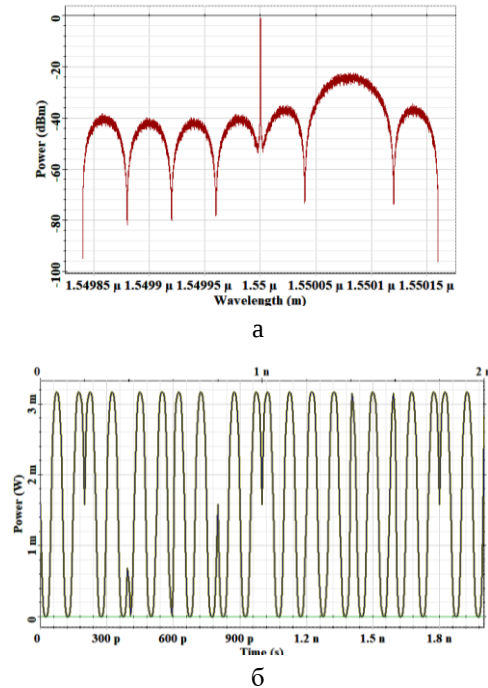


Рис. 4. Представление оптического сигнала с однополосной квадратурной фазовой манипуляцией в спектральной (а) и временной (б) областях

В соответствии с предложенной структурой когерентной оптической передачи, показанной на рис. 1, с использованием преобразований Гильберта реализован метод формирования оптического излучения с одной боковой полосой, модулированного в I/Q оптическом модуляторе радиосигналом на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией. На рис. 4 представлен формируемый однополосный оптический сигнал с длиной волны 1550 нм в частотной (а) и временной (б) областях.

Оценка влияния параметров оптической турбулентности на параметры лазерной системы спутниковой связи. Для приложений лазерной связи как по восходящей, так и по нисходящей линии связи модель профиля структурной характеристики флуктуаций показателя преломления $C_n^2(h)$ необходима для правильного описания изменений оптической турбулентности в зависимости от высоты орбиты ИСЗ h .

Несколько высотных моделей профилей $C_n^2(h)$ используются техническим сообществом для трасс «Земля-космос» или «космос-Земля». Большинство этих моделей предсказывают близкие результаты, даже если они ориентируются на средние условия турбулентности с небольшими флуктуациями показателя преломления.

Одной из наиболее универсальных моделей структуры показателя преломления является высотная модель Хафнагеля-Валли (Hufnagel-Valley, HV), описанная в [25]. Модель определяет связь структурной характеристики флуктуаций показателя преломления с номинальным значением структурной характеристики $C_n^2(0)$ на уровне Земли в $m^{-2/3}$:

$$C_n^2(h) = 0.00594 \left(\frac{v}{27}\right)^2 \left(\frac{h}{100000}\right)^{10} \exp\left(-\frac{h}{1000}\right) + \rightarrow \leftarrow + 2.7 \cdot 10^{-16} \exp\left(-\frac{h}{1500}\right) + C_n^2(0) \cdot \exp\left(-\frac{h}{100}\right). \quad (14)$$

Псевдоскорость ветра v в формуле (14) рассчитывается исходя из модели скорости ветра Бафтона, где скорость ветра у земной поверхности обычно полагают равной 5 м/с.

На рис. 5 показано изменение структурной характеристики флуктуаций показателя преломления $C_n^2(h)$ от высоты орбиты ИСЗ h для модели Хафнагеля-Валли при $C_n^2(0) = 1.7 \cdot 10^{-14} m^{-2/3}$ и псевдоскорости ветра $v=21$ м/с. Модель соответствует условиям наблюдения в дневное время суток для обсерватории Альбукирки (Нью Мексико, США).

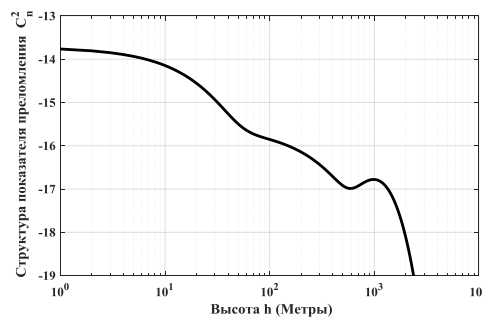


Рис. 5. Изменение структурной характеристики флуктуаций показателя преломления от высоты орбиты ИСЗ для модели Хафнагеля-Валли

Гауссов пучок, распространяющийся вдоль оси z , можно охарактеризовать на апертуре телескопа передатчика ($z = 0$) радиусом пятна луча W_0 , при котором оптическая интенсивность падает до уровня $1/e^2$ от максимума на оси луча, волновым числом $k=2\pi/\lambda_{opt}$ и радиусом кривизны F_0 , определяющим формирование луча. Случаи $F_0 = \infty$, $F_0 > 0$ и $F_0 < 0$ соответствуют формам коллимированного, сходящегося и расходящегося луча соответственно.

Для описания интенсивности оптического луча в заданном пространственном положении $z = L$ используются параметры луча во плоскости передатчика $z = 0$: параметр кривизны θ_0 и коэффициент Френеля Λ_0 . Причём [17, 22, 23]

$$\theta_0 = 1 - \frac{L}{F_0}; \quad (15)$$

$$\Lambda_0 = \frac{2 \cdot L}{k \cdot W_0^2}. \quad (16)$$

Аналогичным образом при радиусе кривизны F определяются параметры луча в плоскости $z = L$ (удалении на L от передатчика),

$$\theta = \frac{\theta_0}{\theta_0^2 + \Lambda_0^2} = 1 + \frac{L}{F}; \quad (17)$$

$$\Lambda = \frac{2 \cdot L}{k \cdot W^2}. \quad (18)$$

С учетом (15)–(18) радиус пятна луча в плоскости на расстоянии L от передатчика (на телескопе) может быть рассчитан по формуле [24]

$$W = W_0 \cdot \sqrt{\theta_0^2 + \Lambda_0^2} = \sqrt{W_0^2 + \frac{\lambda_{opt}^2 \cdot L^2}{\pi^2 \cdot W_0^2}}. \quad (19)$$

Интенсивность оптической волны представляет квадрат амплитуды оптического поля [24]. На радиальном отклонении r от оптической оси интенсивность определяется

$$I(r, L) = I_0 \cdot \left[\frac{W_0}{W} \right]^2 \cdot \exp \left[-\frac{2 \cdot r^2}{W^2} \right], \quad (20)$$

где $I_0 = I_0(0,0)$ – излучение на выходе передатчика на центральной линии оси, а индекс 0 обозначает излучение в свободном пространстве (без турбулентности).

Функция плотности вероятности нормированной интенсивности оптического излучения I (PDF) указанной выше модели может быть выражена как [25]

$$P(I) = \frac{2 \cdot (\alpha \cdot \beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha) \cdot \Gamma(\beta)} I^{\{(\alpha+\beta)/2\}-1} K_{\alpha-\beta} \left(2 \cdot \sqrt{\alpha \cdot \beta \cdot I} \right), I > 0, \quad (21)$$

где $\Gamma(\cdot)$ – гамма-функцию; $K_n(\cdot)$ – модифицированная функция Бесселя n -го порядка.

Эффективное количество мелкомасштабных α и крупномасштабных β вихрей в рассеивающей среде определяется формулами

$$\alpha = \left\{ \exp \left[\frac{0.49 \cdot \sigma_R^2}{(1 + 1.11 \cdot \sigma_R^{12/5})^{7/6}} \right] - 1 \right\}^{-1}; \quad (22)$$

$$\beta = \left\{ \exp \left[\frac{0.51 \cdot \sigma_R^2}{(1 + 0.69 \cdot \sigma_R^{12/5})^{5/6}} \right] - 1 \right\}^{-1}, \quad (23)$$

а индекс мерцания – выражением

$$\sigma_I^2(L) = \exp\left(\frac{0.49 \cdot \sigma_R^2}{(1 + 1.11 \cdot \sigma_R^{12/5})^{7/6}} + \frac{0.51 \cdot \sigma_R^2}{(1 + 0.69 \cdot \sigma_R^{12/5})^{5/6}}\right) - 1.$$

Дисперсия Рытова

$$\sigma_R^2 = 1.23 \cdot C_n^2 \cdot k^{7/6} L^{11/6} \quad (24)$$

определяется структурной характеристикой флуктуаций показателя преломления C_n^2 .

Вероятностное распределение гамма-гамма-функции модели атмосферной турбулентности в зависимости от распределения интенсивности показано на рис. 6.

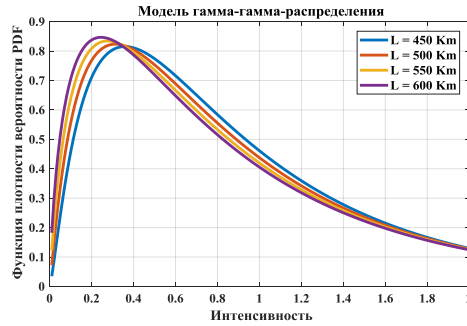


Рис. 6. Функция плотности вероятности гамма-гамма как функция интенсивности на разном расстоянии от наземной станции

Процессы, такие как поглощение, рассеяние, мерцание, затухание и многолучевое распространение, влияющие на качество принимаемого сигнала, будут доминировать над эффектом неопределенности в прямой видимости. В частности, пространственные потери мощности сигнала при его прохождении через свободное пространство равны [26]

$$Losses = \left(\frac{\lambda_{opt}}{4 \cdot \pi \cdot L}\right)^2. \quad (25)$$

Следовательно, электрооптические компоненты, такие как оптические компоненты телескопа, блок слежения, блок оптического интерфейса между передатчиком и приемником и рулевые зеркала, все содержатся в структуре двухосного подвеса (азимут и угол места), в то время как другие электронные блоки расположены вне карданного подвеса. Таким образом, из-за углового смещения спутника (т. е. вращения вокруг центра тяжести тела и движения по орбите) незначительная вибрация пространственного положения ИСЗ будет усиливаться несоосностью направленности телескопов и оказывать значительное влияние на интенсивность принимаемого лазерного луча. Более того, в сочетании с большим расстоянием, на которое распространяется лазерное излучение при связи со спутниками, результирующая ошибка наведения передаваемого лазерного луча будет расти.

Математически ошибка наведения θ_r (в радиальном) из-за механической вибрации определяется ошибками по двум осям (ошибками по углу возвышения $\theta_{elevation}$ и по углу азимута $\theta_{azimuth}$):

$$\theta_r = \sqrt{\theta_{azimuth}^2 + \theta_{elevation}^2}. \quad (26)$$

При стандартном отклонении угла ошибки наведения σ_θ распределение вероятностей угла радиальной ошибки наведения определяется функцией [26]

$$f(\theta) = \frac{\theta}{\sigma_\theta^2} \exp\left(-\frac{\theta^2}{2\sigma_\theta^2}\right). \quad (27)$$

Мощность оптического сигнала в приемнике

$$P_R = P_T \times \eta_T \times G_T \times l_T \times \left(\frac{\lambda_{opt}}{4\pi \cdot L}\right)^2 \times \eta_R \times G_R \times l_R \quad (28)$$

определяется мощностью оптического излучения, генерируемого передатчиком P_T , эффективностью оптического передатчика η_T , усилением телескопа передатчика G_T , ошибкой наведения передатчика l_T , расстоянием между передатчиком и приемником L , эффективностью оптического приемника η_R ; коэффициентом усиления телескопа приемника G_R и ошибкой наведения приемника l_R .

Коэффициенты усиления телескопов передатчика и приемника с диаметрами D_T и D_R определяются выражениями

$$G_T = \left(\frac{\pi \cdot D_T}{\lambda_{opt}}\right)^2; \quad G_R = \left(\frac{\pi \cdot D_R}{\lambda_{opt}}\right)^2. \quad (29)$$

Заметим, что коэффициенты усиления телескопов могут быть различны для наземной и спутниковой станций. Потери наведения лазерного луча для передатчика и приемника соответственно определяются следующим образом [29]

$$l_T = \exp(-G_T \cdot \theta_T^2); \quad l_R = \exp(-G_R \cdot \theta_R^2). \quad (30)$$

Подставляя (29) и (30) в (28), находим

$$P_R = P_T \frac{t_{DA_T}}{A_T} \frac{t_{DA_R}}{A_R} \left(\frac{\pi \cdot D_T D_R}{4 \cdot \lambda_{opt} \cdot L}\right)^2 \exp\left[-\left(\frac{\pi \cdot D_T}{\lambda}\right)^2 \theta_T^2 - \left(\frac{\pi \cdot D_R}{\lambda_{opt}}\right)^2 \theta_R^2\right]. \quad (31)$$

Количественная оценка влияния атмосферы на принимаемую мощность оптического излучения. Полученные соотношения (1)–(32) позволяют перейти к количественной оценке влияния на принимаемую мощность оптического излучения атмосферной турбулентности, ошибки наведения и диаметра принимаемой апертуры при передаче лазерного сигнала между наземной станцией и спутником для системы лазерной связи с помощью программы Optisystem версии 20. Параметры анализируемого атмосферного канала представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры атмосферного канала

Параметр	Значение параметра
Длина волны, нм	1550
мощность передачи (дБм)	1.99
Диаметр апертуры передатчика, мм	100
Диаметр апертуры приемника, мм	100, 120, 140
Эффективность передатчика и приемника	0.8
Угол ошибки наведения передатчика и приемника, мкрад	0; 1; 2
Дополнительные потери на трассе Земля-ИСЗ, дБ	1
Высота над уровнем моря, км	20
Структура показателя преломления C_n^2 , м ^{-2/3}	$7.5885 \cdot 10^{-19}$

В соответствии с параметрами атмосферного канала на рис. 7–9 показаны зависимости принимаемой мощности оптического излучения (в дБм) от протяженности канала в отсутствии атмосферной турбулентности при трех значениях углов

ошибки наведения (0; 1 и 2 мкрад), диаметре апертуры передатчика 10 см и трех значениях диаметра апертуры приемника (100; 120 и 140 мм).

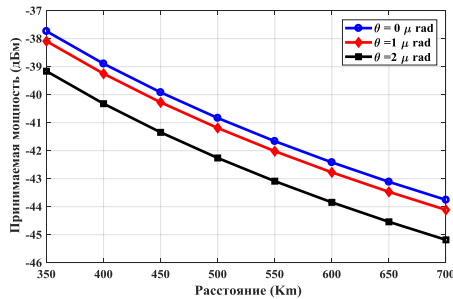


Рис. 7. Принимаемая мощность оптического излучения как функция протяженности канала при отсутствии атмосферной турбулентности. Диаметр апертуры приемника 100 мм

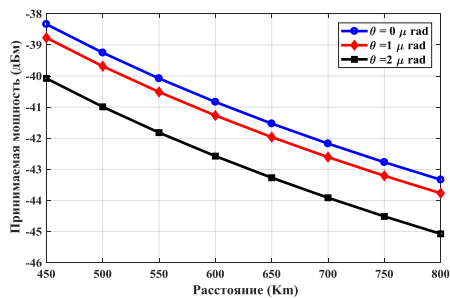


Рис. 8. Принимаемая мощность оптического излучения как функция протяженности канала при отсутствии атмосферной турбулентности. Диаметр апертуры приемника 120 мм

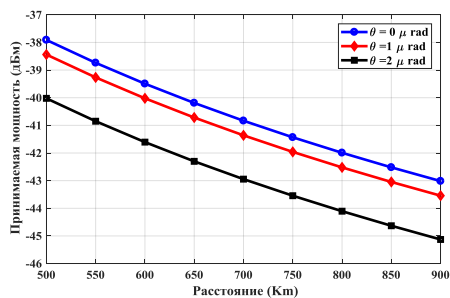


Рис. 9. Принимаемая мощность оптического излучения как функция протяженности канала при отсутствии атмосферной турбулентности. Диаметр апертуры приемника 140 мм

В данной статье продемонстрированы параметры анализа оптического канала, такие как угол ошибки наведения и диаметр апертуры приемника без учета и с учетом атмосферной турбулентности на различных расстояниях. На этих рисунках отражено поведение принимаемой оптической мощности в зависимости от расстояния при угле ошибки наведения, равном 0,1,2 мкрад, и диаметре апертуры приемника 100, 120, 140 мм. Результат показывает снижение принимаемой оптической мощности при увеличении расстояния передачи. Без учета атмосферной турбулентности

сти на рисунке 7 показана дальность канала передачи от 350 до 700 км при диаметре апертуры передатчика 100 мм и диаметре апертуры приемника 100 мм. Принятая оптическая мощность на 350 км зарегистрирована (-37,734 дБм, -38,091 дБм и -39,161 дБм), а на 700 км зарегистрирована (-43,755 дБм, -44,112 дБм и -45,182 дБм) при угле ошибки наведения, равном 0,1 и 2 соответственно. На рисунке 8 показан диапазон канала передачи от 450 до 800 км при диаметре апертуры передатчика 100 мм и диаметре апертуры приемника 120 мм. Принятая оптическая мощность на 450 км зарегистрирована (-38,333 дБм, -38,769 дБм и -40,075 дБм), а на 800 км зарегистрирована (-43,331 дБм, -43,766 дБм и -45,072 дБм) при угле ошибки наведения, равном 0,1, 2 соответственно. На рисунке 9 показан диапазон дальности канала передачи от 500 до 900 км при диаметре апертуры передатчика 100 мм и диаметре апертуры приемника 140 мм. Полученная оптическая мощность на 500 км зарегистрирована (-37,910 дБм, -38,438 дБм и -40,022 дБм), а на 900 км (-43,015 дБм, -43,543 дБм и -45,128 дБм) при угле ошибки наведения, равном 0, 1 и 2 мкрад соответственно.

Уровни принимаемой мощности оптического излучения подтверждают возможность работы спутниковой системе лазерной связи при передаче данных на расстояние до 700 км при диаметрах апертуры передающего и приёмного телескопов 100 мм при отсутствии турбулентности в атмосфере. При диаметре апертуры передающего телескопа 100 мм и приёмного телескопа 120 мм возможна передача данных на расстояние 450 ... 800 км. Увеличение диаметра приёмного телескопа до 140 мм увеличивает дальность до 900 км.

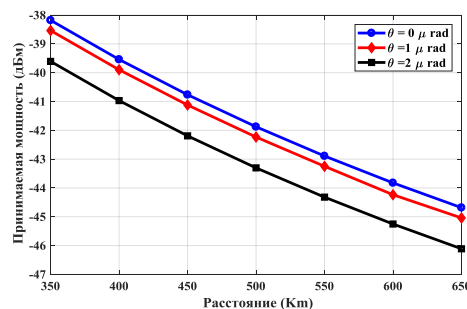


Рис. 10. Зависимость принимаемой оптической мощности от дальности канала при атмосферной турбулентности. Диаметр апертуры приемника 100 мм

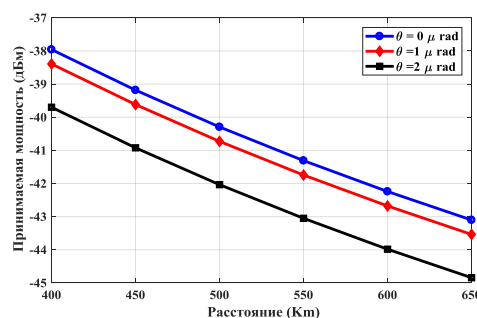


Рис. 11. Зависимость принимаемой оптической мощности от дальности канала при атмосферной турбулентности. Диаметр апертуры приемника 120 мм

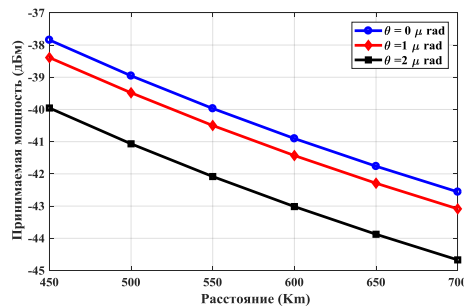


Рис. 12. Зависимость принимаемой оптической мощности от дальности канала при атмосферной турбулентности. Диаметр апертуры приемника 140 мм

На рис. 10–12 представлены зависимости принимаемой оптической мощности от дальности канала с учетом атмосферной турбулентности при трех значениях углов ошибки наведения (0; 1 и 2 мкрад), диаметре апертуры передатчика 100 мм и трех значениях диаметра апертуры приемника (100; 120 и 140 мм). Структурная характеристика флуктуаций показателя преломления принята равной $7,5885 \cdot 10^{-19} \text{ м}^{-2/3}$. На рисунке 10 показан диапазон канала передачи от 350 до 650 км при диаметре апертуры передатчика 100 мм и диаметре апертуры приемника 100 мм. Принятая оптическая мощность на 350 км зарегистрирована (-38,180 дБм, -38,536 дБм и -39,607 дБм), а на 650 км зарегистрирована (-44,684 дБм, -45,041 дБм и -46,112 дБм) при угле ошибки наведения, равном 0,1, 2 соответственно. На рис. 11 показан диапазон канала передачи от 400 до 650 км при диаметре апертуры передатчика 100 мм и диаметре апертуры приемника 120 мм. Принятая оптическая мощность на 400 км была зарегистрирована (-37,956 дБм, -38,392 дБм и -39,698 дБм), а на 650 км зарегистрирована (-43,101 дБм, -43,536 дБм и -44,842 дБм) при угле ошибки наведения, равном 0,1, 2 соответственно. На рис. 12 показан диапазон канала передачи от 450 до 700 км при диаметре апертуры передатчика 100 мм и диаметре апертуры приемника 140 мм. Принятая оптическая мощность на 450 км была зарегистрирована (-37,842 дБм, -38,390 дБм и -39,954 дБм), а на 700 км зарегистрирована (-42,557 дБм, -43,085 дБм и -44,670 дБм) при угле ошибки наведения, равном 0; 1 и 2 соответственно.

Уровни принимаемой мощности оптического излучения после прохождения через атмосферу с высотной турбулентностью, описываемой моделью Хафнагеля-Валли для структурной характеристики флуктуаций показателя преломления для трассы Земля-спутник, подтверждают возможность работы спутниковой системе лазерной связи при передаче данных на расстояние 350 ... 650 км при диаметрах апертуры передающего и приёмного телескопов 100 мм. При диаметре апертуры передающего телескопа 100 мм и приёмного телескопа 120 мм возможна передача данных на расстояние 400 ... 650 км. Увеличение диаметра приёмного телескопа до 140 мм увеличивает дальность до 700 км.

Сравнительный анализ графиков на рис. 7–12 показывает, что из-за высотной турбулентностью, описываемой моделью Хафнагеля-Валли для структурной характеристики флуктуаций показателя преломления для трассы Земля-спутник, дальность связи уменьшается с 900 км до 700 км (на 30 %) при диаметре апертуры передающего телескопа 100 мм и приёмного телескопа 140 мм.

Заключение. Лазерная спутниковая связь считается критически важной технологией для высокоскоростной связи с большой пропускной способностью. Лазерный луч можно использовать в качестве сигнала, передающего информацию и

данные в пределах прямой видимости, с высокой пропускной способностью и каналом связи между удаленными объектами. Действительно, наведение лазерного луча на движущийся объект, такой как спутник, или от него, является одним из самых сложных процессов для оптической космической связи.

Предложенное формирование когерентной оптической системы передачи для создания оптической однополосной модуляции с квадратурной фазовой манипуляцией (QPSK) исследуется с помощью теории преобразования Гильберта и интерферометра Маха Цендера с двойным приводом (DD-MZM). Анализ канала оценивается при воздействии атмосферной турбулентности. для трех значений углов ошибки наведения (0; 1 и 2 мрад), диаметра апертуры передатчика 10 см и трех значений диаметра апертуры приемника (100; 120 и 140 мм) при передаче лазерного сигнала между наземной станцией и спутник для системы лазерной связи на основе атмосферной высотной модели структурной характеристики флуктуаций показателя преломления Хафнагеля-Валли (H-V), где оптическая волна представляет собой коллимированный пучок с длиной волны 1550 нм.

Использование предложенных моделей для интенсивности принимаемого оптического излучения после прохождения трассы Земля-спутник с учетом воздействия эффектов турбулентной атмосферы и ошибок нацеливания антенн позволяет количественно оценить снижение интенсивности принимаемого спутником оптического излучения при различных высотах орбит спутников, диаметрах и эффективности оптических телескопов. принимаемую мощность определяют под влиянием таких параметров канала, как диаметр апертуры приемника при (100; 120 и 140 мм) и угол ошибки наведения при (1; 2 и 3 мкрад) в зависимости от расстояния. а под действием атмосферной турбулентности со структурой показателя преломления $7,5885 \cdot 10^{-19} \text{ м}^{-2/3}$.

Уровни принимаемой мощности оптического излучения подтверждают возможность работы спутниковой системе лазерной связи при передаче данных на расстояние до 700 км при диаметрах апертуры передающего и приёмного телескопов 100 мм при отсутствии турбулентности в атмосфере. При диаметре апертуры передающего телескопа 100 мм и приёмного телескопа 120 мм возможна передача данных на расстояние 450 ... 800 км. Увеличение диаметра приёмного телескопа до 140 мм увеличивает дальность до 900 км.

Уровни принимаемой мощности оптического излучения после прохождения через атмосферу с высотной турбулентностью, описываемой моделью Хафнагеля-Валли для структурной характеристики флуктуаций показателя преломления для трассы Земля-спутник, подтверждают возможность работы спутниковой системе лазерной связи при передаче данных на расстояние 350 ... 650 км при диаметрах апертуры передающего и приёмного телескопов 100 мм. При диаметре апертуры передающего телескопа 100 мм и приёмного телескопа 120 мм возможна передача данных на расстояние 400 ... 650 км. Увеличение диаметра приёмного телескопа до 140 мм увеличивает дальность до 700 км.

Сравнительный анализ графиков на рис. 7–12 показывает, что из-за высотной турбулентностью, описываемой моделью Хафнагеля-Валли для структурной характеристики флуктуаций показателя преломления для трассы Земля-спутник, дальность связи уменьшается с 900 км до 700 км (на 30 %) при диаметре апертуры передающего телескопа 100 мм и приёмного телескопа 140 мм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hyde G., Edelson B.I. Laser satellite communications: Current status and directions // Space Policy. – 1997. – Vol. 13, No. 1. – P. 47-54.
2. Toyoshima M. Trends in satellite communications and the role of optical free-space communications // Journal of Optical Networking. – 2005. – Vol. 4, No. 6. – P. 300-311.

3. Chan V.W.S. Optical satellite networks // Journal of Lightwave Technology. – 2003. – Vol. 21, No. 11. – P. 2811.
4. Phillips R.L., Andrews L.C. Analysis of a satellite communication channel: optical scintillations and fade statistics // Image Propagation through the Atmosphere. – SPIE, 1996. – Vol. 2828. – P. 189-197.
5. Sandalidis H.G. Performance of a laser earth-to-satellite link over turbulence and beam wander using the modulated gamma-gamma irradiance distribution // Applied optics. – 2011. – Vol. 50, No. 6. – P. 952-961.
6. Wang F. et al. Wander of a Gaussian-Beam Wave Propagating through Kolmogorov and Non-Kolmogorov Turbulence along Laser-Satellite Communication Uplink // Atmosphere. – 2022. – Vol. 13, No. 2. – P. 162.
7. Toyoda M. Intensity fluctuations in laser links between the ground and a satellite // Applied optics. – 2005. – Vol. 44, No. 34. – P. 7364-7370.
8. Dios Otín V.F. et al. Scintillation and beam-wander analysis in an optical ground station-satellite uplink. – 2004.
9. Jingsong X., Xiaolei Z. Scintillation of a tracked Gaussian beam for ground-to-satellite laser communication. – 2010.
10. Darcie T.E. et al. Lightwave system using microwave subcarrier multiplexing // Electronics Letters. – 1986. – Vol. 15, No. 22. – P. 774-775.
11. Hui R. et al. Subcarrier multiplexing for high-speed optical transmission // Journal of lightwave technology. – 2002. – Vol. 20, No. 3. – P. 417.
12. Salter M. et al. Circuits and system simulations for 100Gb/s optical SCM transmission // 2009 16th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems-ICECS 2009). – IEEE, 2009. – P. 960-963.
13. Smith G.H., Novak D., Ahmed Z. Overcoming chromatic-dispersion effects in fiber-wireless systems incorporating external modulators // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. – 1997. – Vol. 45, No. 8. – P. 1410-1415.
14. Smith G.H., Novak D., Ahmed Z. Technique for optical SSB generation to overcome dispersion penalties in fibre-radio systems // Electronics letters. – 1997. – Vol. 33, No. 1. – P. 74-75.
15. Nirmalathas A., Smith G.H., Novak D. Sensitivity analysis of optical SSB generation using a dual-electrode Mach-Zehnder modulator // International Topical Meeting on Microwave Photonics. Technical Digest (including High Speed Photonics Components Workshop) (Cat. No. 98EX181). – IEEE, 1998. – P. 79-82.
16. Fernandez E. et al. Link budget model and applications for laser communications through the atmosphere // Free-Space Laser Communication Technologies V. – SPIE, 1993. – Vol. 1866. – P. 191-202.
17. Andrews L.C., Phillips R.L. Laser beam propagation through random media // Laser Beam Propagation Through Random Media: Second Edition. – 2005.
18. Щербakov В.В., Солодков А.Ф., Задерновский А.А. Расширенные форматы однополосной модуляции двухэлектродного модулятора Маха-Цендера // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2019. – Т. 1, № 1. – С. 395-399.
19. Хуссейн А.М.М., Румянцев К.Е. Формирование однополосной квадратурной фазовой манипуляции радиосигналов на поднесущих частотах в когерентной оптической системе коммуникации // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – №. 5. – С. 209-220.
20. Cuyt A.A.M. et al. Handbook of continued fractions for special functions. – Springer Science & Business Media, 2008.
21. Бейтмен Г., Эрдейи А. Функции Бесселя, функции параболического цилиндра, ортогональные многочлены // Высшие трансцендентные функции. Т. 2. – 2-е изд.: пер. с англ. Н.Я. Виленкина. – М.: Наука, 1974. – 296 с.
22. Andrews L.C., Phillips R.L., Hopfen C.Y. Laser beam scintillation with applications. Т. 99. – SPIE press, 2001.
23. Alda J. Laser and Gaussian beam propagation and transformation // Encyclopedia of optical engineering. – 2003. – Vol. 999. – P. 1013-1013.
24. Saleh B.E.A., Teich M.C. Fundamentals of photonics. – John Wiley & sons, 2019.
25. Ghassemlooy Z., Popoola W., Rajbhandari S. Optical wireless communications: system and channel modelling with Matlab®. – CRC press, 2019.

26. Kaushal H., Jain V.K., Kar S. Free space optical communication. – New Delhi: Springer india, 2017. – 60 p.
27. Toyoshima M. et al. Optimum divergence angle of a Gaussian beam wave in the presence of random jitter in free-space laser communication systems // JOSA A. – 2002. – Vol. 19, No. 3. – P. 567-571.
28. Mahmood H.A., Yvgen'Evich R.K., Shookor A.K.H. Evolution of radio over free space optical communication utilizing subcarrier multiplexing/amplitude shift keying // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 5 (215). – С. 141-149.
29. Aviv D. Laser space communications. – Artech, 2006.

REFERENCES

1. Hyde G., Edelson B.I. Laser satellite communications: Current status and directions, *Space Policy*, 1997, Vol. 13, No. 1, pp. 47-54.
2. Toyoshima M. Trends in satellite communications and the role of optical free-space communications, *Journal of Optical Networking*, 2005, Vol. 4, No. 6, pp. 300-311.
3. Chan V.W.S. Optical satellite networks, *Journal of Lightwave Technology*, 2003, Vol. 21, No. 11, pp. 2811.
4. Phillips R.L., Andrews L.C. Analysis of a satellite communication channel: optical scintillations and fade statistics, *Image Propagation through the Atmosphere*. SPIE, 1996, Vol. 2828, pp. 189-197.
5. Sandalidis H.G. Performance of a laser earth-to-satellite link over turbulence and beam wander using the modulated gamma-gamma irradiance distribution, *Applied optics*, 2011, Vol. 50, No. 6, pp. 952-961.
6. Wang F. et al. Wander of a Gaussian-Beam Wave Propagating through Kolmogorov and Non-Kolmogorov Turbulence along Laser-Satellite Communication Uplink, *Atmosphere*, 2022, Vol. 13, No. 2, pp. 162.
7. Toyoda M. Intensity fluctuations in laser links between the ground and a satellite, *Applied optics*, 2005, Vol. 44, No. 34, pp. 7364-7370.
8. Dios Otín V.F. et al. Scintillation and beam-wander analysis in an optical ground station-satellite uplink. – 2004.
9. Jingsong X., Xiaolei Z. Scintillation of a tracked Gaussian beam for ground-to-satellite laser communication, 2010.
10. Darcie T.E. et al. Lightwave system using microwave subcarrier multiplexing, *Electronics Letters*, 1986, Vol. 15, No. 22, pp. 774-775.
11. Hui R. et al. Subcarrier multiplexing for high-speed optical transmission, *Journal of lightwave technology*, 2002, Vol. 20, No. 3, pp. 417.
12. Salter M. et al. Circuits and system simulations for 100Gb/s optical SCM transmission, 2009 16th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems-ICECS 2009. IEEE, 2009, pp. 960-963.
13. Smith G.H., Novak D., Ahmed Z. Overcoming chromatic-dispersion effects in fiber-wireless systems incorporating external modulators, *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, 1997, Vol. 45, No. 8, pp. 1410-1415.
14. Smith G.H., Novak D., Ahmed Z. Technique for optical SSB generation to overcome dispersion penalties in fibre-radio systems, *Electronics letters*, 1997, Vol. 33, No. 1, pp. 74-75.
15. Nirmalathas A., Smith G.H., Novak D. Sensitivity analysis of optical SSB generation using a dual-electrode Mach-Zehnder modulator, *International Topical Meeting on Microwave Photonics. Technical Digest (including High Speed Photonics Components Workshop) (Cat. No. 98EX181)*. IEEE, 1998, pp. 79-82.
16. Fernandez E. et al. Link budget model and applications for laser communications through the atmosphere, *Free-Space Laser Communication Technologies V*. SPIE, 1993, Vol. 1866, pp. 191-202.
17. Andrews L.C., Phillips R.L. Laser beam propagation through random media, *Laser Beam Propagation Through Random Media: Second Edition*, 2005.
18. Shcherbakov V.V., Solodkov A.F., Zadernovskiy A.A. Rasshirennyye formaty odnopolosnoy modulyatsii dvukhelektrodnogo modulyatora Makha-Tsendera [Extended formats of single-sideband modulation of a two-electrode Mach-Zehnder modulator], *Elektronika i mikroelektronika SVCh* [Microwave Electronics and Microelectronics], 2019, Vol. 1, No. 1, pp. 395-399.

19. *Khusseyn A.M.M., Rumyantsev K.E.* Formirovanie odnopolosnoy kvadraturnoy fazovoy manipulyatsii radiosignalov na podnesushchikh chastotakh v kogerentnoy opticheskoy sisteme kommunikatsii [Formation of single-sideband quadrature phase shift keying of radio signals at subcarrier frequencies in a coherent optical communication system], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 5, pp. 209-220.
20. *Cuyt A.A.M. et al.* Handbook of continued fractions for special functions. Springer Science & Business Media, 2008.
21. *Beytmen G., Erdeyi A.* Funktsii Besselya, funktsii parabolicheskogo tsilindra, ortogonal'nye mnogochleny [Bessel functions, parabolic cylinder functions, orthogonal polynomials], *Vysshie transsendentnye funktsii* [Higher transcendental functions]. Vol. 2. 2nd ed.: trans. from engl. N.Ya. Vilenkina. Moscow: Nauka, 1974, 296 p.
22. *Andrews L.C., Phillips R.L., Hopen C.Y.* Laser beam scintillation with applications. Vol. 99. SPIE press, 2001.
23. *Alda J.* Laser and Gaussian beam propagation and transformation, *Encyclopedia of optical engineering*, 2003, Vol. 999, pp. 1013-1013.
24. *Saleh B.E.A., Teich M.C.* Fundamentals of photonics. John Wiley & sons, 2019.
25. *Ghassemlooy Z., Popoola W., Rajbhandari S.* Optical wireless communications: system and channel modelling with Matlab®. CRC press, 2019.
26. *Kaushal H., Jain V.K., Kar S.* Free space optical communication. New Delhi: Springer india, 2017, 60 p.
27. *Toyoshima M. et al.* Optimum divergence angle of a Gaussian beam wave in the presence of random jitter in free-space laser communication systems, *JOSA A*, 2002, Vol. 19, No. 3, pp. 567-571.
28. *Mahmood H.A., Yvgen'evich R.K., Shookor A.K.H.* Evolution of radio over free space optical communication utilizing subcarrier multiplexing/amplitude shift keying, *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 5 (215), pp. 141-149.
29. *Aviv D.* Laser space communications. Artech, 2006.

Статью рекомендовала к опубликованию к.т.н. К.Б. Дахкильгова.

Махмуд Хуссейн Ахмед Махмуд – Дияла университет; e-mail: hussein.ahmed8282@gmail.com; г. Дияла, Ирак; кафедра инженерных коммуникаций.

Румянцев Константин Евгеньевич – Южный федеральный университет; e-mail: rke2004@mail.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра информационной безопасности и телекоммуникационных систем.

Аль-Бегат Адиль Хамид Шакир – Технический институт Наджафа; Технический университет Аль-Фурат Аль-Авсат; e-mail: albegatadil72@gmail.com; Наджаф, Ирак.

Hussein Ahmed Mahmood – University of Diyala; e-mail: hussein.ahmed8282@gmail.com; Diyala, Iraq; the department of communications engineering.

Rumyantsev Konstantin Yvgen'evich – Southern Federal University; e-mail: rke2004@mail.ru; Taganrog, Russia; the department of information security of telecommunication systems.

Al-Begat Adil Hameed Shakir – Najaf Technical Institute, Al-Furat Al-Awsat Technical University; e-mail: albegatadil72@gmail.com; Najaf, Iraq.

Раздел III. Электроника, нанотехнологии и приборостроение

УДК 004.94

DOI 10.18522/2311-3103-2023-4-192-200

А.А. Кажаров

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ 3D-ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЛИТИЕВЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

В данной работе рассмотрено 3D-проектирование литий-ионных аккумуляторных батарей для различных систем накопления энергии, в частности для средств индивидуальной мобильности. Актуальность разработки обоснована стремительно растущим рынком накопителей энергии на основе лития. Целью работы является сокращение времени проектирования индивидуальной литиевой батареи. Задача – создание информационной системы с автоматизированным проектированием батареи на основе заданных ограничений. Проведен обзор программных решений для создания 3D-моделей. Были использованы следующие программные технологии: программное обеспечение для создания трёхмерной компьютерной графики Blender, программная библиотека для создания и использования 3D-моделей ThreeJS. Разработан программный комплекс для проектирования литиевых аккумуляторов в 3D на основе клиент-серверной архитектуры. Разработанное решение позволяет формировать корпус и холдер автоматически с возможностью выгрузки файлов и печати на 3D принтере, а также провозволяет сократить процесс сборки аккумулятора благодаря автоматизированному проектированию и моделированию литиевой аккумуляторной батареи. Данная система проектирования способна находить решения на основе нечетких правил, благодаря чему у оператора есть возможность выбирать из множества решений, удовлетворяющих заданным ограничениям. Разработанное решение позволило сократить время сборки батареи в среднем на 40–50%, время проектирования до 1 секунды. Это дало возможность сократить стоимость изготовления батареи на 5–20%.

3D-моделирование; проектирование; САПР; литиевый аккумулятор; электропротранспорт.

A.A. Kazharov

USING 3D TECHNOLOGY TO DESIGN LITHIUM BATTERIES

This paper examines the 3D design of lithium-ion batteries for various energy storage systems, in particular for personal mobility devices. The relevance of the development is justified by the rapidly growing market for lithium-based energy storage devices. The goal of the work is to reduce the design time of a custom lithium battery. The task is to create an information system with automated battery design based on specified restrictions. A review of software solutions for creating 3D models was conducted. The following software technologies were used: software for creating three-dimensional computer graphics Blender, software library for creating and using 3D models ThreeJS. A software package has been developed for designing lithium batteries in 3D based on client-server architecture. The developed solution allows you to form the case and holder automatically with the ability to upload files and print on a 3D printer, and also allows you to shorten the battery assembly process thanks to automated design and modeling of a lithium bat-

tery. This design system is capable of finding solutions based on fuzzy rules, allowing the operator to choose from a variety of solutions that satisfy given constraints. The developed solution made it possible to reduce the battery assembly time by an average of 40–50%, and the design time to 1 second. This made it possible to reduce the cost of battery manufacturing by 5–20%.

3D modeling; design; CAD; lithium battery; electric transport.

Введение. Актуальность изучения вопросов 3D-моделирования литий-ионных аккумуляторных батарей (ЛИАБ) обусловлена стремительным ростом спроса и предложения на данный вид накопителей энергии. Благодаря устойчивой химии современных литиевых аккумуляторов производители добились высоких показателей в таких критических характеристиках как весовая и объемная плотность энергии и ресурс. Это позволило сделать литиевые аккумуляторы одними из самых востребованных видов накопителей энергии [1]. Области применения ЛИАБ самые различные: высокотокковые электроинструменты, электросамокаты, электроскутеры, электровелосипеды, инвалидные коляски на электроприводе, альтернативная энергетика, бытовые приборы, фонари, электромобили, смартфоны и т. д. В каждой из перечисленных областей существуют множество различных видов электроустройств, а те в свою очередь имеют множество моделей [2]. Если речь идет об электроинструментах, то можно выделить такие виды как электрошуруповерт, электросекатор, электропила и т.д. В свою очередь каждый из этих видов имеет различные модели от разных производителей и для разных сфер применения — отсутствует единый стандарт ЛИАБ, что обусловлено индивидуальным подходом к проектированию аккумулятора для каждого типа продукта. Если для одного потребителя энергии необходима высокая токоотдача, то для других критическим может быть рабочий температурный диапазон или емкость. В связи с этим проектирование и 3D-моделирование [3] является важной задачей, потребность в нем растет вместе с ростом применения ЛИАБ в различных областях науки и техники. Особенно актуально проектирование индивидуальных решений ЛИАБ для средств индивидуальной мобильности (СИМ).

Проблемы 3D-моделирования. Следует сразу отметить, что литиевые аккумуляторы бывают различных типов в зависимости от выбора катода [4]:

- 1) обычные литий-ионные (Li-Ion);
- 2) литий-железо-фосфатные (LiFePo4);
- 3) литий-никель-марганец-кобальт-оксидные (Li-NMC);
- 4) литий-титанатные (LTO) и т.д.

Сам по себе выбор типа литиевого аккумулятора уже является задачей проектирования, так как чаще всего выбор не всегда очевиден. Характеристики каждого типа варьируются с течением времени, так как технология производства все время улучшается, а, значит, при условно одной и той же химии достигаются разные значения таких параметров как весовая плотность энергии, объемная плотность энергии и т.д. В данной статье для упрощения рассмотрены лишь аккумуляторы типа Li-Ion для небольших аккумуляторных батарей до 5кВтч. ЛИАБ состоит из аккумуляторных ячеек Li-Ion и блока управления – система управления батареями (СУБ). Таким образом, речь идет не о проектировании однотипных элементов. Проблемы 3D-моделирования во многом определяются задачами САПР: компоновка, разбиение, размещение, трассировка [5, 6]. Моделирование или проектирование ЛИАБ является многокритериальной задачей. Основные критерии оптимизации:

- 1) стоимость ЛИАБ;
- 2) емкость ЛИАБ;
- 3) габариты;
- 4) вес;
- 5) мощность.

Емкость, габариты и вес, чаще всего, используются в контексте максимальных граничных условий. Допустим, необходимо спроектировать ЛИАБ с емкостью 20Ач, поместив его в посадочное место с габаритами 310 x 160 x 80 мм. Цель оптимизации: минимизация стоимости ЛИАБ. Постановка задачи может меняться в зависимости от требований рынка. Примером иной постановки задачи может служить та же задача, но без указания емкости ЛИАБ, критерием будет являться ёмкость ЛИАБ, а целью оптимизации, соответственно — максимизация критерия. Мощность задается в Ваттах и является минимальным граничным условием, то есть устанавливается минимальная граница мощности ЛИАБ, чтобы она могла удовлетворить потребителя достаточной токоотдачей. Сборку ЛИАБ можно условно разделить на 3 этапа:

1. Составление технического задания (ТЗ) и определения параметров ЛИАБ – занимает от 1-2 часов.
2. Проектирование ЛИАБ – занимает от 1-2 часов.
3. Сборка ЛИАБ – в среднем 4 часа на изготовление ЛИАБ.

Как видно, значительную часть временных затрат приходится на составление ТЗ, что связано с выбором типа литий-ионных аккумуляторов в том числе, и проектирование ЛИАБ. В этой связи необходимо иметь возможность не только решения задач оптимизации, но и 3D-моделирования ЛИАБ для точного воспроизведения топологии аккумуляторных батарей. Это значительно сокращает процесс проектирования и сборки ЛИАБ, а значит и стоимость производства или сборки. Существующие решения не позволяют детально проектировать ЛИАБ. Как правило, такие решения ограничиваются двумерным отображением лишь самих аккумуляторных ячеек без важнейшей детализации по трассировке балансировых проводов, платы СУБ и т.д. Такие схематичные визуализации не позволяют инженеру существенно сократить время сборки ЛИАБ. Другими словами они не решают ни одной задачи САПР.

Обзор программных решений для 3D-моделирования. Для 3D-моделирования были рассмотрены несколько программных решения:

1. DAZ Studio 3D.
2. XNALara XPS poser.
3. Cloak 3D.
4. Zbrush.
5. Autodesk 3Ds max.
6. 3D modelling App.
7. Blender 3D.
8. Metasequoia.

При разработке стабильного устойчивого программного комплекса необходимо использовать доступные инструменты со стабильной поддержкой от производителя, чтобы избежать эффекта «технологического долга» [7]. Данным термином обозначают явление накопления проблем в программном обеспечении (ПО), связанными с низким качеством кода или с устаревшим инструментарием. Технологический долг может появиться даже для ПО, разработанного с использованием новейших инструментов и технологий, если не обновлять время от времени ПО. Чаще всего, окружение, в котором функционирует ПО не является постоянным. Простейшие примеры изменения окружения – обновление операционной системы (ОС), браузера, появление новых промышленных стандартов. В связи с этим главным критерием при выборе ПО для создания 3D-моделей было отсутствие необходимости лицензий на их использование и свободный доступ к ПО. В этом случае исключается риск отзыва лицензии со стороны производителя. Данное ограничение снимает возможность использования таких решений как «Zbrush» и

«Autodesk 3Ds max». DAZ Studio 3D, как и XNALara XPS poser, являются решениями для работы со «скульптурами» – человеческими моделями. «Cloak 3D» и «3D modelling App» работают лишь в среде ОС Android. Это серьезное ограничение, которое делает неудобным их использованием. Наиболее подходящими программными решениями являются «Blender 3D» [8] и «Metasequoia». Для создания 3D моделей был выбран именно «Blender 3D», так как данный продукт разработан и поддерживается в том числе для ОС Linux [9]. Это является существенным преимуществом при разработке программных решений в условиях растущих ограничений на предоставление лицензий для ПО. Данная программа позволяет использовать популярные форматы 3D моделей: DAE, ABC, OBJ, STL, PLY, FBX, GLB, GLTF, X3D. В работе используется формат STL, так как данный формат поддерживается другими программными решениями: как слайсером [10] для 3D печати (Cura), так и фреймворками задействованными при разработке ПО.

3D-моделирование литиевой аккумуляторной батареи. Самый распространенный аккумулятор типа Li-Ion на данный момент имеет форм-фактор 18650, что расшифровывается следующим образом: диаметр 18 мм, высота 65 мм. Также при производстве ЛИАБ используются другие цилиндрические аккумуляторные ячейки со следующими форм-факторами: 21700, 26650, 32700, 4680. При создании 3D модели цилиндрического аккумулятора за основу был взят форм-фактор 18650. На рис. 1 изображена 3D-модель ячейки формата 18650 в среде моделирования «Blender 3D».

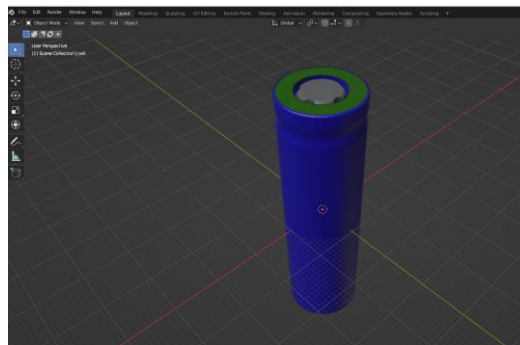


Рис. 1. 3D-модель Li-Ion аккумулятора 18650

При сборке ЛИАБ крайне важно создавать безопасные решения. Одним из главных способов, как обезопасить ЛИАБ, является использование изолирующих плюсовые контакты колец. Они позволяют исключить механическую деформацию изоляционных термоусадок аккумуляторных ячеек. На 3D модели они обозначены зеленым цветом. Благодаря этому инженеру, изготавливающему ЛИАБ, можно подробно рассмотреть не только сами ячейки, но изолирующие материалы, которые необходимо применить при изготовлении ЛИАБ. Также другой важной компонентой является использование системы управления батареями (СУБ). Данная система представлена в виде печатной платы, выполняющей следующие задачи:

- 1) ограничение тока заряда батареи;
- 2) ограничение тока разряда батареи;
- 3) отключение батареи от потребителя тока при индикации высокой температуры;
- 4) балансировка аккумуляторных ячеек по напряжению тока;
- 5) отключение батареи от потребителя при индикации высокой силы тока;
- 6) отключение батареи от источника заряда при индикации высокой силы тока.

Существуют корпусные и бескорпусные СУБ. Отличие корпусных СУБ в том, что они защищены плотным герметичным диэлектрическим корпусом, имея на выходе силовые провода и слаботочные провода для балансировки ЛИАБ. В ПО Blender 3D также была разработана 3D модель корпусной СУБ с силовыми и балансировочными проводами. На рис. 2 изображена отрисовка такой СУБ.

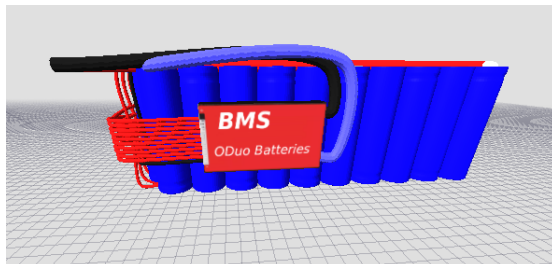


Рис. 2. 3D модель Li-Ion аккумулятора 18650

Разработка САПР. Разработан программный комплекс для автоматизированного проектирования ЛИАБ. Программный комплекс включает в себя серверную часть, разработанную с помощью языка программирования Java, и клиентскую часть, разработанную с помощью языков программирования HTML, JavaScript/JQuery [11]. Результатом проектирования является 3D-модель аккумуляторной батареи. Для отрисовки 3D модели всей аккумуляторной батареи на клиентской стороне использован фреймворк ThreeJS [12]. Данный фреймворк – это кроссбраузерная библиотека JavaScript [13], которая используется не только для отображения, но и для создания как статических 3D моделей, так и анимированных моделей при разработке веб-приложений. С помощью данного фреймворка создается 3D визуализация спроектированной на серверной части ЛИАБ. Как видно, на рис. 3 программа детально отобразила не только сами аккумуляторные ячейки, но и шины соединений, силовые провода, протрассированы балансировочные провода, размещена плата СУБ.

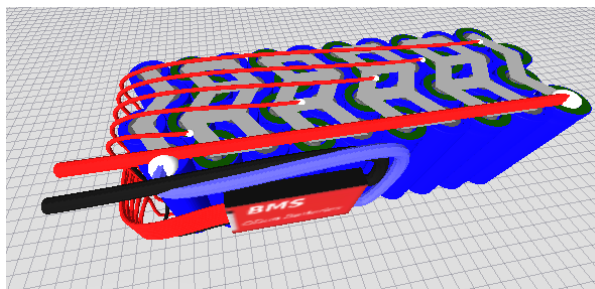


Рис. 3. 3D модель Li-Ion аккумулятора 18650

В разработанном веб-приложении предлагаются различные способы 3D компоновки ЛИАБ. Это позволяет оператору оценить размеры ЛИАБ и выбрать оптимальный вариант. Клиент-серверная архитектура позволяет обрабатывать множественные запросы на проектирование ЛИАБ параллельно.

Как видно на рис. 2 и 3 электрические провода отображаются кривыми. Для наглядности использованы кривые Безье [14] как для силовых проводов, так и для балансировочных проводов. Также отображены диэлектрические защиты плюсо-

вых контактов зелеными кольцами. Разработанная система также позволяет экспортировать 3D модель холдера в формате STL, что позволит его напечатать на 3D принтере.

Экспериментальные результаты. Серверная часть системы развернута на компьютере со следующими характеристиками: одноядерный процессор 1.33 ГГц, ОЗУ 1Гб, жесткий диск NVMe 15Гб. Клиентская часть реализована с адаптивным дизайном [15], что позволяет запрашивать проектирование и отрисовывать 3D модели как через персональный компьютер, так и через смартфон. На рис. 4 показан пример выдачи решений на основе введенных данных: напряжение, емкость, мощность. Также могут быть заданы и габаритные ограничения.

Напряжение(B)

Емкость(Ah)

Мощность мотора(W)

[Показать дополнительные настройки](#)

АКБ	Габариты	Цена (руб.)	Время сборки (дней)	
Li-NMC 24B 67Ah	403 x 110 x 89 мм.	23116	3	
Li-NMC 24B 42Ah	403 x 115 x 68 мм.	23951	60	
Li-NMC 24B 42Ah	403 x 115 x 68 мм.	23951	3	
Li-NMC 24B 67Ah	407 x 110 x 89 мм.	24334	3	
Li-NMC 24B 42Ah	407 x 115 x 68 мм.	25169	60	
Li-NMC 24B 42Ah	407 x 115 x 68 мм.	25169	3	
Li-NMC 24B 58Ah	263 x 165 x 89 мм.	25962	60	
Li-NMC 24B 58Ah	263 x 165 x 89 мм.	25962	3	
Li-Ion 24B 40Ah	170 x 151 x 75 мм.	26516	3	
Li-NMC 24B 58Ah	267 x 165 x 89 мм.	27180	60	

Showing 1 to 10 of 16 rows rows per page 1 2

Рис. 4. Пример выдача множества решений

Как видно из рис. 4, разработанная система предлагает 16 различных решений. Каждое решение отличается по массо-габаритным характеристикам, а также емкостью. Несмотря на заданную емкость система допускает незначительные отклонения в емкости при поиске решений. Таким образом, разработанная система выполняет функции системы поддержки принятия решений (СППР) [16] с использованием нечетких правил [17]. Есть возможность просмотра любого решения из данного списка в интерактивном формате 3D. На рис. 5 приведен один из примеров проектирования ЛИАБ из списка на основе вышеуказанных вводных данных. Характеристики решения: габариты – 289 x 200 x 75 мм., масса – 9110гр., емкость – 42Ач, тип ячеек – Lifepo4, типоразмер – 32700.

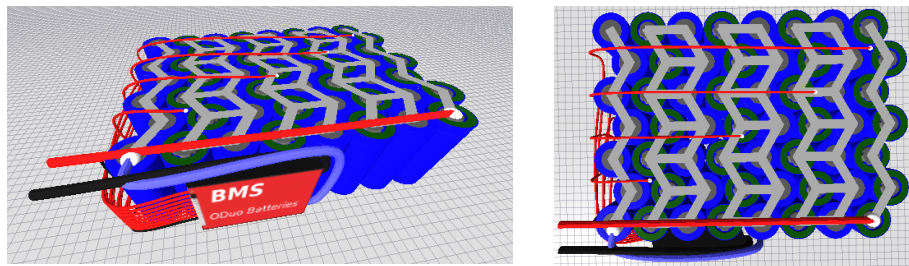


Рис. 5. Проект Lifepo4 24B 42Ah из ячеек формата 32700

Данное решение основано на рассчитанной схеме соединения 8S6P – 8 последовательно соединенных блоков, в каждом из которых по 6 ячеек, соединенных параллельно. Для этого решения система определила прямоугольное размещение. Поскольку используется клиент-серверная архитектура, рендеринг 3D-модели [18] происходит на клиентской части и быстродействие зависит от используемого устройства. Тестирование проводилось на десятках различных устройств, включая персональные компьютеры и смартфоны. Время рендеринга 3D модели не составляет более 400 мс. Время поиска и выдачи решений данной СППР – 100-400 мс.

Заключение. Разработанный программный комплекс позволяет менее, чем за секунду, создавать 3D модели ЛИАБ на основе шаблонов компоновки элементов сборки. Используемые технологии позволяют в режиме реального времени генерировать различные компоновки ЛИАБ и проектировать с учетом заданных ограничений. Проектирование в разработанной системе значительно облегчает инженеру разработку и сборку ЛИАБ, так как 3D визуализация является наглядным проектом. Разработанный программный комплекс отвечает на 2 важных вопроса проектирования ЛИАБ: возможно ли создать ЛИАБ в заданных ограничениях и какими техническими характеристиками обладает ЛИАБ. Благодаря разработанному программному комплексу оптимизировано проектирование ЛИАБ и снижена ее стоимость за счет сокращения объема работы оператора и инженера. В зависимости от размера ЛИАБ стоимость сокращается от 5% до 20%. На базе данного решения спроектированы и эксплуатируются более 100 ЛИАБ. Предложенный программный комплекс позволяет имплементировать эволюционные и роевые алгоритмы для проектирования ЛИАБ и решения задач САПР [19]. Данное решение реализовано и функционирует на веб-сайте www.oduobattery.ru [20].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Круглов П.Е.* Основные преимущества и недостатки литий-ионных аккумуляторов // Качество в производственных и социально-экономических системах: Сб. научных трудов 8-й международной научно-технической конференции. – Курск, 2020. – С. 247-250.
2. *O'Dea S.* Lithium-ion batteries – statistics & facts. – URL: <https://www.statista.com/top-ics/2049/lithium-ion-battery-industry>. – Режим доступа: свободный (дата обращения: 22.04.2023).
3. *Серова М.* Учебник-самоучитель по трехмерной графике в Blender 3D. Моделирование, дизайн, анимация, спецэффекты. – М.: Изд-во «Солон-пресс», 2021. – 272 с.
4. *Мелансон С.* Сравнение шести типов литий-ионных аккумуляторов и их потенциала для СНЭЭ // Энергоэксперт. – 2023. – № 3 (87). – С. 64-65.
5. *Курейчик В.В., Курейчик В.В.* Биоинспирированный поиск при проектировании и управлении // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 11 (136). – С. 178-183.
6. *Курейчик В.М., Кажаров А.А.* Алгоритмы эволюционного роевого интеллекта в решении задачи разбиения графа // Сб. трудов Всероссийской научно-технической конференции "Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС)". – 2012. – Т. 1. – С. 237-242.
7. *Oscar Baechler, Xury Greer.* Blender 3D By Example. – Second Edition. – Packt Publishing Ltd, 2020. – 658 p.
8. *Neil Ernst, Julien Delange.* Technical Debt in Practice: How to Find It and Fix It. – The MIT Press, 2021. – 288 p.
9. *Лисьяк В.В., Кулиев Э.В.* Программное обеспечение слайсинга в 3D-печати // Тр. Международного научно-технического конгресса «Интеллектуальные системы и информационные технологии – 2020» («ИС и ИТ-2020», «IS&IT'20»). Научное издание в 2-х т. Т. 1. – С. 331-347.
10. *Уэйли Б., Хейн Т., Снайдер Г., Немет Э.* Unix и Linux: руководство системного администратора. – 4-е изд. – Изд-во: Диалектика-Вильямс, 2018. – 1314 с.
11. *Бер Бибо, Иегуда Кац.* jQuery. Подробное руководство по продвинутому JavaScript. – 2-е изд. – Изд-во «Символ-Плюс», 2023. – 612 с.

12. Jos Dirksen. Learn Three.js. – 4 ed. – Packt Publishing Ltd, 2023. – 554 p.
13. Лукас Д.К. Тестирование JavaScript. – Изд-во «Manning», 2023. – 592 с.
14. Кривая Безье. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Кривая_Безье (дата обращения: 20.06.2022).
15. Кедлек Т. Адаптивный дизайн. Делаем сайты для любых устройств. – СПб.: Изд-во «Питер», 2013. – 289 с.
16. Сизова О.В. Системы поддержки принятия решений: учеб. пособие. – Изд-во: ИГХТУ – Иваново, 2017. – 61 с.
17. Гладков Л.А., Кажаров А.А. Гибридный нечетко-генетический алгоритм для решения задачи коммивояжера // Тр. IV-й Международной научно-практической конференции "Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте". – Коломна, 2009.
18. Рендер (Рендеринг) – что это такое, как работает и зачем нужен в 3D, видео и играх. – URL: <https://dzen.ru/a/YMmwcJgx3UYavMSP> (дата обращения: 10.07.2023).
19. Курейчик В.М., Кажаров А.А. Роевой интеллект в решении графовых задач // Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2013): Сб. трудов. – СПб., 2013. – С. 31-34.
20. ODUO Batteries: первый сайт кастомных батарей. – URL: <https://dzen.ru/media/id/632630e9302fdb6e65085791/oduo-batteries-pervyi-sait-kastomnyh-akb-632634dc47b76016e2b5e850> (дата обращения: 12.08.2023).

REFERENCES

1. Kruglov P.E. Osnovnye preimushchestva i nedostatki lityi-ionnykh akkumulyatorov [The main advantages and disadvantages of lithium-ion batteries], *Kachestvo v proizvodstvennykh i sotsial'no-ekonomicheskikh sistemakh: Sb. nauchnykh trudov 8-y mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Quality in production and socio-economic systems: Collection of scientific papers of the 8th international scientific and technical conference]. Kursk, 2020, pp. 247-250.
2. O'Dea S. Lithium-ion batteries – statistics & facts. Available at: <https://www.statista.com/topics/2049/lithium-ion-battery-industry> (Accessed 22 April 2023).
3. Serova M. Uchebnik-samouchitel' po trekhmernoy grafike v Blender 3D. Modelirovanie, dizayn, animatsiya, spetseffekty [Self-instruction manual on three-dimensional graphics in Blender 3D. Modeling, design, animation, special effects]. Moscow: Izd-vo «Solon-press», 2021, 272 p.
4. Melanson S. Sravnenie shesti tipov lityi-ionnykh akkumulyatorov i ikh potentsiala dlya SNEE [Comparison of six types of lithium-ion batteries and their potential for energy saving], *Energoekspert* [Energexpert], 2023, No. 3 (87), pp. 64-65.
5. Kureychik V.V., Bioinspirirovannyi poisk pri proektirovanii i upravlenii [Bio-inspired search in design and management], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 11 (136), pp. 178-183.
6. Kureychik V.M., Kazharov A.A. Algoritmy evolyutsionnogo roevogo intellekta v reshenii zadachi razbieniya grafa [Algorithms for evolutionary swarm intelligence in solving the problem of graph partitioning], *Sb. trudov Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES)"* [Collection of articles. Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference "Problems in the development of advanced micro- and nanoelectronic systems (MES)"], 2012, Vol. 1, pp. 237-242.
7. Oscar Baechler, Xury Greer. Blender 3D By Example. Second Edition. Packt Publishing Ltd, 2020, 658 p.
8. Neil Ernst, Julien Delange. Technical Debt in Practice: How to Find It and Fix It. The MIT Press, 2021, 288 p.
9. Lisyak V.V., Kuliev E.V. Programmnoe obespechenie slaysinga v 3D-pechati [Slicing software in 3D printing], Tr. Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo kongressa «Intellectual'nye sistemy i informatsionnye tekhnologii – 2020» («IS i IT-2020», «IS&IT'20») [Proceedings of the International Scientific and Technical Congress "Intelligent systems and Information Technologies – 2020" ("IS and IT-2020", "IS&IT'20")]. Scientific publication in 2 vols. Vol. 1, pp. 331-347.

10. Ueyli B., Kheyn T., Snayder G., Nemet E. Unix i Linux: rukovodstvo sistemnogo administratora [Unix and Linux: System Administrator's Guide]. 4th ed. Izd-vo: Dialektika-Vil'yams, 2018, 1314 p.
11. Ber Bibo, Ieguda Kats. jQuery. Podrobnoe rukovodstvo po prodvinutomu JavaScript [A comprehensive guide to advanced JavaScript]. 2nd ed. Izd-vo «Simvol-Plyus», 2023, 612 p.
12. Jos Dirksen. Learn Three.js. 4 ed. Packt Publishing Ltd, 2023, 554 p.
13. Lukas D.K. Testirovanie JavaScript [JavaScript testing]. Izd-vo «Manning», 2023, 592 p.
14. Krivaya Bez'e [Bezier curve]. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Krivaya_Bez'e (accessed 20 June 2022).
15. Kedlek T. Adaptivnyy dizayn. Delaem sayty dlya lyublykh ustroystv [Adaptive design. We make websites for any device]. Saint Petersburg: Izd-vo «Pi-ter», 2013, 289 p.
16. Sizova O.V. Sistemy podderzhki prinyatiya resheniy: ucheb. posobie [Decision support systems: textbook]. Izd-vo: IGKhTU – Ivanovo, 2017, 61 p.
17. Gladkov L.A., Kazharov A.A. Gibrinny nechetko-geneticheskiy algoritm dlya resheniya zadachi kommvoyazhera [Hybrid fuzzy-genetic algorithm for solving the traveling salesman problem] Tr. IV-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Integrirovannyye modeli i myagkie vychisleniya v iskusstvennom intellekte" [Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference "Integrated Models and Soft Computing in Artificial Intelligence"]. Kolomna, 2009.
18. Render (Rendering) – chto eto takoe, kak rabotaet i zachem nuzhen v 3D, video i igrakh [Rendering (Rendering) - what it is, how it works and why it is needed in 3D, video and games]. Available at: <https://dzen.ru/a/YMmwcJgx3UYavMSP> (accessed 10 July 2023).
19. Kureychik V.M., Kazharov A.A. Roevoy intellekt v reshenii grafovyykh zadach [Swarm intelligence in solving graph problems], Mezhdunar. konf. po myagkim vychisleniyam i izmereniyam (SCM'2013): Sb. trudov [International Conference on Soft Computing and Measurement (SCM'2013): Proceedings]. Saint Petersburg, 2013, pp. 31-34.
20. ODuo Batteries: pervyy sayt kastomnykh batarey [ODuo Batteries: the first custom battery site]. Available at: <https://dzen.ru/media/id/632630e9302fdb6e65085791/oduo-batteries-pervyi-sait-kastomnykh-akb-632634dc47b76016e2b5e850> (accessed 12 August 2023).

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.П. Малюков.

Кажаров Аскер Артурович – Южный федеральный университет; e-mail: aakazharov@sfedu.ru; с. Александрова Коса, Россия; тел.: +79064233689; кафедра САПР; к.т.н.; старший преподаватель.

Kazharov Asker Arturovich – Southern Federal University; e-mail: aakazharov@sfedu.ru; Alexandrova Kosa, Russia; phone: +79064233689; the department of CAD; cand. of eng. sc.; senior lecturer.

УДК 621.315.592

DOI 10.18522/2311-3103-2023-4-200-210

Б.М. Середин, В.П. Попов, А.В. Малибашев, А.А. Скиданов, М.Б. Зиненко

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА В НАГРЕВАТЕЛЬНОМ УСТРОЙСТВЕ ДЛЯ ТЕРМОМИГРАЦИИ ЖИДКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В КРЕМНИИ

Жидкие включения мигрируют в твёрдых телах в направлении градиента температуры. Это даёт уникальную возможность формировать в пластинах кремния кристаллически совершенные структуры со сквозными легированными эпитаксиальными каналами или замкнутыми ячейками, представляющими интерес при конструировании силовых полупроводниковых приборов и фотоэлектрических преобразователей. Причем конкурентных методов изготовления таких структур нет, поскольку скорость термомиграции на четыре порядка превышает скорость твердотельной диффузии. Однако практическое применение метода термомиграции (ТМ) в полупроводниковой электронике сдерживается пере-

иённой проблемой создания необходимого однородного поля градиента температуры в пластине кремния. Нарушение однородности градиента температуры приводит к отклонению траекторий движения дискретных жидких включений от нормали, искажает заданную топологию включений на стартовой поверхности пластины и делает невозможным применение групповой технологии для последующих операций изготовления приборов. В настоящей работе выполнено компьютерное моделирование процессов теплообмена в нагревательном устройстве с целью достижения в пластине кремния однородного поля градиента температуры, создаваемого плоским резистивным нагревательным элементом в виде спирали. Выявлены причины возникновения периодических и монотонных радиальных неоднородностей поля градиента температуры, искажающих траектории движения жидких включений и форму получаемых каналов. Предложены способы уменьшения и устранения этих искажений. Основными элементами управления конфигурацией поля градиента температуры в пластине кремния оказались кассета, удерживающая пластину на определённом расстоянии от нагревательного элемента и фронтальные экраны с отверстиями, соосными пластине кремния. Определены и экспериментально подтверждены размеры, взаимное расположение элементов нагревательного устройства, обеспечивающего требуемую однородность поля градиента температуры для промышленного применения термомиграции системы линейных включений (зон) на пластинах кремния диаметром 100 мм.

Термомиграция; нагревательное устройство; компьютерное моделирование; градиент температуры.

B.M. Seredin, V.P. Popov, A.V. Malibashev, A.A. Skidanov, M.B. Zinenko

INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER PROCESSES IN A HEATING DEVICE FOR THERMAL MIGRATION OF LIQUID INCLUSIONS IN SILICON

Liquid inclusions migrate in solids in the direction of the temperature gradient. This gives a unique opportunity to form crystal perfect structures in silicon wafers with through-doped epitaxial channels or closed cells, which are of interest in the design of power semiconductor devices and photovoltaic converters. Moreover, there are no competitive methods of manufacturing such structures, since the rate of thermal migration is four orders of magnitude higher than the rate of solid-state diffusion. However the practical application of the thermomigration (TM) method in semiconductor electronics is hindered by the unsolved problem of creating the necessary homogeneous temperature gradient field in a silicon wafer. Violation of the uniformity of the temperature gradient leads to a deviation of the trajectories of discrete liquid inclusions from the normal and distorts the specified topology of inclusions on the starting surface of the plate and makes it impossible to use group technology to obtain subsequent manufacturing operations of semiconductor devices. In this paper, a computer simulation of heat transfer processes in a heating device is performed in order to achieve a homogeneous temperature gradient field in a silicon wafer created by a flat resistive heating element in the form of a spiral. The causes of periodic and monotonous radial inhomogeneities of the temperature gradient field that distort the trajectories of liquid inclusions and the shape of the resulting channels are revealed. Ways to reduce and eliminate these distortions are proposed. The main controls for the configuration of the temperature gradient field in the silicon wafer turned out to be a cassette holding the wafer at a certain distance from the heating element and front screens with holes coaxial to the silicon wafer. The dimensions and mutual arrangement of the elements of a heating device providing the required uniformity of the temperature gradient field for industrial applications of thermal migration of a system of linear inclusions of zones on silicon wafers with a diameter of 100 mm have been determined and experimentally confirmed.

Thermomigration; heating device; computer modeling; temperature gradient.

Введение. Термомиграция (ТМ) металлических жидких включений в полупроводниках известна давно [1]. Основные закономерности и принципиальные возможности метода ТМ изучены достаточно полно [2–7]. Для таких исследований высокая однородность поля температурного градиента не обязательна. В работах,

посвящённых исследованиям метода ТМ, градиент температуры создавали в пластине кремния с помощью плоского нагревательного элемента, расположенного параллельно пластине, в виде спирали из тугоплавкой проволоки [2] или графита [8–13]. Известны попытки применения для ТМ нагревателей на основе системы галогеновых ламп [3–5] или вспомогательной пластины, нагреваемой электронным лучом [6]. В некоторых нагревательных устройствах для выравнивания температурного поля пластину кремния вращали в процессе ТМ [14, 15]. Достигнутая однородность градиента температуры в указанных работах была недостаточной для эффективного промышленного применения метода ТМ, особенно на стандартных пластинах больших диаметров [16–18].

В настоящей работе изучена возможность создания однородного поля градиента температуры при помощи плоского резистивного нагревателя в виде параллельных полос. Для этого выполнено компьютерное моделирование и прецизионные эксперименты по контролю конфигурации температурного поля в пластинах кремния диаметром 100 мм.

Постановка задачи. Исследуемое нагревательное устройство состоит из корпуса, плоского нагревательного элемента, кассет для удержания пластин, системы фронтальных экранов и предназначено для одновременного проведения процесса ТМ на двух одинаковых пластинах кремния (рис. 1).

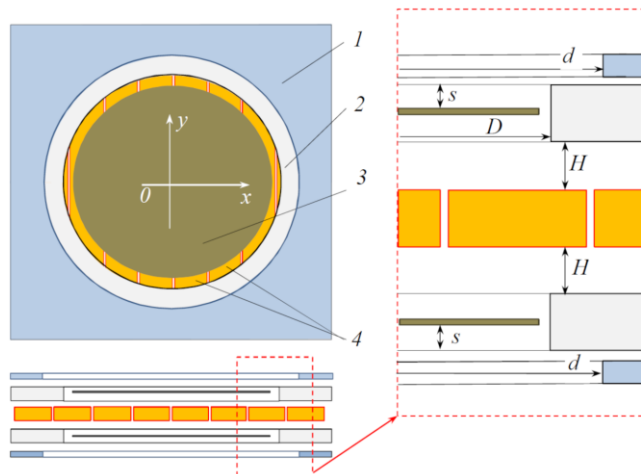


Рис. 1. Схематическое изображение нагревательного устройства для ТМ и его поперечного сечения: 1 – фронтальный экран; 2 – кассета; 3 – пластина кремния; 4 – полосы нагревательного элемента

Детали нагревательного устройства выполнены в основном из графита марки МПГ. В качестве изоляторов использовали алундовую керамику. Нагревательное устройство устанавливали в вакуумной водоохлаждаемой камере и оно обеспечивало на пластинах кремния температуру в интервале 1170–1570 К и градиент температуры 20–100 К/см. Потребляемая мощность не превышала 10 кВт.

В конструкции нагревательного устройства заложена возможность изменения взаимного расположения составных частей, что позволяет управлять тепловыми потоками и однородностью поля градиента температуры. Регулируемыми параметрами выступают: расстояние H от кассеты до нагревательного элемента (диапазон изменения 2–10 мм); диаметр отверстия D в кассете для удержания пластины (102–104 мм); заглубление s пластины внутри кассеты (0–4,5 мм) и диаметр отверстия d во фронтальном экране (102–140 мм) (см. рис. 1).

Для анализа теплообменных процессов, определяющих температурное поле в пластине, было проведено компьютерное моделирование в универсальной программной системе анализа методом конечных элементов Ansys, с применением модуля комплексного термоэлектрического анализа (Thermal-Electric) [19]. В этом модуле реализована математическая модель физических процессов, а также численные методы, позволяющие рассчитать распределение температуры на элементах нагревательного устройства с учётом процессов теплопроводности в твёрдых телах и теплового излучения между ними и окружающей средой. Работа с модулем, а также взаимодействие между его элементами осуществлялось с помощью оболочки ANSYS Workbench. Была построена трехмерная модель рассматриваемого нагревательного устройства. В базу данных материалов добавлены графит, сапфир и кремний, внесены их физические свойства, используемые при расчетах, зависимости от температуры удельных теплоемкости, теплопроводности, электропроводности [20]. В разделе Steady State Thermal-Electric Conduction задавались параметры условий теплового обмена между нагревательным элементом, кассетой и пластиной; боковой поверхностью пластины и кассеты; поверхностью кассеты и фронтального экрана; боковой поверхности фронтального экрана и пластины, а также условия лучистого обмена со стенками водоохлаждаемой вакуумной камеры. Учитывалось различие оптических свойств материалов конструкции. Подаваемое на нагревательный элемент постоянное напряжение и токовая нагрузка резистивного нагревательного элемента определялись, исходя из температуры, формируемой им в центре пластины ~ 1375 K.

Результаты моделирования. Компьютерное моделирование показало, что в стационарном режиме пластина кремния нагрета неравномерно, на ней проявляются периодические неоднородности, связанные со структурой нагревательного элемента, а также монотонные неоднородности, вызванные тепловым излучением с боковой поверхности пластины и приводящие к охлаждению её внешней части.

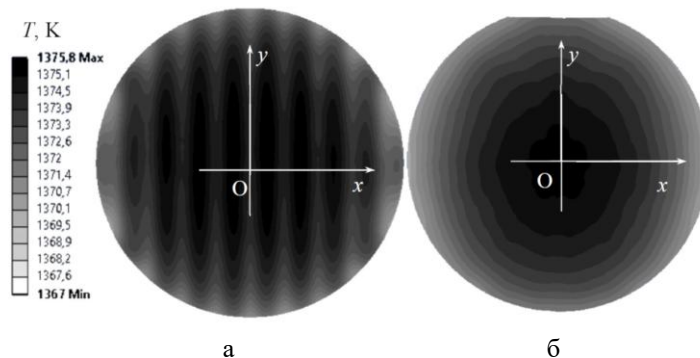


Рис. 2. Карты распределения температуры на стартовой поверхности пластины: а – периодические неоднородности температуры ($H = 2$ мм, $s = 4,5$ мм, $D = 102$ мм); б – охлаждение периферийной части пластины ($H = 6$ мм, $s = 0$ мм, $D = 102$ мм)

На рис. 2 приведены карты распределения температуры на стартовой поверхности пластины в стационарных условиях работы нагревательного устройства, иллюстрирующие неоднородности температурного поля. При близком расположении пластины и нагревательного элемента нагрев пластины вдоль оси Ox периодически неравномерный, величина нормального градиента температуры G_n отличается от среднего значения максимум на 3 K/см ($\sim 5\% G_n$). Увеличение расстояния

от пластины до нагревателя устраняет эту неоднородность, но приводит к увеличению разности температур между центральной и периферийной областями пластины до 25 К и тангенциальному градиенту температуры G_τ до ~ 30 К/см ($\sim 50\% G_n$). Критерием однородности поля градиента температуры следует считать значение тангенциальной составляющей градиента: в идеале эта составляющая должна отсутствовать.

Кассеты, в которых закреплены обрабатываемые пластины, являются основными элементами нагревательного устройства, влияющими на распределение температуры в пластине. Изменение расстояния от кассеты до нагревателя, а также заглубление пластины внутри отверстия кассеты оказывают наибольшее влияние на поле градиента температуры. При наименьшем расстоянии между кассетой и нагревательным элементом ($H = 2$ мм, $s = 4,5$ мм) возникают наибольшие периодические неоднородности градиента температуры, неустранимые теплопроводностью пластины (рис. 3.а). Моделирование показало, что при увеличении расстояния H до 6 мм неоднородности поля градиента температуры, связанные с проявлением периодической структуры нагревательного элемента, уменьшаются до $G_\tau \sim 0,5$ К/см. Однако при этом остается существенной разность температур между центральной и периферийной частями пластины. Управление перегревом или охлаждением периферии пластины возможно путём изменения величины её заглубления в кассете при фиксированном расстоянии между кассетой и нагревательным элементом (рис. 3,б). При заглублении пластины на величину 2,5 мм в кассете толщиной 5 мм краевые эффекты нивелируются (кривая 2 рис. 3,б).

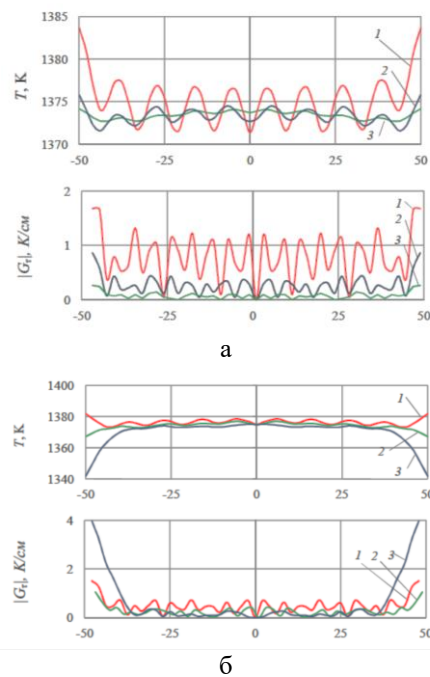


Рис. 3. Зависимости распределения температуры T и тангенциальной составляющей градиента температуры $|G_\tau|$ вдоль оси Ox при различных значениях параметров: а – $s = 4,5$ мм $H = 2, 4, 6$ мм – кривые 1, 2, 3; б – $H = 6$ мм; $s = 4,5, 2,5, 0$ мм – кривые 1, 2, 3

Обнаруженное влияние кассеты на радиальные искажения температурного поля в пластине физически объясняется особенностями лучистого теплообмена между торцом пластины и стенками отверстия в кассете. Различие коэффициентов поглощения графита и кремния (0,9 и 0,65) приводит к более высокой температуре (на 30–50 K) поверхности кассеты относительно температуры поверхности кремния при одинаковых условиях нагрева. Градиент температуры в графите примерно в три раза ниже, чем в кремнии (из-за различия теплопроводностей этих материалов), а толщина кассеты в 10 раз больше толщины пластины кремния. Поэтому существует оптимальное значение заглубления пластины, соответствующее установлению теплового баланса между торцом пластины и стенкой отверстия в кассете, необходимого для предотвращения утечек тепла с периферии пластины и устранения радиальных неоднородностей температуры.

Недостатком регулирования температурного поля в пластине кремния варьированием заглубления является резкая зависимость конфигурации температурного поля от величины заглубления (особенно в точке теплового баланса), а также техническая сложность изменения этого параметра в нагревательном устройстве.

Кроме кассеты для устранения радиальных неоднородностей градиента температуры предложено использовать фронтальные экраны с отверстиями, размер которых превышает размер пластины кремния (см. рис. 1). Такие экраны не ограничивают тепловой поток через пластину кремния и, следовательно, не уменьшают нормальный градиент температуры и скорость ТМ. В то же время такие экраны уменьшают тепловой поток вокруг пластины кремния, подогревают кассету и нагревательный элемент за пределами пластины, что должно уменьшать тангенциальную составляющую градиента температуры. Компьютерное моделирование подтвердило эту идею. Видно, что наличие фронтального экрана с отверстием уменьшает охлаждение периферии пластины (рис. 4). Причём этот эффект тем сильнее, чем ближе диаметр отверстия экрана к диаметру пластины кремния. Один экран уменьшил тангенциальную составляющую на краю пластины с 17 K/см до 3,5 K/см. В общем, использование фронтальных экранов с подбираемыми отверстиями позволяет плавно и в широких пределах регулировать радиальные неоднородности температуры и производить точную настройку необходимой конфигурации поля градиента температуры.

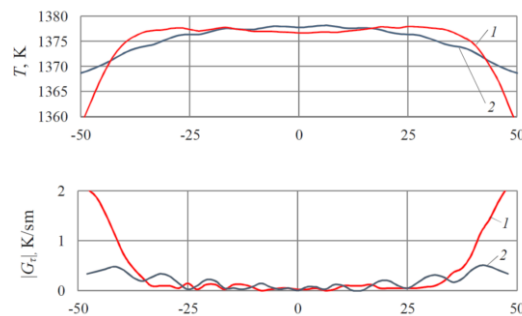


Рис. 4. Влияние фронтального экрана с отверстием на распределение температуры T и тангенциальной составляющей градиента температуры $|G_t|$ вдоль оси Ox . Кривая 1 – без экрана ($s = 0$ мм; $H = 6$ мм); кривая 2 – с экраном ($s = 0$ мм; $H = 6$ мм; $d = 104$ мм)

Компьютерным моделированием оценили также влияние на температурное поле в пластине кремния выравнивающей температуру (буферной) пластины, расположенной между нагревательным элементом и пластиной кремния. Буферные

пластины толщиной 1 мм из графита, кремния и сапфира дали примерно одинаковые результаты: они полностью устранили периодические, но увеличили монотонные радиальные неоднородности поля градиента температуры. Использование буферных пластин требовало увеличения температуры нагревательного элемента на 150–220 К для установления той же температуры на пластине кремния, что снижало в целом ресурс нагревательного устройства. Поэтому применение буферных пластин для повышения однородности нагрева нецелесообразно.

На завершающем этапе компьютерного моделирования изучили возможность уменьшения периодических неоднородностей температуры путем заполнения пропилов между полосами нагревательного элемента диэлектрическими вставками из алунда или сапфира. Действительно, нагревательный элемент с такими вставками давал более равномерное (сплошное) излучение и периодические неоднородности градиента температуры в пластине не проявлялись. На радиальные неоднородности диэлектрические вставки, как и ожидалось, не повлияли.

Экспериментальные результаты. Контроль конфигурации температурного поля в пластине кремния проводили по изучению траекторий ТМ системы точечных или линейных зон на основе алюминия по методике [21]. Для этого на кремниевую пластину с кристаллографической ориентацией (100) наносили магнетронным осаждением слой алюминия толщиной 10 мкм. Затем с помощью фотолитографии получали систему дискретных зон, равномерно расположенных по всей пластине. Диаметр точечных зон на старте составлял 200 мкм, ширина линейных зон – 100 мкм. Расстояние между зонами выбирали от 0,2 до 5 мм. Линейные зоны образовывали ортогональную сетку или представляли систему несвязанных между собой квадратов. Линейные зоны ориентировали всегда по кристаллографическим направлениям $\langle 110 \rangle$ и по осям относительно нагревательного элемента (см. рис. 1) Ox , Oy или под углом 45° к ним. Температурно-временной режим ТМ задавали высокоточным регулятором Термодат-16Е.

Металлографический анализ траекторий движения зон, как в объёме пластины, так и на её финишной поверхности, позволял судить об искажениях поля температурного градиента. Особенно чувствительными к тангенциальным составляющим градиента температуры оказались траектории движения зон вдоль поверхности. Расстояние, пройденное зонами по поверхности пластины при достаточно большой выдержке после выхода зон, позволило оценить значение тангенциальной составляющей G_τ с точностью до 0,1 К/см.

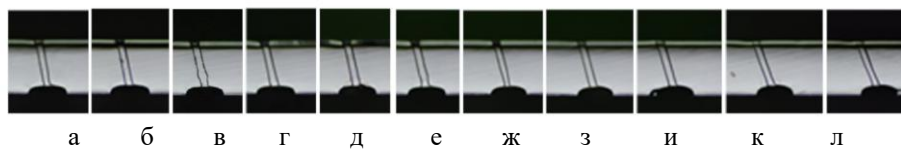


Рис. 5. Поперечные сечения эпитаксиальных каналов на различных расстояниях от центра пластины (мм): 18 (а), 20 (б), 22 (в), 24 (г), 26 (д), 28 (е), 30 (ж), 32 (з), 34 (и), 36 (к), 38 (л). Угол отклонения каналов от нормали монотонно изменяется от 8 до 20 градусов. Зоны двигались снизу-вверх. Толщина пластины кремния 500 мкм. ($H = 6$ мм; $s = 1$ мм) Фронтальный экран отсутствует

Экспериментально установлены как монотонные радиальные отклонения траекторий движения линейных зон от нормали, направленные к центру или периферии пластины, так и периодические разнонаправленные отклонения траекторий линейных зон, расположенных вдоль оси Oy . Для примера на рисунке 5 показан поперечный шлиф пластины кремния с выявленными каналами, полученными

при ТМ системы параллельных линейных зон через пластину кремния. Видно, что траектории движения зон отклоняются от нормали к центру пластины, причем отклонение тем больше, чем дальше от центра располагается линейная зона. Такая картина типична также при нагреве пластины плоским нагревателем без использования специальной кассеты и фронтальных экранов с отверстием. При проведении экспериментов обнаружили ещё одну возможность применения фронтальных экранов для устранения аппаратных искажений температурного поля, связанных с наличием тоководов или крепёжных элементов. Так, тоководы, выведенные на один торец корпуса нагревательного устройства, понижали температуру пластины кремния вблизи этой области. Использование фронтального экрана с асимметричным отверстием грушевидной формы (подбираемой эмпирически) позволило устранить эту неоднородность нагрева, благодаря тому, что большая площадь отверстия экрана вокруг пластины кремния располагалась с противоположной стороны от тоководов.

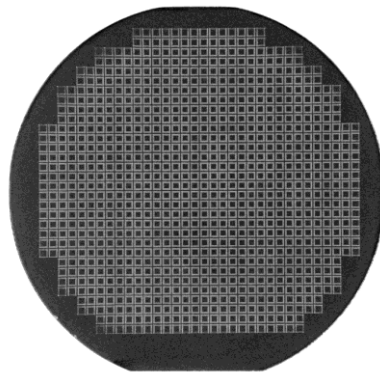


Рис. 6. Финишная поверхность пластины кремния с дискретными квадратными зонами

Все описанные выводы, сделанные на основе компьютерного моделирования, нашли экспериментальное подтверждение в особенностях траекторий движения дискретных зон при ТМ. Достигнутая однородность поля градиента температуры позволила воспроизводимо получать структуры для силовых полупроводниковых приборов на токи до 100 А. На рис. 6 представлена фотография финишной поверхности пластины кремния с полученными сквозными замкнутыми ячейками в форме квадратов. Видно, что размеры, форма ячеек и расстояние между ними одинаковы, что возможно только при достаточно высокой однородности поля градиента температуры в пластине кремния при ТМ.

Заключение. Компьютерным моделированием процессов теплообмена в нагревательном устройстве и экспериментально по траекториям движения дискретных зон изучено температурное поле в пластине кремния при ТМ. Выявлены периодические и монотонные радиальные неоднородности распределения температуры в плоскости пластины кремния. Объяснены вызывающие их причины и найдены условия устранения этих неоднородностей. Установлено влияние на однородность поля градиента температуры кассеты, фронтальных экранов с отверстиями, выравнивающей пластины, диэлектрических вставок в прорези нагревательного элемента. Наибольший эффект на конфигурацию температурного поля в пластине кремния оказывают удерживающая пластину относительно толстая кассета и фронтальные экраны со специальными отверстиями. Основным критерием однородности градиента температуры является величина его тангенциальной состав-

ляющей. При определенных геометрических соотношениях между элементами нагревательного устройства достигнуто значение тангенциальной составляющей градиента температуры $\sim 0,5$ К/см, что обеспечивает синхронное движение системы дискретных зон нормально поверхности пластины кремния.

Финансирование работы. Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания Южно-Российскому государственному политехническому университету (НПИ) имени М.И. Платова по теме FENN-2023-0005.

Конфликт интересов. Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Pfann W.G. Zone Melting. – 2nd ed. – New York, 1966. – 310 p.
2. Лозовский В.Н., Лукин Л.С., Попов В.П. Зонная перекристаллизация градиентом температуры полупроводниковых материалов. – М.: Металлургия, 1987. – 232 с.
3. Anthony T.R., Boah J.K., Chang M.F., Cline H.E. Thermomigration processing of isolation grids in power structures // IEEE Transactions on Electron Devices. – 1976. – Vol. 23, No 8. – P. 818-823.
4. Chang M., Kennedy R. The Application of Temperature Gradient Zone Melting to Silicon Wafer Processing // Journal Electrochem Soc. – 1981. – Vol. 128, No. 10. – P. 2193-2198.
5. Cline H.E. and Anthony T.R. High speed droplet migration silicon // Journal of Applied Physics. – 1976. – Vol. 47, No. 10. – P. 2325-2331.
6. Cline H.E. and Anthony T.R. Thermomigration of aluminium-rich liquid wires through silicon // Journal Appl. Phys. – 1976. – Vol. 47, No. 6. – P. 2332-2336.
7. Cline H.E. and Anthony T.R. On the thermomigration of liquid wires // Journal of Applied Physics. – 1978. – Vol. 47, No. 5. – P. 2777-2786.
8. Полухин А.С., Зуева Т.К., Солодовник А.И. Использование термомиграции в технологии структур силовых полупроводниковых приборов // Силовая электроника. – 2006. – Т. 3 (9). – С. 110-112.
9. Полухин А.С. Термомиграция неориентированных линейных зон в кремниевых пластинах (100) для производства чипов силовых полупроводниковых приборов // Компоненты и технологии. – 2008. – Т. 11. – С. 97-100.
10. Полухин А.С. Анализ технологических факторов процесса термомиграции // Силовая электроника. – 2013. – Т. 5 (9). – С. 118-120.
11. Лозовский В.Н., Середин Б.М., Полухин А.С., Солодовник А.И. Оборудование для получения кремниевых структур методом термомиграции // Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые приборы. – 2015. – № 5 (239). – С. 65-76.
12. Полухин О.С. Використання термоміграції в технології силових напівпровідникових приладів // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2018. – № 3. – С. 16-24.
13. Polukhin O.S., Kravchina V.V. Thermomigration of non-oriented aluminium-rich liquid zones through (110) silicon wafers // Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature. – 2021. – No. 5-6. – P. 33-40.
14. Pat. 4087239 United States, Int. C1.2 F27B 9/14. Apparatus for imparting combined centrosymmetric and noncentro-symmetric rotation to semiconductor bodies / Cline H.E., Anthony T.R. No.: 733239. – May 2, 1978.
15. Pat. 4523067 United States, Int. C1.3 H05B 6/10. Temperature gradient zone melting apparatus / Roger H. Brown, Kuen Chow, Norman W. Goodwin, Jan Grinberg. No.: 366901. – June 11, 1985.
16. Morillon B. Etude de la thermomigration de l'aluminium dans le silicium pour la réalisation industrielle de murs d'isolation dans les composants de puissance bidirectionnels // Micro et nanotechnologies/Microélectronique. INSA de Toulouse, 2002. Français.
17. Bin Lu. Realisation De Peripheries Innovantes De TRIAC Par Thermomigration D'aluminium Et Insertion De Silicium Poreux. Univerite Froacois – Rabelais De Tours, 2017
18. Lomov A.A., Seredin B.M., Gavrus I.V., Martyushov S.Yu. Aluminum doped thermomigrated silicon channels for high voltage solar cell: Structure and electrical properties // Proc. SPIE 12157, International Conference on Micro- and Nano-Electronics. – 2021. – P. 1215703.
19. Ansys: официальный сайт. – URL: <https://www.ansys.com>.

20. Шелудяк Ю.Е., Кашипов Л.Я., Малинин Л.А., Цалков В.Н. Теплофизические свойства компонентов горючих систем: Справочник / под ред. Н.А. Силина; НПО "Информ ТЭИ". – М., 1992. – 92 с.
21. Вигдорovich В.Н., Гершанов В.Ю., Константинова Г.С., Лозовский В.Н., Попов В.П. Зонная плавка с градиентом температуры как метод физических исследований // Заводская лаборатория. – 1970. – № 11. – С. 1350-1364.

REFERENCES

1. Pfann W.G. Zone Melting. 2n ed. New York, 1966, 310 p.
2. Lozovskiy V.N., Lunin L.S., Popov V.P. Zonnaya perekristallizatsiya gradientom temperatury poluprovodnikovyykh materialov [Zone recrystallization by temperature gradient of semiconductor materials]. Moscow: Metallurgiya, 1987, 232 p.
3. Anthony T.R., Boah J.K., Chang M.F., Cline H.E. Thermomigration processing of isolation grids in power structures, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1976, Vol. 23, No. 8, pp. 818-823.
4. Chang M., Kennedy R. The Application of Temperature Gradient Zone Melting to Silicon Wafer Processing, *Journal Electrochem Soc.*, 1981, Vol. 128, No. 10, pp. 2193-2198.
5. Cline H.E. and Anthony T.R. High speed droplet migration silicon, *Journal of Applied Physics*, 1976, Vol. 47, No. 10, pp. 2325-2331.
6. Cline H.E. and Anthony T.R. Thermomigration of aluminium-rich liquid wires through silicon, *Journal Appl. Phys.*, 1976, Vol. 47, No. 6, pp. 2332-2336.
7. Cline H.E. and Anthony T.R. On the thermomigration of liquid wires, *Journal of Applied Physics*, 1978, Vol. 49, No. 5, pp. 2777-2786.
8. Polukhin A.S., Zueva T.K., Solodovnik A.I. Ispol'zovanie termomigratsii v tekhnologii struktur silovyykh poluprovodnikovyykh priborov [The use of thermal migration in the technology of structures of power semiconductor devices], *Silovaya elektronika* [Power Electronics], 2006, Vol. 3 (9), pp. 110-112.
9. Polukhin A.S. Termomigratsiya neorientirovannykh lineynykh zon v kremnievykh platinakh (100) dlya proizvodstva chipov silovyykh poluprovodnikovyykh priborov [Thermomigration of unoriented linear zones in silicon wafers (100) for the production of power semiconductor device chips], *Komponenty i tekhnologii* [Components and Technologies], 2008, Vol. 11, pp. 97-100.
10. Polukhin A.S. Analiz tekhnologicheskikh faktorov protsessa termomigratsii [Analysis of technological factors of the thermomigration process], *Silovaya elektronika* [Power Electronics], 2013, Vol. 5 (9), pp. 118-120.
11. Lozovskiy V.N., Seregin B.M., Polukhin A.S., Solodovnik A.I. Oborudovanie dlya polucheniya kremnievykh struktur metodom termomigratsii [Equipment for producing silicon structures by thermomigration], *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2: Poluprovodnikovyye pribory* [Electronic technology. Series 2: Semiconductor devices], 2015, No. 5 (239), pp. 65-76.
12. Polukhin O.S. Vikoristannya termomigratsii v tekhnologii silovikh napivprovodnikovikh priladiv [Vicious thermomigration in the technology of power conductor devices], *Radioelektronika, informatika, upravlinnya* [Radioelectronics, informatics, control], 2018, No. 3, pp. 16-24.
13. Polukhin O.S., Kravchina V.V. Thermomigration of non-oriented aluminium-rich liquid zones through (110) silicon wafers, *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnai Apparature*, 2021, No. 5-6, pp. 33-40.
14. Cline H.E., Anthony T.R. Patent 4087239 United States, Int. C1.2 F27B 9/14. Apparatus for imparting combined centrosymmetric and noncentro-symmetric rotation to semiconductor bodies. No.: 733239. May 2, 1978.
15. Roger H. Brown, Kuen Chow, Norman W. Goodwin, Jan Grinberg. Patent 4523067 United States, Int. C1.3 H05B 6/10. Temperature gradient zone melting apparatus. No.: 366901. June 11, 1985.
16. Morillon B. Etude de la thermomigration de l'aluminium dans le silicium pour la réalisation industrielle de murs d'isolation dans les composants de puissance bidirectionnels, *Micro et nanotech nologies/Microélectronique. INSA de Toulouse, 2002. Français.*
17. Bin Lu. Realisation De Peripheries Innovantes De TRIAC Par Thermomigration D'aluminium Et Insertion De Silicium Poreux. Univerite Froacois Rabelais De Tours, 2017

18. Lomov A.A., Seredin B.M., Gavrus I.V., Martyushov S.Yu. Aluminum doped thermomigrated silicon channels for high voltage solar cell: Structure and electrical properties, *Proc. SPIE 12157, International Conference on Micro- and Nano-Electronics*, 2021, pp 1215703.
19. Ansys. Available at: <https://www.ansys.com>.
20. Sheludyak Yu.E., Kashporov L.Ya., Malinin L.A., TSalkov V.N. Teplofizicheskie svoystva komponentov goryuchikh sistem: Spravochnik [Thermophysical properties of components of combustible systems: Handbook], ed. by N.A. Silina; NPO "Inform TEI". Moscow, 1992, 92 p.
21. Vigdorovich V.N., Gershanov V.Yu., Konstantinova G.S., Lozovskiy V.N., Popov V.P. Zonnaya plavka s gradientom temperatury kak metod fizicheskikh issledovaniy [Zone melting with a temperature gradient as a method of physical research], *Zavodskaya laboratoriya* [Factory Laboratory], 1970, No. 11, pp. 1350-1364.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Курейчик.

Середин Борис Михайлович – Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова; e-mail: seredinboris@gmail.com; г. Новочеркасск, Россия; кафедра физики и фотоники; д. т. н.; заведующий.

Попов Виктор Павлович – e-mail: porovnpri@gmail.com; кафедра физики и фотоники; д.т.н.; профессор.

Малибашев Александр Владимирович – e-mail: a_malib@mail.ru; кафедра физики и фотоники; к.т.н.; доцент.

Зиненко Марина Борисовна – e-mail: p1648@yandex.ru; кафедра физики и фотоники; аспирант.

Скиданов Алексей Александрович – Акционерное общество «ВЗПП-Микрон»; e-mail: askidanov@vsp-mikron.com; г. Воронеж, Россия; главный конструктор.

Seredin Boris Mikhailovich – South Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov; e-mail: seredinboris@gmail.com; Novocherkassk, Russia; the department of physics and photonics; dr. of eng. sc.; head of the department.

Popov Viktor Pavlovich – e-mail popovnpri@gmail.com; the department of physics and photonics; dr. of eng. sc.; professor.

Malibashev Alexander Vladimirovich – e-mail: a_malib@mail.ru; the department of physics and photonics; cand. sc.; associate professor.

Zinenko Marina Borisovna – e-mail: p1648@yandex.ru; the department of physics and photonics; Novocherkassk, Russia; postgraduate student.

Skidanov Alexey Alexandrovich – VSP-Micron Joint Stock Company; e-mail: askidanov@vsp-mikron.com; Voronezh, Russia; chief designer.

УДК 612.769

DOI 10.18522/2311-3103-2023-4-210-220

А.В. Леонова, С.А. Синюгин, О.Ю. Шпаковская, З.А. Кокков

РАЗРАБОТКА АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ ГОТОВНОСТИ ВСАДНИКА И ЛОШАДИ К ИППОТЕРАПИИ

Иппотерапия является уникальным методом для восстановления и активного психофизического и психомоторного развития. Однако эффективность метода иппотерапии не доказана научно. Вследствие отсутствия объективных доказательств эффективности иппотерапии, данный метод вызывает сомнения у врачей; родителей детей с ограниченными возможностями здоровья (ОВЗ) из-за риска негативного влияния данного метода на организм человека, связанного с возможной травмой физического и психологического ха-

рактера. Поэтому во время занятия иппотерапией важно вести непрерывную оценку функциональной готовности всадника и лошади участвовать в занятии иппотерапии, фиксируя скрытые психофизиологические (ПФ) реакции. Для того, чтобы сеанс иппотерапии имел лечебный эффект с точки зрения биомеханического фактора, важно чтобы всадник и лошадь двигались синхронно. В качестве инструмента для объективной оценки показателей функционального состояния всадника и лошади, и для оценки взаимовлияния локомоций всадника и лошади во время занятия иппотерапией было принято решение разработать аппаратно-программный комплекс (АПК). Данное устройство позволит специалистам по иппотерапии оценивать индивидуальные особенности всадника и подобрать оптимальный уровень нагрузки в соответствии с психофизиологическим состоянием. С помощью аппаратно-программного комплекса тренер по иппотерапии сможет отслеживать сохранение правильного положения всадника на протяжении всего занятия, оценивать синхронность изменения кинетических параметров лошади и всадника во время движения. Аппаратно-программный комплекс позволит провести ряд исследований, направленных на оценку эффективности метода иппотерапии для людей с ограниченными возможностями здоровья и собрать научно-доказательную базу для подтверждения эффективности работы метода иппотерапии.

Аппаратно-программный комплекс; функциональное состояние; психофизиология; иппотерапия; верховая езда; инерциальный датчик; биомеханика; комплементарный фильтр; гироскоп; акселерометр; ограниченные возможности здоровья (ОВЗ); реабилитация; ошибки посадки всадника; вариабельность сердечного ритма (BCP); термография; фотоплетизмограмма.

A.V. Leonova, S.A. Sinyutin, O.Yu. Shpakovskaya, Z.A. Kokov

DEVELOPMENT OF A HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEX FOR FUNCTIONAL DIAGNOSTICS OF RIDER AND HORSE READINESS FOR HIPPOThERAPY

Hippotherapy is a unique method for restoration and active psychophysical and psychomotor development. However, the effectiveness of hippotherapy has not been scientifically proven. Due to the lack of objective evidence of the effectiveness of hippotherapy, this method raises doubts among doctors and parents of children with disabilities due to the risk of the negative impact of this method on the human body, associated with possible physical and psychological trauma. Therefore, during hippotherapy, it is important to continuously assess the functional readiness of the rider and horse to participate in hippotherapy, recording hidden psychophysiological (PF) reactions. In order for a hippotherapy session to have a therapeutic effect from a biomechanical point of view, it is important that the rider and horse move synchronously. As a tool for objective assessment of the functional state of the rider and horse, and for assessing the mutual influence of the horse rider's locomotion during hippotherapy, it was decided to develop a hardware-software complex (HPC). This device will allow hippotherapy specialists to assess the individual characteristics of the rider and select the optimal load level in accordance with the psychophysiological state. Using the hardware and software complex, the hippotherapy trainer will be able to monitor the maintenance of the correct position of the rider throughout the entire lesson, assess the synchronicity of changes in the kinetic parameters of the horse and rider during movement. The hardware and software complex will allow us to conduct a number of studies aimed at assessing the effectiveness of the hippotherapy method for people with disabilities and collect a scientific evidence base to confirm the effectiveness of the hippotherapy method.

Hardware-software complex; functional state; psychophysiology; hippotherapy; horse riding; inertial sensor; biomechanics; complementary filter; gyroscope; accelerometer; disabilities; rehabilitation; rider seating errors; heart rate variability (HRV); thermography; photoplethysmogram.

Введение. Рост численности детей с ограниченными возможностями здоровья (далее ОВЗ) по данным Федеральной службы государственной статистики, рис. 1 [1] приводит к все большему увеличению социального запроса на повышение эффективности традиционного лечения [2]. Возникает необходимость новых

методов, которые могли бы войти в комплекс традиционной реабилитации и повысить ее эффективность. Этим вопросам уделяют пристальное внимание медики, ученые, педагоги, реабилитологи, психологи, тренеры и специалисты по иппотерапии. Создание устройств с целью проведения оценки степени влияния эффективности новых методов реабилитации на состояние человека является приоритетным направлением инженерных исследований.



Рис. 1. Общая численность детей инвалидов 2016-2023 гг.

В качестве предмета данного исследования выбран метод иппотерапии – нейрофизиологическое лечение с применением верховой езды. Иппотерапия становится неотъемлемой частью современных медицинских, психологических и педагогических технологий [2]. Метод иппотерапии создает уникальные условия для одновременного позитивного воздействия на физический статус и психоэмоциональную сферу пациента. Терапия с участием посредника – лошади приносит пользу пациентам с различными психиатрическими и психосоматическим расстройствами [3, 4, 6].

Объектами данного исследования являются люди с ОВЗ, проходящие реабилитацию с помощью метода иппотерапии.

Несмотря на общеизвестный факт, что организм человека способен быстрее восстановиться благодаря верховой езде, иппотерапия на сегодняшний день не является научно-доказанным и рекомендованным врачами методом.

Есть следующие проблемы, мешающие широкому применению иппотерапии в рамках комплексной реабилитации. Это отсутствие:

- ◆ Объективной оценки процесса реабилитации с помощью иппотерапии и как следствие – недоверие к методу иппотерапии.
- ◆ Невозможность подбора индивидуальной нагрузки для всадника и объективной оценки функциональных возможностей и состояния лошади.
- ◆ Тренировочный процесс и подбор лошади осуществляется без объективного способа учета состояния всадника и лошади.
- ◆ Возникают риски травм и негативных состояний всадника.

Тренеры по иппотерапии и лечебно-верховой езде обычно работают с людьми с ОВЗ, чаще всего с детьми, у которых присутствуют патологии опорно-двигательного аппарата, неврология, расстройство аутистического спектра, задержка умственного и речевого развития. Проблема заключается в том, что дети с ОВЗ часто не могут объяснить словами, что их беспокоит, их поведение не всегда предсказуемо. Специалисты по иппотерапии обращают внимание на следующие типы негативного функционального состояния: утомление, физическое напряжение, повышенная эмоциональная напряженность, различные формы психологического стресса [2, 3].

Психофизиологические показатели позволяют выявить негативные функциональные состояния на основе ВСР (вариабельности сердечного ритма), изменения температуры определенных участков лица и тела, изменению тембра голоса, мышечного напряжения и др. [13, 14].

Постановка задачи. Оценить функциональное состояние всадника на основе психофизиологических показателей возможно на основе разработки аппаратно-программного комплекса (АПК) для диагностики функционального состояния всадника и лошади и оценки паттернов движения всадника и лошади во время движения. Данный комплекс будет интересен и полезен конным и конно-спортивным клубам, реабилитационными центрами специалистам по иппотерапии и адаптивной верховой езде, тренерам по адаптивному конному спорту.

Для исследования выбраны методы, обеспечивающие наиболее комфортный и незаметный съем ПФС всадника, и кинематику движения лошади: ФПГ, ЭМГ, термометрия, голосовой анализ речи.

Для проведения комплексного исследования и выявления всех необходимых показателей необходимо разработать устройство, позволяющее проводить непрерывный мониторинг ПФС всадника на протяжении всего занятия и передавать данные экспериментатору (тренеру) по беспроводному каналу.

На рис. 2 показан принцип работы АПК и пользовательский сценарий. С датчика 1 на микроконтроллер 4 поступают данные о функциональном состоянии и локомоциях всадника, с датчика 2 – данные о локомоциях лошади, 3 – блок сбора статокинетических психофизиологических показателей, 4 – микроконтроллер, 5 – смартфон тренера на который поступает вся полученная информация в процессе иппотерапии о лошади и всаднике.

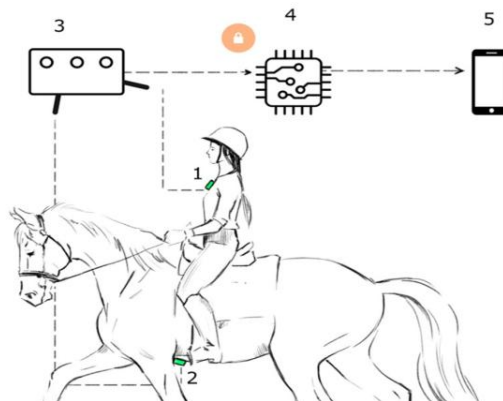


Рис. 2. Принцип работы АПК и пользовательский сценарий, где 1 – датчик 1 (сбор данных о функциональном состоянии и локомоциях всадника), 2 – датчик 2 (сбор данных о ПФС и локомоциях лошади), 3 – блок сбора статокинетических психофизиологических показателей, 4 – микроконтроллер, 5 – смартфон тренера

Использование данного комплекса удобно и безопасно как для всадника, так и для лошади. Отсутствие контакта с кожными покровами упрощает процедуру сертификации прибора. Возможно применение в полевых условиях. Крепление на одежду позволит применять и для детей с девиантным поведением. В рамках исследования проблемы проведено проблемное интервью и опрос среди специалистов по иппотерапии. Большинство подтвердили необходимость в объективной комплексной оценке на протяжении всего занятия.

Исследование аналогов показало, что существуют приборы и комплексы для оценки состояния человека, которые используются также для иппотерапии, однако все они не решают указанных выше проблем [4]. В то же время предлагаемый нами АПК обладает рядом дополнительных преимуществ по сравнению с указанными аналогами:

- ◆ Комплексность – прибор объединяет сразу несколько методик, необходимых для иппотерапии.
- ◆ Комфортный съем данных.
- ◆ Возможность оценки необходимых параметров в движении, также за пределами манежа.
- ◆ Синхронизация и анализ данных о взаимном движении всадника и лошади.
- ◆ Цена ниже, чем стоимость аналогов.

Во время иппотерапии работают все основные группы мышц человека. Синхронность движений лошади и всадника составляет основу для коррекции опорно-двигательного аппарата. Во время сеансов терапии лошадь передает человеку более 100 двигательных импульсов в минуту. Тело пациента движется в трех плоскостях (вперед-назад; вправо-влево; вверх-вниз). Постоянные колебания заставляют всадника рефлекторно корректировать положение своего центра тяжести; включаются мышцы корпуса, которые обычно редко напрягаются, формируется мышечный корсет, обеспечивающий поддержку позвоночнику [2, 4]. На занятиях иппотерапией во время прогулки верхом, для инструктора очень важно, чтобы пациент занял правильное положение корпуса и вошел в ритм движения лошади. Центр тяжести всадника должен совпадать с центром тяжести лошади, что позволяет всаднику прочно сидеть в седле. Критичным моментом всегда является начало движения, когда всадник по инерции откидывается назад. Поэтому перед началом движения всаднику необходимо чуть наклониться вперед, задействовав пояснично-крестцовые мышцы, тогда центр тяжести всадника также смещается вперед. Затем во время движения лошади всадник входит в ритм движения лошади и принимает ровное положение корпуса, сохраняя закон равновесия [6]. Определить и зафиксировать правильные положения корпуса всадника во время начала движения и во время движения лошади возможно на основе инерциальных МЭМС-датчиков, встроенных в блок АПК, прикрепленного к одежде всадника. Методика на основе МЭМС-датчиков для сбора статокINETических параметров успешно реализована. Одним из показателей является оценка угловой скорости и углы отклонения всадника и лошади от исходного положения. Полученные данные помогают объективно оценивать результаты тренировки и ее эффективность. Для определения угла отклонения от определенной плоскости и расстояния смещения применен акселерометр и гироскоп. Исследована функция сбора и обработки статокINETических параметров, которая используется в составе АПК. Провели лабораторные испытания, которые показали, что необходимо провести дополнительную обработку сигнала и устранить помехи, подобрать методы обработки и провести ряд и испытаний в лабораторных условиях.

Структурная схема АПК показана на рис. 3.

Аппаратно-программный комплекс для функциональной диагностики готовности всадника и лошади к иппотерапии представляет собой распределенную систему, которая состоит из двух блоков. Один блок – микроконтроллерный блок 1 принимает и обрабатывает данные, с электродов, прикрепленных к лошади. Сам блок состоит из шести осевого инерциального датчика, микроконтроллера, радиомодема. Также предусматривается блок питания ко всем компонентам блока. После обработки ЭКГ лошади по радиосвязи передается на смартфон врача или исследователя (тренера). Также ЭКГ сигнала лошади возможно передать и другим пользователям по радиоканалу. Второй блок – микроконтроллерный блок 2 необ-

ходим для обработки и передачи сигналов с всадника. ФПГ и ЭКГ человека (всадника) поступает на микроконтроллер, где и происходит дальнейшая обработка сигналов. Данный блок также содержит шестиосевой инерциальный датчик, радиомодем и блок питания. После обработки ФПГ и ЭКГ человека (всадника) по радиосвязи передается на смартфон врача или исследователя (тренера). Данные сигналы возможно передать и другим пользователям по радиоканалу. Таким образом, аппаратно-программный комплекс для функциональной диагностики готовности всадника и лошади к иппотерапии является блочной системой с широким спектром возможностей по обработке и дальнейшей передаче сигналов, поступающих как с лошади, так и со всадника [15, 16].

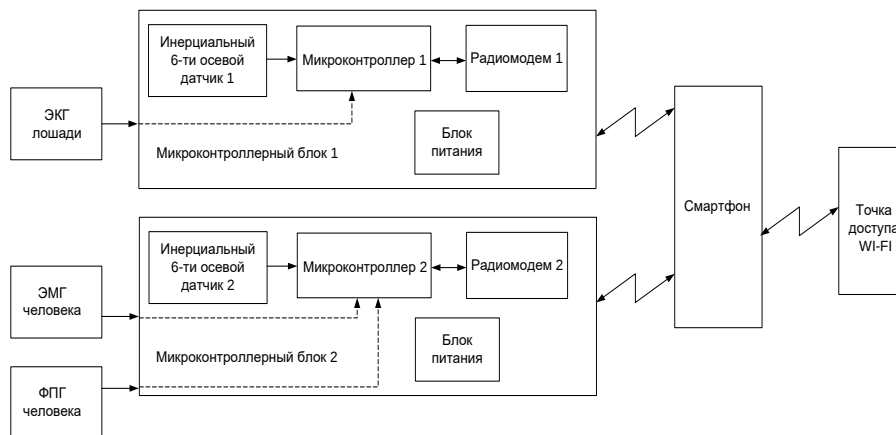


Рис. 3. Структурная схема аппаратно-программного комплекса для функциональной диагностики готовности всадника и лошади к иппотерапии

Рассмотрим работу инерциального датчика МЭМС на основе платы MPU-6050. Используемый датчик для позволяет измерить угловое ускорение и угловую скорость относительно осей X,Y,Z. В состав микросхемы MPU-6050 входят три измерителя ускорения – акселерометра, каждый из них расположен на своей оси X,Y,Z. Если наклонить датчик и взять $\arctg \frac{ax}{az}$, то получим угол поворота относительно оси Y; если взять $\arctg \frac{ay}{az}$, то получим угол наклона по оси X. Недостатком измерений с помощью акселерометра является то, что данный тип измерения сопровождается шумами и помехами. Достоинством измерений, выполненных с помощью акселерометра, является независимость от времени [10;11].

Микросхема MPU-6050 позволяет также измерить угловую скорость ω . Интегрирование по скорости позволяет рассчитать углы. Данные углы не подвержены шумам. Но у данного вида измерений есть недостаток: если в начале измерения есть ошибки, то они «дрейфуют» во времени и усиливаются. Для того чтобы правильно измерить углы отклонения корпуса всадника необходимо объединить оба представленных метода измерения с помощью комплементарного фильтра или фильтра Калмана. Недостатком фильтра Калмана является сложность его настройки и длительное вычислительное время. Комплементарный фильтр использует выходы двух или нескольких датчиков. Комплементарный фильтр представляет собой упрощенную модель фильтра Калмана для одномерного случая, в котором звено интерполяции представляет первое слагаемое. Поскольку угловая оценка с использованием одного датчика акселерометра или гироскопа имеет недостаточную точность, основная идея комплементарного фильтра заключается в объединении выходов гироскопа и акселерометра [7, 12, 17]. Оценка угла составляет полу-

ченные данные из суммы их измерений. Проинтегрированный выходной сигнал с гироскопа подается в фильтр высоких частот и выходной сигнал подается в фильтр низких частот. Функция фильтра нижних частот состоит в том, чтобы изменения происходили, отфильтровывая краткосрочные колебания [7, 18–20].

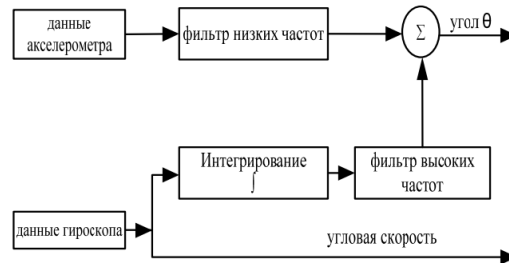


Рис. 4. Структурная схема цифрового комплементарного фильтра для МЭМС гироскопа и акселерометра [5, 7, 8].

Математическая модель комплементарного фильтра может быть представлена, как:

$$\theta_{\text{угол}} = \alpha * (\theta_{\text{угол}} + \omega_{\text{гироскоп}} * dt) + (1 - \alpha) \alpha_{\text{аксе}}, \quad (1)$$

$\theta_{\text{угол}}$ – угол наклона (тангаж или крен), α – коэффициент фильтра,

$\omega_{\text{угол}}$ представляет угловую скорость от гироскопа, и $\alpha_{\text{аксе}}$ – угол, полученный спомощью данных от акселерометра [5, 8].

Данные от гироскопа и акселерометра должны быть обнулены и масштабированы перед использованием уравнения (1) для вычисления угла. Коэффициент фильтра α определяется уравнением (2).

$$\alpha = \frac{\tau}{\tau + dt}, \quad (2)$$

где τ – постоянное время фильтра [5, 7].

На рис. 5 представлены сигналы, записанные монитором без обработки во время движения всадника на лошади.

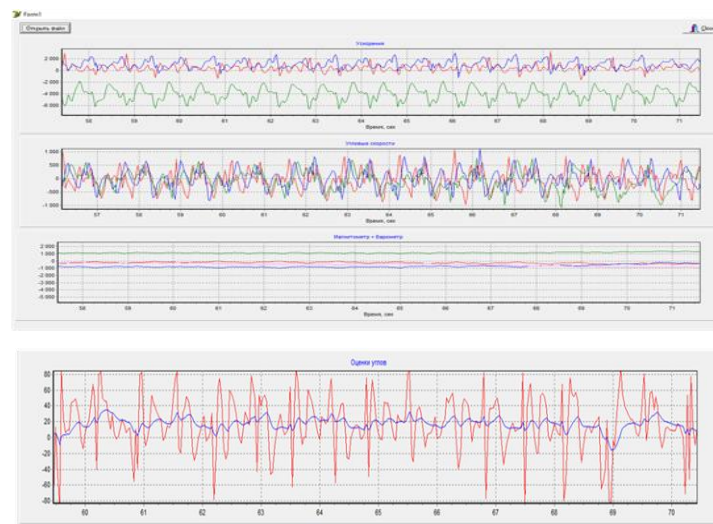


Рис. 5. Данные, полученные во время движения всадника на лошади, без обработки

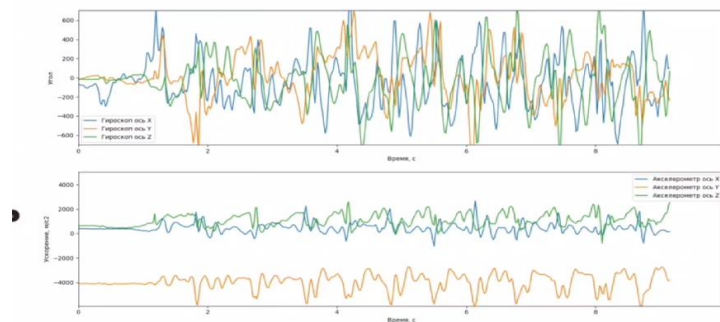


Рис. 6. Данные, полученные во время движения всадника на лошади, постдополнительной обработки

Комплементарный фильтр позволил избавиться от шума и дрейфа, и осуществлять регулируемую фильтрацию оценки угла от помехи [9].

Выводы. Комплементарный фильтр может быть использован для определения фактического угла, сглаживая помех, возникающих при работе акселерометра и гироскопа, он позволяет точно определить фактический угол наклона всадника. Использование АПК на основе МЭМС-датчиков во время сеанса иппотерапии дает возможность инструктору с помощью записи движения всадника обнаружить и зафиксировать ошибки посадки (статические) и ошибки, возникающие во время движения всадника на лошади (динамические). Внедрение данной разработки повысит эффективность занятий иппотерапией, благодаря осуществлению контроля инструктора за тем, насколько правильно всадник занимает положение в седле и выполняет упражнение.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федеральная служба государственной статистики. – URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/13964> (дата обращения: 15.05.2023).
2. Панаев В.Д. Управляющее воздействие адаптивной физической культуры и спорта в социализации личности детей с ограниченными жизненными возможностями // Лечебная физическая культура. – 2004. – № 4. – С. 32-36.
3. Шайдхакер М., Фридрих Д., Бендер В. О лечении расстройств на почве страха с помощью психотерапевтической верховой // Адаптивная физическая культура. – 2003. – № 1. – С. 18-19.
4. Материалы 8 Всероссийской научно-практической конференции: Методы абилитации и реабилитации с помощью лошади в системе комплексной реабилитации // НФ ИАКС. – Ростов-на-Дону, 2022.
5. Зо Мью Наин, А.В. Щагин, Ле Винь Тханг, Хтин Линн У. Комплементарный фильтр для оценки угла с использованием микроэлектромеханической системы гироскопа и акселерометра. // Инженерный вестник Дона. – 2020. – № 3. – ivdon.ru/rn/magazine/archive/n3y2020/6380.
6. Мюзелер В. Учебник верховой езды. – URL: <https://horse-way.ru/informatsiya/informatsiya2/knigi/kniga-2-uchebnik-verhovo-eydy-v-myuzeler/> (дата обращения: 4.09.2022).
7. Адаптивные фильтры / под ред. К.Ф.Н. Коуэна и П.М. Гранта. – М.: Мир, 1988. – 392 с.
8. Синютин С.А. Анализ RR интервального ряда водителя в условиях сильных помех с помощью Wavelet преобразования // Инженерный вестник Дона. – 2012. – № 3. – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/919> (доступ свободный).
9. Синютин С.А., Коков З.А., Кармов М.А. Адаптивное подавление артефактов движения при записи ЭКГ лошади // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 3 (26). – С. 81.

10. Синютин С.А., Сахаров В.Л. Определение мощности, развиваемой человеком при ходьбе по измерению ускорений // Рассеяние электромагнитных волн. Межвед. сб. науч.-техн. статей. – Вып. 16 / под ред. Ю.В. Юханова. – Таганрог: ТТИ ЮФУ. – 229 с.
11. Синютин С.А. Теория и конструкция полиграфа для регистрации мощности, развиваемой человеком при ходьбе // Тезисы докладов III Международной науч.-практ. конф. (1–4 октября 2009, г. Ростов-на-Дону). – Ростов-на-Дону, 2009. – 277 с.
12. Тарасова И.А., Леонова А.В., Синютин С.А. Алгоритмы фильтрации сигналов биологической природы // Инженерный вестник Дона. – 2012. – № 4 (часть 2). – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1481> (доступ свободный).
13. Семенистая Е.С., Леонова А.В. Экспериментальное исследование зависимости времени пульсовой волны от систолического артериального давления // Актуальные вопросы исследования общественных и технических систем: Матер. Всероссийской научной конференции. Ч. 2. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. – Режим доступа: <http://fre.tti.sfedu.ru/conferences/132-aviots.html>.
14. Леонова А.В., Зиновкин П.К., Болдырев Е.Б. Аппаратно-программный комплекс регистрации нагрузки для функциональной диагностики // Инженерный вестник Дона. – 2012. – № 4 (часть 1). – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1130> (доступ свободный).
15. Дембо А.Г., Земцовский Э.В. Спортивная кардиология. – Л.: Медицина, 1989. – 464 с.
16. Баевский Р.М., Кириллов О.И., Клецкин С.З. Математический анализ изменений сердечного ритма при стрессе. – М.: Наука, 1984. – 220 с.
17. Glentis G.O., Berberidis K., Theodoridis S. Efficient Least Squares Adaptive Algorithms for FIR Transversal Filtering // IEEE Signal Processing Magazine. – 1999. – Vol. 16, No. 4. – P. 13-41.
18. Haykin S. Adaptive Filter Theory. – 4th ed. – Prentice Hall, 2002. – 936 p. – ISBN 0-13-048434-2. 1
19. Farhang-Boroujeny B. Adaptive Filters. Theory and Applications. – John Wiley & Sons. – ISBN: 0471983373.
20. Euston M., Coote P., Mahony R., Kim J., Hamel. A Complementary Filter for Attitude Estimation of a Fixed wing UAV // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, France, September, 22-26, 2008. – P. 340-345.

REFERENCES

1. Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statistiki [Federal State Statistics Service]. Available at: <https://rosstat.gov.ru/folder/13964> (accessed 15 May 2023).
2. Panachev V.D. Upravlyayushchee vozdeystvie adaptivnoy fizicheskoy kul'tury i sporta v sotsializatsii lichnosti detey s ogranichennymi zhiznennymi vozmozhnostyami [Controlling influence of adaptive physical culture and sports in the socialization of the personality of children with limited life opportunities], *Lechebnaya fizicheskaya kul'tura* [Therapeutic physical culture], 2004, No. 4, pp. 32-36.
3. Shaydkhaker M., Fridrikh D., Bender V. O lechenii rasstroystv na pochove strakha s pomoshch'yu psikhoterapevticheskoy verkhovoy [On the treatment of disorders based on fear with the help of psychotherapeutic riding], *Adaptivnaya fizicheskaya kul'tura* [Adaptive physical culture], 2003, No. 1, pp. 18-19.
4. Materialy 8 Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: Metody abilitatsii i reabilitatsii s pomoshch'yu loshadi v sisteme kompleksnoy reabilitatsii [Materials of the 8th All-Russian Scientific and Practical Conference: Methods of habilitation and rehabilitation with the help of a horse in the system of complex rehabilitation], *NF IAKS* [NF IACS]. Rostov-on-Don, 2022.
5. Zo M'o Nain, Shchagin A.V., Le Vin' Tkhang, Khtin Linn U. Komplementarnyy fil'tr dlya otsenki ugla s ispol'zovaniem mikroelektromekhanicheskoy sistemy giroskopa i akselerometra. [Complementary filter for angle estimation using microelectromechanical gyroscope and accelerometer system], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2020, No. 3. Available at: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2020/6380.
6. Myuzeler V. Uchebnik verkhovoy ezdy [Horse riding textbook]. Available at: <https://horseway.ru/informatsiya/informatsiya2/knigi/kniga-2-uchebnik-verhovo-ey-zdy-v-myuzeler/> (accessed 4 September 2022).

7. Adaptivnye fil'try [Adaptive filters], pod red. K.F.N. Kouena i P.M. Granta. Moscow: Mir, 1988, 392 p.
8. Sinyutin S.A. Analiz RR interval'nogo ryada voditelya v usloviyakh sil'nykh pomekh s pomoshch'yu Wavelet preobrazovaniya [Analysis of RR interval series of the driver in conditions of strong interference using Wavelet transformation], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2012, No. 3. Available at: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/919> (free access).
9. Sinyutin S.A., Kokov Z.A., Karmov M.A. Adaptivnoe podavlenie artefaktov dvizheniya pri zapisi EKG lozhadi [Adaptive suppression of motion artifacts in equine ECG recordings], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2013, No. 3 (26), pp. 81.
10. Sinyutin S.A., Sakharov V.L. Opredelenie moshchnosti, razvivaemoy chelovekom pri khod'be po izmereniyu uskoreniy [Determination of the power developed by a person when walking by measuring acceleration], *Rasseyaniye elektromagnitnykh voln. Mezhd. sb. nauch.-tekhn. statey* [Scattering of electromagnetic waves. Interdepartmental collection of scientific and technical articles], Issue 16, ed. by Yu.V. Yukhanova. Taganrog: TTI YuFU, 229 p.
11. Sinyutin S.A. Teoriya i konstruktsiya poligrafa dlya registratsii moshchnosti, razvivaemoy chelovekom pri khod'be [Theory and design of a polygraph for recording the power developed by a person when walking], *Tezisy dokladov III Mezhdunarodnoy nauch.-prakt. konf. (1–4 oktyabrya 2009, g. Rostov-na-Donu)* [Abstracts of reports of the III International Scientific and Practical Conference (October 1–4, 2009, Rostov-on-Don)]. Rostov-on-Don, 2009, 277 p.
12. Tarasova I.A., Leonova A.V., Sinyutin S.A. Algoritmy fil'tratsii signalov bioelektricheskoy prirody [Algorithms for filtering signals of bioelectric nature], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2012, No. 4 (Part' 2). Available at: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1481> (free access).
13. Semenistaya E.S., Leonova A.V. Eksperimental'noe issledovanie zavisimosti vremeni pul'sovoy volny ot sistolicheskogo arterial'nogo davleniya [Experimental study of the dependence of pulse wave time on systolic blood pressure], *Aktual'nye voprosy issledovaniya obshchestvennykh i tekhnicheskikh sistem: Mater. Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii* [Current issues in the study of social and technical systems: Proceedings of the All-Russian Scientific Conference]. Part 2. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2011. Available at: <http://fre.tti.sfedu.ru/ru/conferences/132-aviots.html>.
14. Leonova A.V., Zinovkin P.K., Boldyrev E.B. Appararno-programmnyy kompleks registratsii nagruzki dlya funktsional'noy diagnostiki [Hardware and software complex for load recording for functional diagnostics], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2012, No. 4 (Part' 1). Available at: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1130> (free access).
15. Dembo A.G., Zemtsovskiy E.V. Sportivnaya kardiologiya [Sports cardiology]. Leningrad: Meditsina, 1989, 464 p.
16. Baevskiy R.M., Kirillov O.I., Kletskin S.Z. Matematicheskii analiz izmeneniy serdechnogo ritma pri stresse [Mathematical analysis of changes in heart rate under stress]. Moscow: Nauka, 1984, 220 p.
17. Glentis G.O., Berberidis K., Theodoridis S. Efficient Least Squares Adaptive Algorithms for FIR Transversal Filtering, *IEEE Signal Processing Magazine*, 1999, Vol. 16, No. 4, pp. 13-41.
18. Haykin S. Adaptive Filter Theory. 4th ed. Prentice Hall, 2002, 936 p. ISBN 0-13-048434-2. 1
19. Farhang-Boroujeny B. Adaptive Filters. Theory and Applications. John Wiley & Sons. ISBN: 0471983373.
20. Euston M., Coote P., Mahony R., Kim J., Hamel. A Complementary Filter for Attitude Estimation of a Fixed wing UAV, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, France, September, 22-26, 2008*, pp. 340-345.

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

Леонова Антонина Валерьевна – Южный федеральный университет; e-mail: leonova@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79043467991; кафедра встраиваемых и радиоприемных систем; к.т.н.; доцент.

Шпаковская Оксана Юрьевна – e-mail: oshpakovskaya@sfedu.ru; тел.: +79612928515; кафедра систем автоматического управления; аспирант.

Синютин Сергей Алексеевич – e-mail: sasinyutin@sfedu.ru; тел.: 89281579965; кафедра встраиваемых и радиоприемных систем; зав. кафедрой; к.т.н.; доцент.

Коков Заур Анатольевич – Институт физики и математики; e-mail: zak@kbsu.ru; г. Нальчик, Россия; тел.: +79034959004; кафедра теоретической и экспериментальной физики; к.ф.-м.н.; доцент.

Leonova Antonina Valerievna – Southern Federal University; e-mail: leonova@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79043467991; the department of embedded and radio receiving systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

Shpakovskaya Oksana Yuryevna – e-mail: oshpakovskaya@sfedu.ru; phone: +79612928515; the department of automatic control systems; graduate student.

Sinyutin Sergey Alekseevich – e-mail: sasinyutin@sfedu.ru; phone: +79281579965; the department of embedded and radio receiving systems; head of department; cand. of eng. sc.; associate professor.

Kokov Zaur Anatol'evich – Institute of Physics and Mathematics; e-mail: zak@kbsu.ru; Nalchik, Russia; phone: +79034959004; the department of theoretical and experimental physics; cand. of phys. and math. sc.; associate professor.

УДК 621.382.32:621.314

DOI 10.18522/2311-3103-2023-4-220-229

А.С. Синюкин, Б.Г. Коноплев, А.В. Ковалев

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ-УМНОЖИТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ПИТАНИЯ МАЛОМОЩНЫХ БЕСПРОВОДНЫХ ПАССИВНЫХ МИКРОУСТРОЙСТВ

В связи с активным развитием технологий автоматизации и их широким внедрением в логистику, торговлю, промышленность, строительство и другие отрасли экономики все большее распространение за счет своего удобства и доступности получают беспроводные системы. Чаще всего в них используются миниатюрные устройства, способные выполнять операции по идентификации, измерению параметров внешней среды, приему и передаче сигналов. В свою очередь, существует ряд областей, в которых использование батарейных микроустройств ограничено, поскольку замена разрядившейся батареи не всегда осуществима и целесообразна, к тому же стоимость активных устройств относительно высока. В таких приложениях могут применяться пассивные устройства, получающие энергию для работы посредством принимаемого антенной радиочастотного излучения из окружающего пространства. Для массового производства подобных недорогих устройств требуется интегральное исполнение микросхемы, ключевым модулем источника питания которой является выпрямитель напряжения с функцией умножения. В работе представлены результаты разработки интегральных выпрямителей-умножителей напряжения по типовым КМОП-технологиям CM018G 180 нм и HCMOS8D 180 нм в САПР Cadence IC. Рассмотрена степень влияния порогового напряжения и числа каскадов на выходные характеристики умножителей. Показано, что в восьмикаскадном умножителе, построенном по технологии HCMOS8D, уровень выходного напряжения 2 В, необходимый для питания микросхемы беспроводного устройства, достигается при амплитуде входного напряжения 375 мВ, а в умножителе на шестнадцати каскадах - при амплитуде 300 мВ. Предлагаемые выпрямители-умножители могут быть использованы при построении источников питания беспроводных пассивных устройств.

Интегральная микросхема; КМОП; мониторинг состояния конструкций; выпрямитель напряжения; каскадирование; подпороговый режим работы.

A.S. Sinyukin, B.G. Konoplev, A.V. Kovalev

INTEGRATED VOLTAGE RECTIFIER-MULTIPLIER FOR SUPPLYING LOW-POWER WIRELESS PASSIVE MICRODEVICES

Concerning automation technologies development and their deployment to logistics, commerce, industry, constructional engineering and other economy sectors, wireless systems get more widespread due to their convenience and availability. Most of the time miniature devices able to perform operations of identification, ambient parameters measure, receive and transmit of signals are used in such systems. In return, there are number of areas, in which battery devices using is limited since a change of a low battery is not always feasible and viable. The passive devices gathering energy for operation through radiofrequency radiation receiving by antenna from the environment could be utilized in such applications. The integrated implementation of microcircuit is required for mass production of suchlike inexpensive devices. The voltage rectifier with multiplication function is the key module of these microcircuits supply unit. Results of the voltage rectifiers-multipliers design using typical CMOS processes CM018G 180 nm and HCMOS8D 180 nm and Cadence IC CAD are presented in the work. Degree of threshold voltage and number of stages influence on the multipliers output characteristics is considered. It is shown, that in eight-stages multiplier constructed with HCMOS8D process, output voltage needed for supply of wireless device microcircuit is reached at input voltage amplitude of 375 mV, and in sixteen-stages multiplier - at 300 mV amplitude. The proposed rectifier-multipliers could be used at power supplies design of the wireless passive devices.

Integrated circuit; CMOS; structural health monitoring; voltage rectifier; cascading; subthreshold operation mode.

Введение. Преимуществами интегральных схем, производимых по типовым технологическим процессам, по сравнению с устройствами, изготавливаемыми на основе дискретных компонентов, являются повышенное быстродействие, значительно сниженные массогабаритные характеристики, возможность крупносерийного производства, воспроизводимость, надежность. Стоимость единичной микросхемы также в большинстве случаев оказывается существенно ниже стоимости функционально аналогичного устройства с дискретными компонентами, что достигается за счет автоматизированного или полуавтоматизированного изготовления больших партий микрочипов одной номенклатуры. Именно массовое производство позволяет окупить высокую стоимость разработки интегральной микросхемы и изготовления фотолитографических шаблонов. Актуальным примером современных микросхем, производимых по типовым технологиям КМОП, могут служить компактные приемопередающие радиоустройства, используемые для сбора, хранения, обработки и передачи данных в системах интернета вещей [1], радиочастотной идентификации [2], мониторинга состояния технических сооружений и в сетях беспроводных датчиков [3].

Одним из ключевых классифицирующих признаков для беспроводных миниатюрных радиоустройств, применяемых в промышленности, строительстве, логистике, торговле, выступает тип питания. Активные устройства питаются от встроенной батареи, благодаря чему не зависят от внешних источников энергии, а пассивные посредством приемной антенны собирают энергию радиочастотного излучения из окружающего пространства. Поэтому активные устройства обычно используются в тех приложениях, в которых важна надежность и полная автономность в течение относительно короткого периода, а пассивные, напротив, могут применяться в областях, нуждающихся в компактных, легких и сравнительно недорогих устройствах с длительным сроком службы (медицинские импланты [4], сенсоры, встраиваемые в мосты, здания [5], транспортные средства [6]). Эти качества пассивных беспроводных устройств обеспечивает отсутствие внутреннего источника постоянного питания и крупносерийное производство по типовым КМОП-технологиям.

В качестве аналога батареи в пассивных устройствах можно рассматривать комплекс модулей, в совокупности образующих источник питания. Такой источник позволяет формировать стабильное напряжение питания нужной величины из энергии электромагнитных волн, направляемых от специализированной станции и принимаемых антенной пассивного устройства или собираемых антенной непосредственно из окружающей среды (energy harvesting [2, 3]). Одним из незаменимых модулей источника питания является выпрямитель напряжения, преобразующий переменное напряжение внешнего сигнала в постоянное напряжение интегральной схемы. Поскольку при беспроводной передаче амплитуда входного сигнала во многих случаях может быть невелика, чаще всего выпрямитель расширяется несколькими каскадами, в результате чего напряжение на его выходе достигает более высокого значения, кратного числу каскадов и соответствующего напряжению питания микросхемы. Поэтому такие устройства называют выпрямителями-умножителями напряжения или просто умножителями.

В статье выполнено сравнение нескольких умножителей напряжения, реализованных по различным технологиям, рассмотрены особенности топологического проектирования интегральных умножителей и проведен анализ влияния числа каскадов и параметров МОП-транзисторов на выходные характеристики умножителей.

Имплементация умножителей напряжения. Существует несколько схем умножителей напряжения, применяемых в источниках питания пассивных устройств, одной из самых распространенных среди которых в силу своей простоты и возможности каскадирования является умножитель с накачкой заряда [7]. Если такая схема состоит из одного каскада, включающего два выпрямляющих компонента (диода или транзистора в диодном включении) и два конденсатора, то без учета потерь на компонентах умножитель производит умножение входного напряжения в два раза. При увеличении числа каскадов выходное напряжение соизмерно возрастает:

$$V_{out,ideal} = 2 \cdot N \cdot V_a, \quad (1)$$

где $V_{out,ideal}$ – значение выходного напряжения без учета потерь; N – число каскадов; V_a – амплитуда входного напряжения.

В том случае, когда потери на компонентах принимаются во внимание, приближенное выражение для выходного напряжения записывается как

$$V_{out} = 2 \cdot N \cdot (V_a - V_d), \quad (2)$$

где V_{out} – уровень выходного напряжения, V_d – падение напряжения на диоде (транзисторе в диодном включении). В случае относительно высоких значений входного напряжения падение напряжения на МОП-транзисторе в диодном включении приблизительно равно его пороговому напряжению $V_d \approx V_{th}$.

Выпрямитель-умножитель напряжения для беспроводных пассивных устройств может быть реализован различными способами – на дискретных компонентах, в виде интегральной микросхемы по типовым или более совершенным КМОП-технологиям, и в табл. 1 представлены параметры нескольких реализованных маломощных умножителей, в основу которых положена схема накачки заряда.

Приведенный показатель качества умножения напряжения определялся из отношения уровня достигаемого выходного напряжения к произведению амплитуды входного напряжения на число умножающих каскадов. Из табл. 1 видно, что более совершенные и сложные технологии, такие как «кремний на изоляторе» [8] или КМОП-технологии, в которых реализуются транзисторы с нулевым пороговым напряжением [11, 12], позволяют получать более высокие значения показателя качества. Однако такие технологии менее доступны, и стоимость производства пассивных микроустройств по ним оказывается выше, чем при использовании типовых технологий КМОП [9, 10, 13, 17].

Таблица 1

Параметры умножителей напряжения различного исполнения

Источник	Реализация	Занимаемая площадь, мм ²	Показатель качества умножения
[8]	0,5 мкм КНС КМОП	0,043	4,07
[9]	0,13 мкм КМОП	0,720	1,00
[10]	0,18 мкм КМОП	0,060	1,39
[11]	0,35 мкм КМОП, транзисторы с нулевым V_{th}	0,096	4,68
[12]	0,18 мкм КМОП, транзисторы с нулевым V_{th}	Нет данных	3,69
[13]	0,18 мкм КМОП	0,774	1,71
[14]	Дискретные компоненты	500,0	5,04
[15]	Дискретные компоненты	1440	6,20
[16]	Дискретные компоненты	5400	4,72
[17]*	0,18 мкм КМОП	0,029	2,22

* – предлагаемый умножитель

В умножителях часто применяются диоды с барьером Шоттки [9, 12], которые отличаются высокой скоростью переключения и малыми падениями напряжения, благодаря чему могут превосходить МОП-транзисторы по выходным характеристикам, однако диоды Шоттки в общем случае несовместимы с обычными КМОП-технологиями и требуют изготовления дополнительных фотошаблонов, что также приводит к увеличению конечной стоимости продукта. В некоторых случаях построение выпрямителей-умножителей на базе дискретных компонентов дает возможность [14-16] достигать более высоких показателей по сравнению с типовыми интегральными устройствами, однако такая имплементация значительно сужает область применения пассивных устройств ввиду достаточно громоздких размеров и практической неосуществимости крупносерийного производства.

При массовом производстве микросхем для беспроводных пассивных устройств, с одной стороны, необходимы возможности, предоставляемые интегральными технологиями, а с другой – требуется рынок сбыта, который обеспечивается благодаря расширению области применения и росту значимости безбатарейных приложений в современных автоматизированных системах. Важно заметить, что параметры и характеристики, ожидаемые от беспроводных микроустройств, достижимы при разработке и изготовлении таких устройств по типовым КМОП-технологиям с проектными нормами порядка 65-180 нм [18], и в то же время использование типовых технологий, доступных и отработанных на российских предприятиях, позволяет значительно снизить стоимость производства.

Топологическое проектирование умножителей напряжения. На рис. 1,а показана схема умножителя напряжения, проектирование которого осуществлялось по технологиям CM018G 180 нм [19] (У1) (разработка представлена ранее в [17]) и HCMOS8D 180 нм [18] (У2) в САПР Cadence IC (Virtuoso). В обоих случаях реализовывались восьмикаскадные умножители, конструктивно подобные друг другу: по периметру размещены конденсаторы типа «металл-изолятор-металл», в центре расположены диодно-включенные p -канальные МОП-транзисторы. Из-за конструктивной и технологической схожести умножителей площади, занимаемые ими на кристалле, оказались сопоставимы: 0,0286 мм² (У1) и 0,0225 мм² (У2). Од-

нако топология умножителя У2 (рис. 1,б) подверглась некоторым изменениям, в частности были модифицированы геометрическая конфигурация транзисторов, подключение трассировочных шин и переходы между нижними обкладками конденсаторов и контактами транзисторов.

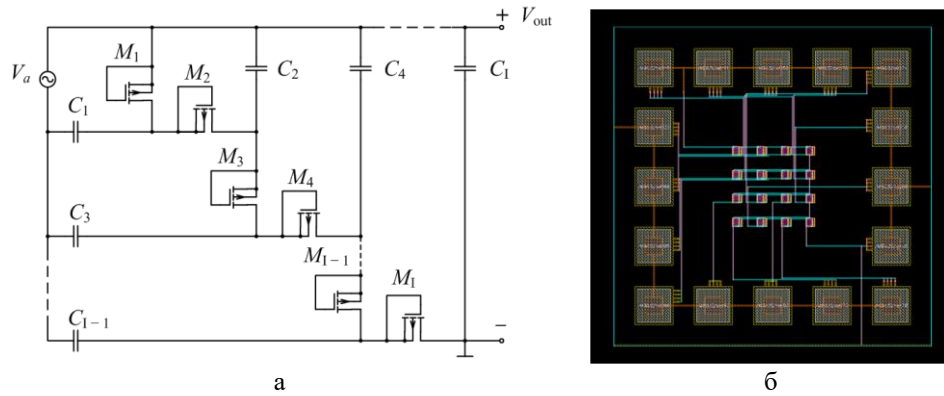


Рис. 1. Схема (а) [17] и топология многокаскадного выпрямителя-умножителя напряжения, реализованная по технологии HCMOS8D 180 нм (У2)

Выбор параметров МОП-транзисторов, которые в представленной схеме находятся в диодном включении, определяет эффективность работы всего устройства, и одним из важнейших параметров является их размер или отношение ширины канала транзистора к его длине W/L . Поскольку минимальная длина транзистора определяется технологией и для обоих рассматриваемых случаев (У1, У2) составляет 180 нм, важно корректно выбрать значение ширины канала, чтобы соблюсти баланс между его влиянием на величину прямого тока, способствующего процессу зарядки конденсаторов в цепи умножителя, и на величину тока утечки и паразитных емкостей, высокие значения которых приводят к снижению эффективности работы устройства. Согласно результатам предыдущих исследований [20], значение W/L , близкое к оптимальному, составляет 50, исходя из чего значение ширины канала транзистора в случае У2 было выбрано равным 9 мкм (для У1 $W/L = 35$). Использование многопальцевой структуры затвора МОП-транзистора (в У2 у каждого транзистора реализовано три «пальца», в У1 - по одному) позволило добиться большей компактности структуры транзистора и снизить прямое сопротивление за счет увеличения эффективной ширины затвора и более равномерного распределения тока.

На рис. 2 представлено сравнение уровня выходного напряжения (рис. 2,а) и эффективности умножения (рис. 2,б) умножителей У1 и У2 в зависимости от амплитуды входного напряжения, которая рассчитывалась следующим образом [20]:

$$\eta = \frac{V_{out,sim}}{V_{out,ideal}} = \frac{V_{out,sim}}{2 \cdot N \cdot V_a} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где $V_{out,sim}$ – значение выходного напряжения, получаемое в результате моделирования.

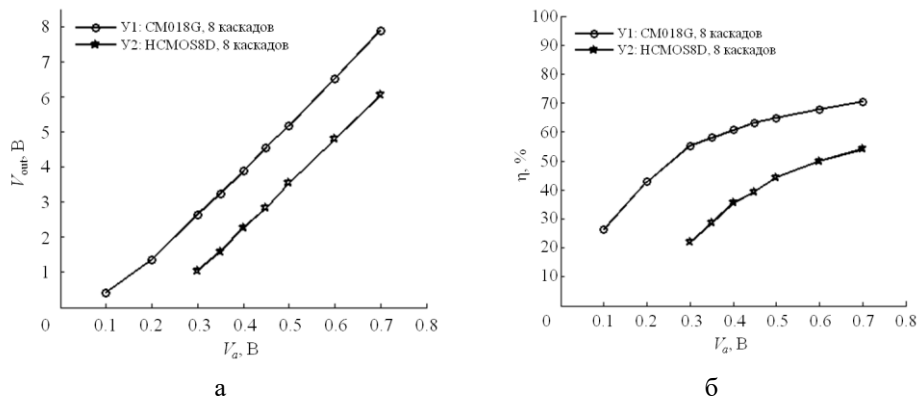


Рис. 2. Зависимость выходного напряжения (а) и эффективности умножения (б) от амплитуды входного напряжения для умножителей, построенных по технологиям CM018G и HCMOS8D при $N = 8$

Моделирование выполнялось в Cadence Virtuoso ADE, с учетом влияния паразитных составляющих, экстрагированных из топологии. Во всех случаях нагрузочное сопротивление умножителя устанавливалось равным 100 МОм. Из рис. 2 видно, что и по уровню выходного напряжения, и по эффективности умножения умножитель U1 превосходит U2, что можно объяснить меньшим пороговым напряжением МОП-транзисторов в технологии CM018G (0,262 В по сравнению с 0,470 В в HCMOS8D). Процесс выпрямления напряжения начинается в обоих случаях в подпороговой области работы транзисторов, но чувствительность U1 (примерно 100 мВ) оказывается выше чувствительности U2 (порядка 300 мВ). Минимальное значение амплитуды входного напряжения, требуемое для достижения уровня напряжения питания (2 В с учетом возможных потерь при стабилизации), также в случае умножителя U1 ниже – 250 мВ, в то время как для U2 необходимо значение амплитуды 375 мВ. Как видно из рис. 2,б, для обоих умножителей наименьшее значение эффективности умножения составляет 20-25%, тогда как в области относительно высоких значений входного напряжения эффективность U1 достигает более 70%, а эффективность U2 – только 54%.

Более высокие значения выходного напряжения можно получить, увеличив число каскадов. Для этого, а также для снижения минимального значения амплитуды, необходимого для достижения нужного выходного уровня, по технологии HCMOS8D 180 нм построена топология шестнадцатикаскадного умножителя (U3). Благодаря возможности каскадирования схемы накачки заряда, на основе которой происходила разработка конструкции, топология шестнадцатикаскадного устройства была получена посредством объединения двух восьмикаскадных блоков (рис. 3).

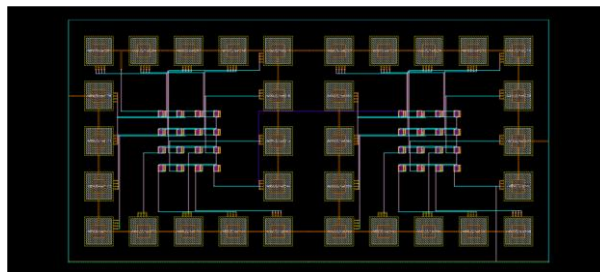


Рис. 3. Топология шестнадцатикаскадного выпрямителя-умножителя (U3)

На рис. 4 представлены результаты моделирования переходных процессов в умножителях на восьми и на шестнадцать каскадах при амплитуде входного напряжения 0,3 В. Как видно из рисунка, умножитель У2 выходит на рабочий режим приблизительно за 200 мкс, тогда как умножителю У3 требуется для этого более 400 мкс.

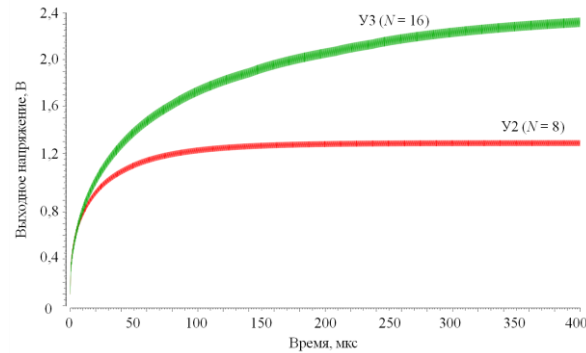


Рис. 4. Повышение уровня выходного напряжения в умножителях У2 и У3, построенных по технологии HCMOS8D 180 нм

Влияние величины амплитуды входного напряжения на уровень выходного напряжения и эффективность умножения выпрямителей-умножителей (У2 и У3), реализованных по технологии HCMOS8D, представлены на рис. 5,а,б. Из рис. 5,а следует, что в случае умножителя У3 ($N = 16$) минимальное значение входной амплитуды, необходимое для работы микросхемы (порядка 2 В) составляет 300 мВ, и поскольку эта величина приблизительно соответствует чувствительности умножителей, реализуемых по технологии HCMOS8D, то в дальнейшем увеличении числа каскадов нет практической необходимости (при условии сохранения требований по выходному напряжению).

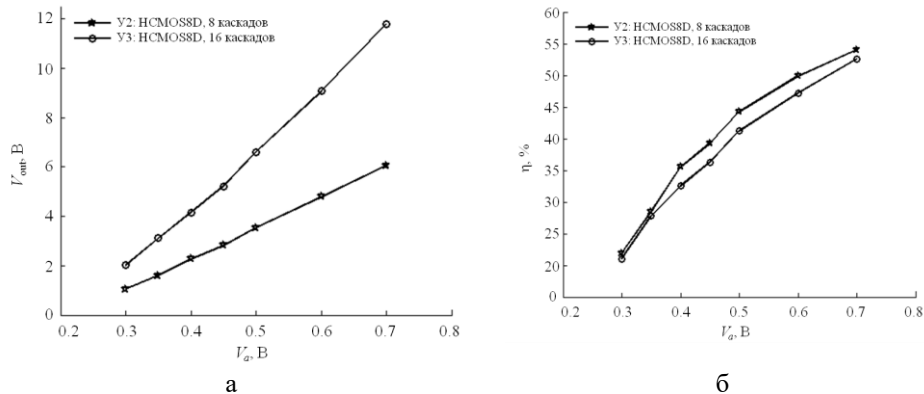


Рис. 5. Зависимости выходного напряжения (а) и эффективности умножения (б) от входной амплитуды для умножителей, построенных по технологии HCMOS8D, при $N = 8$ и $N = 16$

Разница между эффективностью умножения напряжения для восьмикаскадного (У2) и шестнадцатикаскадного (У3) умножителей (рис. 5,б) составляет не более 1-3% во всем диапазоне входных напряжений, причем для большего числа каскадов ($N = 16$) эффективность оказывается немного ниже. Сохранение значения

эффективности умножения в широких пределах входной амплитуды независимо от числа каскадов достигается благодаря особому соединению выводов МОП-транзисторов в диодном включении (рис. 1,а) [20], за счет чего существенно снижается негативное влияние эффекта подложки, приводящего к увеличению падений напряжения на выпрямляющих компонентах, снижению прямых токов и росту порогового напряжения.

Закключение. В статье представлены результаты разработки и исследования интегральных выпрямителей-умножителей напряжения, предназначенных для использования в беспроводных пассивных микроустройствах в качестве компонента источника питания. Выполнено аналитическое сравнение умножителей различной формы реализации и показано, что интегральное исполнение по типовым технологиям позволяет достигать высоких значений показателя качества при относительно небольших затратах (в условиях крупносерийного производства).

Рассмотрены особенности проектирования умножителей в САПР Cadence, на примере трех построенных умножителей проанализировано влияние, оказываемое величиной входного сигнала, пороговым напряжением МОП-транзисторов, числом каскадов на уровень получаемого выходного напряжения и эффективность умножения напряжения. Показано, что при реализации умножителей по технологии HCMOS8D 180 нм необходимый для работы уровень напряжения 2 В достигается в случае восьмикаскадного умножителя при 375 мВ, а в случае шестнадцатикаскадного - при 300 мВ.

Работа выполнена в рамках проекта «Разработка и исследование методов и средств мониторинга, диагностики и прогнозирования состояния инженерных объектов на основе искусственного интеллекта» (задание № FENW-2020-0022).

Производство интегральной микросхемы было выполнено за счет средств Минобрнауки России в рамках федерального проекта «Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности» по гос. заданию на выполнение научно-исследовательской работы «Разработка методики прототипирования электронной компонентной базы на отечественных микроэлектронных производствах на основе сервиса MPW (FSMR-2023-0008).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Guler U., Jia Y., Ghovanloo M. A Reconfigurable Passive Voltage Multiplier for Wireless Mobile IoT Applications // IEEE Transactions on Circuits and Systems – II: Express Briefs. – 2020. – Vol. 67, No. 4. – P. 615-619.
2. Chun A.C.C., Ramiah H., Mekhilef S. Wide Power Dynamic Range CMOS RF-DC Rectifier for RF Energy Harvesting System: A Review // IEEE Access. – 2022. – Vol. 10. – P. 23948-23963.
3. Li P. et al. RF Energy Harvesting for Batteryless and Maintenance-Free Condition Monitoring of Railway Tracks // IEEE Internet of Things Journal. – 2021. – Vol. 8, No. 5. – P. 3512-3523.
4. Le E.K.F. A Voltage Doubling Passive Rectifier/Regulator Circuit for Biomedical Implants // 2015 IEEE Custom Integrated Circuits Conference. – IEEE, 2015. – P. 1-4.
5. Tang K. et al. A Highly Integrated Passive Wireless Sensing System With Synchronized Data Streaming of Multiple Tags // IEEE Internet of Things Journal. – 2022. – Vol. 9, No. 17. – P. 15525-15537.
6. Malik H, Alzarrad A., Shakshuki E. Payload Assisted Unmanned Aerial Vehicle Structural Health Monitoring (UAVSHM) for Active Damage Detection // Procedia Computer Science. – 2022. – Vol. 210. – P. 78-85.
7. Dickson J.F. On-Chip High-Voltage Generation in MNOS Integrated Circuits Using an Improved Multiplier Technique // IEEE Journal of Solid-state Circuits. – 1976. – Vol. SC-11, No. 3. – P. 374-378.
8. Curty J.-P. et al. Remotely Powered Addressable UHF RFID Integrated System // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2005. – Vol. 40, No. 11. – P. 2193-2202.

9. Hong Y. et al. Design of Passive UHF RFID Tag in 130nm CMOS Technology // 2008 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems. – IEEE, 2008. – P. 1371-1374.
10. Teh Y.-K. et al. Design and Analysis of UHF Micropower CMOS DTMOST Rectifiers // IEEE Transactions on Circuits and Systems - II: Express Briefs. – 2009. – Vol. 56, No. 2. – P. 122-126.
11. Yao Y. et al. A Fully Integrated 900-MHz Passive RFID Transponder Front End With Novel Zero-Threshold RF-DC Rectifier // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2009. – Vol. 56, № 7. – P.2317-2325.
12. Fahsyar P.N.A., Soin N. A Proposed Low Power Voltage Multiplier for Passive UHF RFID Transponder // 2010 IEEE International Conference on Semiconductor Electronics. – IEEE, 2010. – P. 334-337.
13. Yao W. et al. Design of a passive UHF RFID tag for the ISO18000-6C protocol // Journal of Semiconductors. – 2011. – Vol. 32, No. 5. – Article 055009. – P. 1-6.
14. Mabrouki A., Latrach M., Lorrain V. High Efficiency Low Power Rectifier Design using Zero Bias Schottky Diodes // 2014 IEEE Faible Tension Faible Consommation. – IEEE, 2014. – P. 1-4.
15. Nicot J., Taris T. Remote RF Powering of Ambient Sensors // 2016 IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems. – IEEE, 2016. – P. 760-763.
16. Wang X., Abdelatty O., Mortazawi A. Design of a Wide Dynamic Range Rectifier Array with an Adaptive Power Distribution Technique // 2016 46th European Microwave Conference. – IEEE, 2016. – P. 922-925.
17. Sinyukin A.S., Kovalev A.V. Method for the Iterative Refinement of Parameter Values in Analytical Models of Microelectronic Devices Based on Integrated MOS Transistors // Russian Microelectronics. – 2022. – Vol. 51, No. 6. – P. 398-403.
18. Технологии – Сайт группы компаний «Микрон». – <https://www.mikron.ru/capabilities/technology>.
19. 0.18-micron Technology – TSMC Official Website. – https://www.tsmc.com/english/dedicatedFoundry/technology/logic/l_018micron.
20. Sinyukin A.S., Konoplev B.G. Integrated CMOS Microwave Power Converter for Passive Wireless Devices // Russian Microelectronics. – 2021. – Vol. 50, No. 3. – P. 219-227.

REFERENCES

1. Guler U., Jia Y., Ghovanloo M. A Reconfigurable Passive Voltage Multiplier for Wireless Mobile IoT Applications, *IEEE Transactions on Circuits and Systems - II: Express Briefs*, 2020, Vol. 67, No. 4, pp. 615-619.
2. Chun A.C.C., Ramiah H., Mekhilef S. Wide Power Dynamic Range CMOS RF-DC Rectifier for RF Energy Harvesting System: A Review, *IEEE Access*, 2022, Vol. 10, pp. 23948-23963.
3. Li P. et al. RF Energy Harvesting for Batteryless and Maintenance-Free Condition Monitoring of Railway Tracks, *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, Vol. 8, No. 5, pp. 3512-3523.
4. Le E.K.F. A Voltage Doubling Passive Rectifier/Regulator Circuit for Biomedical Implants, *2015 IEEE Custom Integrated Circuits Conference*. IEEE, 2015, pp. 1-4.
5. Tang K. et al. A Highly Integrated Passive Wireless Sensing System With Synchronized Data Streaming of Multiple Tags, *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, Vol. 9, No. 17, pp. 15525-15537.
6. Malik H, Alzarrad A., Shakshuki E. Payload Assisted Unmanned Aerial Vehicle Structural Health Monitoring (UAVSHM) for Active Damage Detection, *Procedia Computer Science*, 2022, Vol. 210, pp. 78-85.
7. Dickson J.F. On-Chip High-Voltage Generation in MNOS Integrated Circuits Using an Improved Multiplier Technique, *IEEE Journal of Solid-state Circuits*, 1976, Vol. SC-11, No. 3, pp. 374-378.
8. Curty J.-P. et al. Remotely Powered Addressable UHF RFID Integrated System, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2005, Vol. 40, No. 11, pp. 2193-2202.
9. Hong Y. et al. Design of Passive UHF RFID Tag in 130nm CMOS Technology, *2008 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems*. IEEE, 2008, pp. 1371-1374.
10. Teh Y.-K. et al. Design and Analysis of UHF Micropower CMOS DTMOST Rectifiers, *IEEE Transactions on Circuits and Systems - II: Express Briefs*, 2009, Vol. 56, No. 2, pp. 122-126.

11. Yao Y. *et al.* A Fully Integrated 900-MHz Passive RFID Transponder Front End With Novel Zero-Threshold RF-DC Rectifier, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, Vol. 56, No. 7, pp.2317-2325.
12. Fahsyar P.N.A., Soin N. A Proposed Low Power Voltage Multiplier for Passive UHF RFID Transponder, *2010 IEEE International Conference on Semiconductor Electronics*. IEEE, 2010, pp. 334-337.
13. Yao W. *et al.* Design of a passive UHF RFID tag for the ISO18000-6C protocol, *Journal of Semiconductors*, 2011, Vol. 32, No. 5, Article 055009, pp. 1-6.
14. Mabrouki A., Latrach M., Lorrain V. High Efficiency Low Power Rectifier Design using Zero Bias Schottky Diodes, *2014 IEEE Faible Tension Faible Consommation*. IEEE, 2014, pp. 1-4.
15. Nicot J., Taris T. Remote RF Powering of Ambient Sensors, *2016 IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems*. IEEE, 2016, pp. 760-763.
16. Wang X., Abdelatty O., Mortazawi A. Design of a Wide Dynamic Range Rectifier Array with an Adaptive Power Distribution Technique, *2016 46th European Microwave Conference*. IEEE, 2016, pp. 922-925.
17. Sinyukin A.S., Kovalev A.V. Method for the Iterative Refinement of Parameter Values in Analytical Models of Microelectronic Devices Based on Integrated MOS Transistors, *Russian Microelectronics*, 2022, Vol. 51, No. 6, pp. 398-403.
18. Tekhnologii – Sayt gruppy kompaniy «Mikron» [Technologies – Website of the Micron group of companies]. Available at: <https://www.mikron.ru/capabilities/technology>.
19. 0.18-micron Technology – TSMC Official Website. Available at: https://www.tsmc.com/english/dedicatedFoundry/technology/logic/l_018micron.
20. Sinyukin A.S., Konoplev B.G. Integrated CMOS Microwave Power Converter for Passive Wireless Devices, *Russian Microelectronics*, 2021, Vol. 50, No. 3, pp. 219-227.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. В.В. Лосев.

Синюкин Александр Сергеевич – Южный федеральный университет, e-mail: sinyukin@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; к.т.н.; старший научный сотрудник Дизайн-центра микроэлектронной компонентной базы для систем искусственного интеллекта.

Коноплев Борис Георгиевич – e-mail: kgb@sfedu.ru; д.т.н.; профессор; научный руководитель Института нанотехнологий, электроники и приборостроения.

Ковалев Андрей Владимирович – e-mail: avkovalev@sfedu.ru; д.т.н.; доцент; руководитель Дизайн-центра микроэлектронной компонентной базы для систем искусственного интеллекта.

Sinyukin Alexander Sergeyevich – Southern Federal University; e-mail: sinyukin@sfedu.ru; Taganrog, Russia; cand. eng. sc.; senior scientific researcher, Design Center of Microelectronic Component Base for Artificial Intelligence Systems.

Konoplev Boris Georgievich – e-mail: kgb@sfedu.ru; dr. eng. sc.; professor; scientific advisor, Institute of Nanotechnologies, Electronics and Equipment Engineering.

Kovalev Andrey Vladimirovich – e-mail: avkovalev@sfedu.ru; dr. eng. sci., associate professor; director, Design Center of Microelectronic Component Base for Artificial Intelligence Systems.

О.В. Дворников, В.А. Чеховский, Н.Н. Прокопенко, А.В. Кунц, В.Е. Чумаков

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДВУХ- И ОДНОКАСКАДНЫХ ВJT-JFET
ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ***

Рассмотрены операционные усилители с разным количеством усилительных каскадов, реализованные на комплементарных биполярных транзисторах и входных полевых транзисторах, с управляющим р-п-переходом. Для элементов базового матричного кристалла МН2ХА031 приведены оригинальные электрические схемы трех вариантов усилителей (ОАmp11.3, ОАmp12, ОАmp14), содержащих одинаковый блок смещения статического режима и выходной каскад. Схема ОАmp11.3 содержит входной дифференциальный каскад в виде «перегнутого» каскода на р-JFET и промежуточный усилительный каскад на биполярных транзисторах. Операционный усилитель ОАmp12 включает входной сдвоенный истоковый повторитель на р-JFET и «перегнутый» каскод на комплементарных биполярных транзисторах. Схема ОАmp14 реализована на основе сдвоенных истоковых повторителей на р-JFET и высокоточном преобразователе напряжение-ток на комплементарных биполярных транзисторах в промежуточных каскадах. Представленные электрические схемы характеризуются малым напряжением смещения нуля, сравнительно большим коэффициентом усиления по напряжению и могут использоваться для применения в аппаратуре специального и двойного назначения. При проектировании ОУ на базовом матричном кристалле МН2ХА031 проводился поиск компромиссного сочетания входного тока, уровня шумов и коэффициента усиления по напряжению, причем особое внимание уделялось выбору режима работы входных JFET. Исследованы возможности создания схем с одним усилительным каскадом, которые обычно обеспечивают меньший уровень шумов, простую частотную коррекцию и большую полосу пропускания. Для адекватного сравнения разработанных усилителей выполнено моделирование их статических и динамических параметров при одинаковом рабочем режиме идентичных по назначению схемных элементов, что позволило сформулировать рекомендации по схемотехническому синтезу операционных усилителей в зависимости от требуемого сочетания параметров. При оптимизации режима работы транзисторов «перегнутого» каскода с входными JFET были использованы рекомендации, заключающиеся в необходимости увеличения крутизны входных JFET транзисторов и падения напряжения на эмиттерных резисторах источников опорного тока.

Операционный усилитель; полевые транзисторы; управляемые р-п-переходом; базовый матричный кристалл; «перегнутый» каскод.

O.V. Dvornikov, V.A. Tchekhovski, N.N. Prokopenko, A.V. Kunts, V.E. Chumakov

**COMPARATIVE ANALYSIS OF TWO- AND SINGLE-STAGE BJT-JFET
OPERATIONAL AMPLIFIERS**

Operational amplifiers with different number of amplifying stages realized on complementary bipolar transistors and input field-effect transistors, with control p-n junction are considered. For the elements of the master slice array МН2ХА031 the original electrical schematics of three amplifier variants (OАmp11.3, OАmp12, OАmp14) containing the same static mode bias block and output stage are given. The OАmp11.3 circuit contains an input differential stage in the form of a "folded" cascode on p-JFETs and an intermediate amplifier stage on bipolar transistors. The operational amplifier OАmp12 includes an input dual source-repeater on p-JFETs and an "folded" cascode on complementary bipolar transistors. The OАmp14 circuit is realized on the basis of dual source repeaters on p-JFETs and a high-precision voltage-to-current converter on complementary bipolar transistors in the intermediate stages. The presented electrical circuits are characterized by low zero offset voltage, relatively high voltage gain and can be used for application in

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-29-00637).

special and dual-purpose equipment. When designing the Op-Amp circuits on the master slice array MH2XA031 the search for a compromise combination of input current, noise level and voltage gain was carried out, and special attention was paid to the choice of the operating mode of the input JFETs. Single amplifier stage circuits, which typically provide lower noise, simple frequency correction, and larger bandwidth, were investigated. For an adequate comparison of the developed amplifiers the modeling of their static and dynamic parameters at the same operating mode of identical circuit elements has been performed, which allowed to formulate recommendations on circuit synthesis of operational amplifiers depending on the required combination of parameters. When optimizing the operating mode of the transistors of the "folded" cascode with input JFETs, the recommendations consisting in the necessity to increase the steepness of the input JFET transistors and the voltage drop across the emitter resistors of the reference current sources were used.

Operational amplifier; junction field effect transistors; JFET-input operational amplifier; master slice array; folded cascode.

Введение. Для применения в аппаратуре специального и двойного назначения на комплементарных биполярных транзисторах (Bipolar Junction Transistor, BJT) базового матричного кристалла (БМК) MH2XA031 [1–2] разработан прецизионный операционный усилитель (ОУ) OAmpl0, который характеризуется малым напряжением смещения нуля V_{OFF} и большим коэффициентом усиления напряжения K_V [3]. Использование в OAmpl0 входных n - p - n -транзисторов и обеспечение их высокой крутизны за счет большого эмиттерного тока привело к тому, что входной ток I_{IN} OAmpl0 составляет единицы микроампер, что недопустимо для некоторых применений [4] и, таким образом, интерес представляет модернизация OAmpl0 или разработка на БМК MH2XA031 нового ОУ, сочетающего малые V_{OFF} , I_{IN} и высокий K_V .

Известно, что возможно десятикратное и более уменьшение входного тока ОУ при помощи схем компенсации [5]. Однако входной ток на уровне десятков наноампер не допустим при работе с высокоомными источниками входного сигнала и поэтому для обеспечения пикоамперных входных токов применяют ОУ с входными полевыми транзисторами (Field Effect Transistors, FET) [6–15].

Несмотря на то, что FET со структурой металл-диэлектрик-полупроводник имеют меньший ток утечки затвора, чем FET, управляемые p - n -переходом (Junction Field Effect Transistors, JFET), последние чаще применяются во входных каскадах BJT-JFET ОУ из-за меньшего уровня фликкер-шумов.

Дополнительное уменьшение входного тока в BJT-JFET ОУ можно достичь путем применения:

- ◆ входных JFET с малой площадью затвора;
- ◆ интегральных двухзатворных JFET, в которых ток утечки по верхнему затвору почти в 10 раз меньше, чем по нижнему [16];
- ◆ следящих обратных связей (ОС), фиксирующих напряжение сток-исток JFET на малом уровне [5, 17, 18];
- ◆ режима работы JFET с обратносмещенным переходом затвор-сток и прямосмещенным переходом затвор-исток, при котором достигается компенсация тока, протекающего через затвор.

К сожалению, указанные способы приводят к уменьшению крутизны входных JFET и росту спектральной плотности напряжения шума e_N , отнесенной ко входу ОУ.

Так, применение на входе OAmpl0 истокового повторителя на двухзатворных p -JFET с разным соединением нижнего затвора обеспечило уменьшение входного тока в модернизированных усилителях OAmpl0J.1 и OAmpl0J.2 до 9,9 пА и 6,2 пА, но соответственно привело к росту e_N в 3,9 и 10,7 раз по сравнению с OAmpl0 [19].

Таким образом, при проектировании ВЈТ-ЈFЕТ ОУ необходим поиск компромиссного сочетания входного тока, уровня шумов и коэффициента усиления напряжения, причем особое внимание целесообразно уделить выбору режима работы входных ЈFЕТ и изучению возможности создания схем с одним усилительным каскадом [20–21], которые обычно обеспечивают меньший уровень шумов, простую частотную коррекцию и большую полосу пропускания [17].

Целью настоящей работы является сравнительный анализ реализованных на БМК МН2ХА031 трех вариантов ВЈТ-ЈFЕТ ОУ, имеющих одинаковый блок смещения и выходной каскад, одинаковый рабочий режим идентичных по назначению схемных элементов и отличающихся только количеством и схемотехникой усилительных каскадов, что позволит сформулировать рекомендации по схемотехническому синтезу ОУ в зависимости от требуемого сочетания параметров.

1. Электрические схемы ВЈТ-ЈFЕТ ОУ. Разработанные для программного обеспечения LTSpice электрические схемы ОУ приведены на рис. 1-3. Указанные на схемах сопротивления резисторов получены последовательно-параллельным соединением имеющихся на БМК МН2ХА031 резисторов с сопротивлением 1,05 кОм и 2,45 кОм. Все ОУ содержат одинаковый блок смещения и выходной каскад, а также двухзатворные ЈFЕТ с каналом *p*-типа и соединенными верхним и нижним затвором. Последнее объясняется тем, что на БМК МН2ХА031 имеются только малосигнальные *p*-ЈFЕТ с малой крутизной и двухзатворные *p*-ЈFЕТ, максимальное значение крутизны которых обеспечивается при соединении верхнего и нижнего затворов и превышает более, чем в 10 раз крутизну малосигнальных *p*-ЈFЕТ.

Блок смещения реализован на повторителях тока на *p*-*n*-*p*-транзисторах (X1, X2, X13, X14), *n*-*p*-*n*-транзисторах (X11, X12, X16, X17) и ЈFЕТ источнике тока X15, R18.

Известно, что для ЈFЕТ существует напряжение затвор-исток V_{GS} , при котором температурное изменение тока стока I_D минимально, т.е. $\Delta I_D / \Delta T \approx 0$ при $V_{GS} = V_{ZTC}$. Абсолютная величина напряжения $|V_{ZTC}|$ чаще всего на 0,66 В меньше напряжения отсечки $|V_{TH}|$ [5]. При разработке схем более удобно задавать термостабильный режим работы ЈFЕТ выбором величины тока стока I_{ZTC} , соответствующего V_{ZTC} . Обычно полагают, что $I_{ZTC} \approx 0,2 \cdot I_{D_{MAX}}$ [17], где $I_{D_{MAX}} = I_D$ при $V_{GS} = 0$, $V_{DS} = V_{TH}$. Сопротивление резистора R8 выбрано для обеспечения тока стока X15 около 120 мкА. Как следует из рис. 4, установленная величина тока стока X15 очень близка к термостабильному значению тока стока применяемого ЈFЕТ, для которого $V_{TH} \approx 1,8$ В, $V_{ZTC} = 1,273$ В, $I_{ZTC} \approx 135$ мкА.

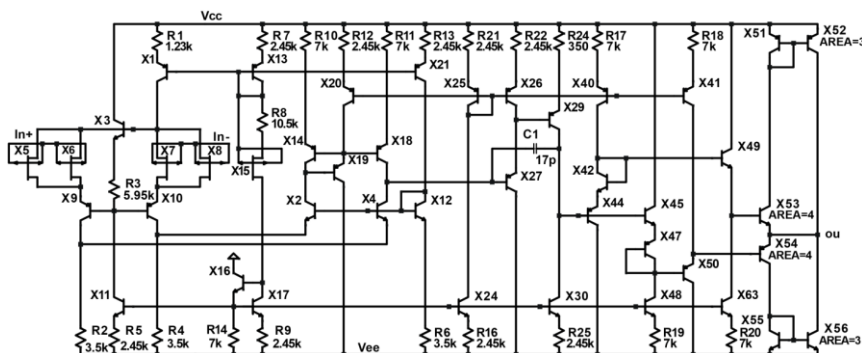


Рис. 1. Электрическая схема ОАmp11.3

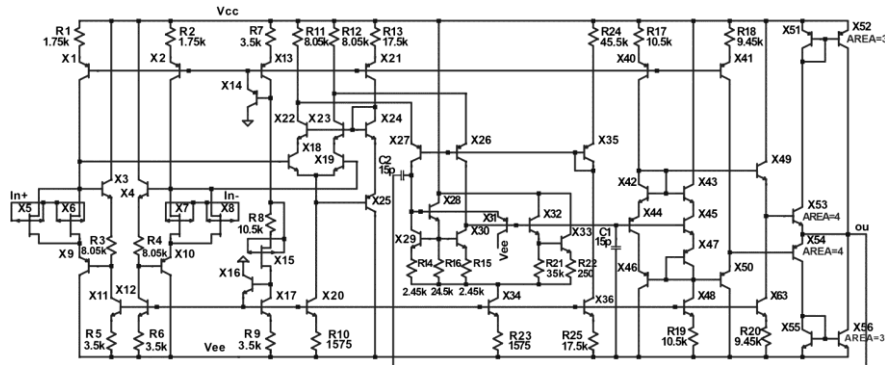


Рис. 2. Электрическая схема OAmpl2

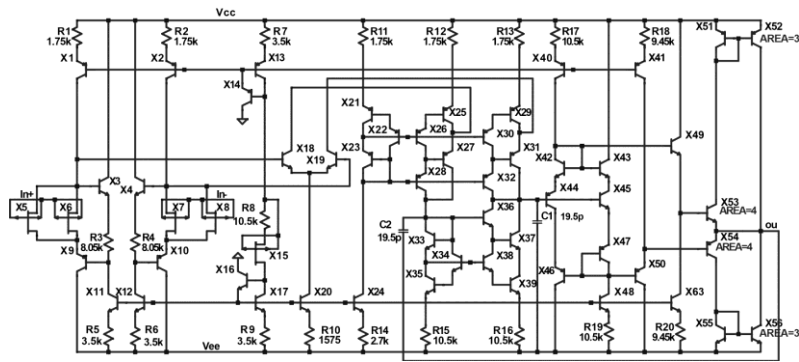


Рис. 3. Электрическая схема OAmpl4

Выходной каскад представляет собой последовательное соединением трех эмиттерных повторителей на комплементарных BJT: X44 и X45, X49 и X50, X53 и X54. Дополнительно с выходом ОУ соединены выходы повторители тока X51 и X52, X55 и X56. Площадь эмиттерных переходов транзисторов X53 и X54 в 4 раза, а X56 и X52 в 3 раза больше площади эмиттерных переходов остальных n - p - и p - n -транзисторов схемы соответственно. Повторители тока выходного каскада увеличивают запас по фазе ОУ при работе на емкостную нагрузку, но одновременно увеличивают ток потребления в режиме холостого хода на 680 мкА, что составляет около 28% суммарного тока потребления всего ОУ. По указанной причине при работе на резистивную нагрузку повторители тока X51 и X52, X55 и X56 могут быть удалены.

В выходном каскаде усилителей OAmpl2 (рис. 2) и OAmpl4 (рис. 3) применена следящая ОС на транзисторах X43 и X46, поддерживающая постоянное напряжение на коллекторных переходах транзисторов X45 и X44 соответственно, что одновременно увеличивает входное малосигнальное сопротивление выходного каскада и позволяет значительно уменьшить его входной ток при суммировании разнонаправленных базовых токов транзисторов X44 и X45 при изменении выходного напряжения ОУ.

Такая следящая ОС применена только в ОУ OAmpl2, OAmpl4, в которых все усиление обеспечивается одним усилительным каскадом.

На входе ОУ OAmpl2, OAmpl4 расположены два истоковых повторителя, в которых применены параллельное соединение p -JFET (X5, X6 и X7, X8) для увеличения крутизны и следящая ОС на X3, R3, X9 (X4, R4, X10), устанавливающая

постоянное напряжение исток-сток входных p -JFET. Выбирая сопротивление резисторов R3 и R4 можно обеспечить малое падение напряжения исток-сток входных p -JFET и, следовательно, малый входной ток ОУ, однако при этом уменьшается крутизна p -JFET и растет спектральная плотность напряжения шума, отнесенной ко входу ОУ.

Входной каскад ОУ OAmpl1.3 (рис. 1) очень похож на каскады рис. 2, 3. Однако он является дифференциальным, так как истоки X5, X6, X7, X8 соединены с источником тока на X1, а выходной сигнал снимается с резистивных нагрузок R2, R4, по которым протекает ток стока входных p -JFET.

Таким образом, основным отличием всех разработанных ОУ является количество и схемотехника усилительных каскадов.

В ОУ OAmpl1.3 входной каскад совместно с транзисторами с общей базой X2, X4 и нагрузкой в виде повторителя тока X14, X18, X19 образует «перегнутый» каскод, выходной сигнал которого через эмиттерный повторитель на X27 поступает на второй усилительный каскад на X29, X30 [23]. Особенности OAmpl1.3 являются:

- ♦ минимизация напряжения смещения нуля ОУ путем полной схемной симметрии нагрузок входных JFET и транзисторов X2, X4, а именно, цепи, соединенные с коллекторами X2 (X14, X19, X20) и X4 (X18, X25, X27), содержат одинаковые схемные элементы, работающие при одинаковом токе;
- ♦ сопротивления резисторов выбраны таким образом, что эмиттерные токи источников тока усилительных каскадов (за исключением X1) составляют около 120 мкА, и падение напряжения на этих резисторах около 300 мВ;
- ♦ коррекция амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), обеспечивающая требуемый запас по фазе при частоте единичного усиления, обеспечивается использованием эффекта Миллера во втором каскаде, т.е. емкостной ОС на конденсаторе C1 между входом и выходом инвертирующего усилительного каскада.

При оптимизации режима работы транзисторов «перегнутого» каскода с входными JFET были использованы рекомендации, выработанные ранее для уменьшения шумов, заключающиеся в необходимости увеличения крутизны входных JFET и падения напряжения на эмиттерных резисторах источников тока, увеличения отношения токов I_{D5}/I_{C4} (I_{D7}/I_{C2}), замены транзисторных источников тока, соединенных с эмиттерами X2, X4, на резисторы R2, R4 с максимально возможным сопротивлением [25].

Единственный усилительный каскад ОУ OAmpl12 (рис. 2) выполнен по схеме «перегнутого» каскода с входными n - p - n -транзисторами X18, X19, p - n - p -транзисторами X26, X27, включенными по схеме с общей базой, и активной нагрузкой в виде повторителя тока на X28-X30 [25]. В нем применены две цепи следящей ОС:

- ♦ X22-X25 стабилизирует коллекторное напряжение транзисторов X18, X19;
- ♦ X31-X34 стабилизирует коллекторное напряжение транзисторов X29, X30 активной нагрузки, что обеспечивает крайне высокое значение их выходного малосигнального сопротивления, увеличивает K_V и уменьшает V_{OFF} .

В однокаскадных ОУ затруднительно применить эффект Миллера для коррекции АЧХ, поэтому требуемый запас по фазе обеспечивают два одинаковых по номиналу конденсатора C1 и C2, соединенных с коллекторами транзисторов X29, X30 активной нагрузки.

В качестве усилительного каскада OAmpl14 (рис. 3) использован преобразователь напряжение-ток, содержащий дифференциальный каскад с входными n - p - n -транзисторами X18, X19, источники тока X25-X28, X29-X32 и высокоточный повторитель тока X33-X39, подробно рассмотренные в [17]. Коррекция АЧХ выполнена способом аналогичным усилителю OAmpl12.

2. Анализ результатов моделирования. Целью параметрической оптимизации разработанных ОУ было обеспечение $V_{OFF} < 100$ мкВ, $I_{IN} < 50$ пА, $K_V > 10^5$, $e_N < 10$ нВ/Гц^{0,5} при минимальном токе потребления.

Для адекватного сравнения разработанных усилителей выполнено моделирование их статических и динамических параметров при одинаковом рабочем режиме идентичных по назначению схемных элементов, выбранном для получения одинакового тока потребления. Так, при токе потребления всех ОУ около $2,42 \pm 5\%$ мА, коллекторные токи транзисторов, перезаряжающих корректирующие емкости, составили $24 \pm 3\%$ мкА, входной ток выходного каскада (сумма базовых токов Х44 и Х45) – от 35 до 64 нА, суммарный ток потребления выходного каскада (сумма коллекторного тока Х52 и эмиттерного тока Х53) в режиме холостого хода – $0,87 \pm 1\%$ мА. Кроме того, выбор корректирующих конденсаторов позволил достичь одинаковый запас по фазе всех ОУ в $48,8 \pm 1\%$ градус.

Результаты схемотехнического моделирования температурных зависимостей и основных параметров приведены на рис. 4-5 и табл. 1.

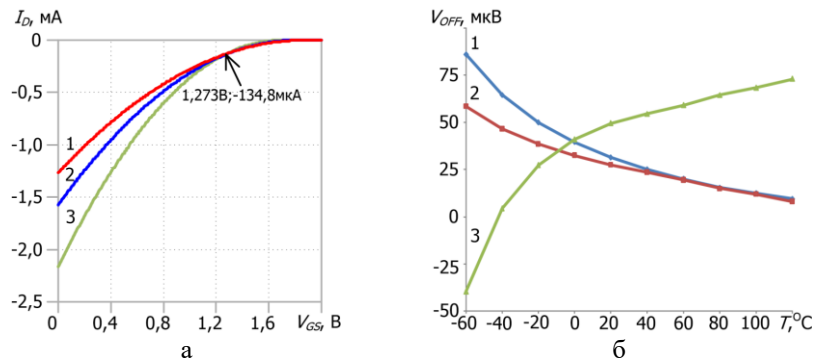


Рис. 4. Зависимость тока стока I_D от напряжения затвор-исток V_{GS} двухзатворного р-JFET с соединенными затворами при разных температурах T : 1 – $T = 90^\circ\text{C}$; 2 – $T = 30^\circ\text{C}$; 3 – $T = -60^\circ\text{C}$ (а), зависимость напряжения смещения нуля V_{OFF} от температуры t : 1 – OAmp12, 2 – OAmp14, 3 – OAmp11.3 (б)

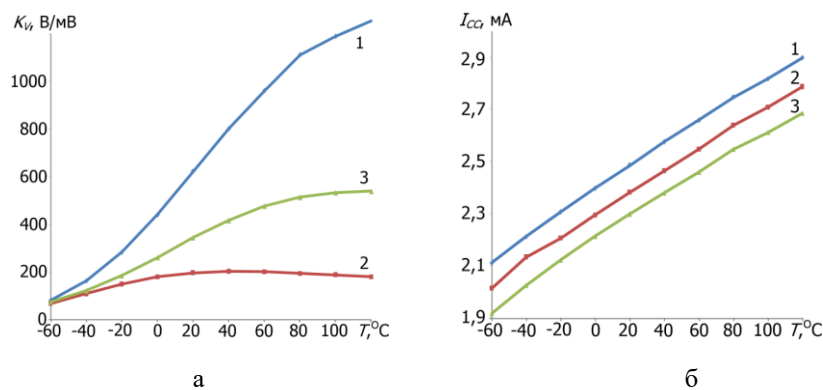


Рис. 5. Зависимость коэффициента усиления напряжения K_V от температуры t : 1 – OAmp12, 2 – OAmp14, 3 – OAmp11.3 (а), зависимость тока потребления в режиме холостого хода I_{CC} от температуры t : 1 – OAmp12, 2 – OAmp14, 3 – OAmp11.3 (б)

Таблица 1

**Результаты схемотехнического моделирования операционных усилителей
при $t=30^{\circ}\text{C}$**

Наименование ОУ	OAmp11.3	OAmp12	OAmp14
Напряжение питания, В	–5/5	–5/5	–5/5
Ток потребления в режиме холостого хода, мА	2,33	2,52	2,41
Напряжение смещения нуля *, мкВ	51,5	29,0	26,0
Коэффициент усиления напряжения *	$3,7 \cdot 10^5$	$6,9 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$
Диапазон выходного напряжения *, В	–3,13...3,22	–2,97...3,01	–2,99...3,0
Входной ток при допустимом входном синфазном напряжении, пА	12,6...34,7	11,7...32,7	11,4...32,7
Частота единичного усиления **, МГц	3,5	15,1	13,4
Запас по фазе при частоте единичного усиления **, град	48,7	49,1	48,6
Спектральная плотность напряжения шума, отнесенная ко входу при $f=1$ кГц, нВ/Гц ^{0,5}	8,98	7,67	8,06
Примечание. * - $R_{LOAD}=100$ Ом; ** - $R_{LOAD}=1$ МОм, $C_{LOAD}=10$ пФ			

Анализ результатов моделирования позволяет сделать следующие выводы:

1. Все разработанные усилители удовлетворяют требованиям по статическим параметрам и уровню шумов: $V_{OFF}<100$ мкВ, $I_{IN}<50$ пА, $K_V>10^5$, $e_N<10$ нВ/Гц^{0,5} при $f=1$ кГц.

2. Однокаскадный ОУ OAmp14 на основе высокоточного преобразователя напряжение-ток характеризуется минимальным температурным изменением коэффициента усиления и напряжения смещения нуля, в то время как OAmp12 имеет максимальное усиление в нормальных условиях.

3. Частота единичного усиления однокаскадных ОУ OAmp12, OAmp14 почти в 4 раза превышает значение для двухкаскадного ОУ OAmp11.3 при том же токе потребления и запасе по фазе.

4. Сравнение ОУ OAmp12 с предыдущей версией близкого по схемотехнике усилителя OAmp10J.1 показывает, что возможно уменьшение шума в 1,8 раза и увеличение быстродействия в 2,9 раза за счет увеличения в 4,5 раза тока потребления. По указанной причине необходимо четко формулировать приоритеты для параметрической оптимизации ОУ.

Заключение. Для элементов БМК МН2ХА031 разработано несколько схем ОУ с входными p -JFET, содержащие одинаковый блок смещения и выходной каскад и отличающиеся количеством усилительных каскадов и их схемотехникой. В двухкаскадном ОУ OAmp11.3 требуемое усиление обеспечивается за счет применения входного дифференциальный каскада в виде «перегнутого» каскада на p -JFET и усилительного каскада на биполярных транзисторах, в однокаскадном OAmp12 – использования «перегнутого» каскада на комплементарных биполярных транзисторах, в однокаскадном OAmp14 – применения высокоточного преобразователя напряжение-ток на комплементарных биполярных транзисторах, причем малый входной ток OAmp12, OAmp14 обусловлен расположением на их входах сдвоенных истоковых повторителей на p -JFET.

Все разработанные усилители обеспечивают высокий уровень статических параметров и малые шумы: $V_{OFF} < 100$ мкВ, $I_{IN} < 50$ пА, $K_V > 10^5$, $e_N < 10$ нВ/Гц^{0.5} при $f = 1$ кГц и токе потребления около $2,42 \pm 5\%$ мА. В то же время частота единичного усиления однокаскадных ОУ ОАmp12, ОАmp14 почти в 4 раза превышает значение для двухкаскадного ОУ ОАmp11.3 при том же токе потребления и запасе по фазе.

Так как на уровень шумов и быстродействие однокаскадных ОУ значительно влияет их ток потребления, то необходимо четко формулировать приоритеты для параметрической оптимизации ОУ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дворников О.В., Чеховский В.А., Прокопенко Н.Н., Галкин Я.Д., Кунц А.В., Чумаков В.Е. Проектирование аналоговых микросхем для экстремальных условий эксплуатации на основе базового матричного кристалла МН2ХА031 // Проблемы разработки перспективных микро и наноэлектронных систем (МЭС). – 2021. – №. 2. – С. 37-46.
2. Prokopenko N.N., Dvornikov O.V., Zhuk A.A. A Family of High-Speed Voltage Repeaters and Output Stages of Analog Chips Based on Radiation-Resistant Analog Master Slice Array Crystals МН2ХА030/031 // 2023 25th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA). IEEE, 2023. – P. 1-5.
3. Дворников О.В., Чеховский В.А., Прокопенко Н.Н., Галкин Я.Д., Кунц А.В., Чумаков В.Е. Быстродействующие широкополосные операционные усилители на базовом матричном кристалле // Известия вузов. Электроника. – 2023. – Т. 28, № 1. – С. 96-111.
4. Carter B., Mancini R. Op Amps for Everyone. – 5th ed. – Elsevier. Newnes, 2017. – 486 p. – ISBN: 978-0-12-811648-7.
5. Dostal J. Operational Amplifier // Studies in electrical and electronic engineering 4. – Elsevier. 1981. – 488 p.
6. Tsegaye Menberu Genzebu. Design of High Gain and High Slew Rate Two-Stage CMOS Operational Amplifier for Medical Instrumentation // PREPRINT (Version 1) available at Research Square. July 2023. – 13 p.
7. Wyers E.J. Accurate Geometric Programming-Compatible Slew Rate Modeling for Two-Stage Operational Amplifier Design Optimization // IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS). Shenzhen, China, 2022. – P. 185-189. – DOI: 10.1109/APCCAS55924.2022.10090335.
8. Sivakumari K., Srinivasulu A., Venkata Reddy V. A high slew rate, low voltage CMOS class-AB amplifier // International Conference on Applied Electronics. Czech Republic. – 2014. – P. 267-270. – DOI: 10.1109/AE.2014.7011717.
9. Tripathy D., Bhadra P. A High Speed Two Stage Operational Amplifier with High CMRR // 3rd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT). Bangalore, India, 2018. – P. 255-259. – DOI: 10.1109/RTEICT42901.2018.9012268.
10. Yavari M., Maghari N., Shaoei O. An accurate analysis of slew rate for two-stage CMOS opamps // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. – 2005. – Vol. 52, No. 3. – P. 164-167. – DOI: 10.1109/TCSII.2004.842058.
11. Parthipan A., Krishna K.L., Kumar V.N., Hareesh C., Raviteja B. and Varshath C.V. A High Performance CMOS Operational Amplifier // 3rd International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC). Erode, India, 2019. – P. 702-706. – DOI: 10.1109/ICCMC.2019.8819641.
12. Kavyashree C.L., Hemambika M., Dharani K., Naik A.V. and Sunil M.P. Design and implementation of two stage CMOS operational amplifier using 90nm technology // International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC). Coimbatore, India, 2017. – P. 1-4. – DOI: 10.1109/ICISC.2017.8068601.
13. Snoei M.F., Ivanov M.V. A 36V JFET-input bipolar operational amplifier with $1\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ maximum offset drift and -126dB total harmonic distortion // IEEE International Solid-State Circuits Conference. San Francisco, USA, 2011. – P. 248-250. – DOI: 10.1109/ISSCC.2011.5746305.
14. Davis W. and Vyne R. A monolithic P-channel JFET QUAD operational amplifier // IEEE International Solid-State Circuits Conference. Digest of Technical Papers. San Francisco, USA. 1984. – P. 288-289. – DOI: 10.1109/ISSCC.1984.1156588.

15. Snoeijs M. A 36V 48MHz JFET-Input Bipolar Operational Amplifier with 150 μ V Maximum Offset and Overload Supply Current Control // ESSCIRC 2018 - IEEE 44th European Solid State Circuits Conference (ESSCIRC). Dresden, Germany, 2018. – P. 290-293. – DOI: 10.1109/ESSCIRC.2018.8494262.
16. Close J.P., Counts L.W. A 50-fA junction-isolated operational amplifier // IEEE Journal of Solid – State Circuits. – 1988. – 23 (3). – P. 843-851. – DOI: 10.1109/4.328.
17. Riemer D.W. An 10 nV/square root Hz JFET input precision operational amplifier // Proceedings on Bipolar Circuits and Technology Meeting. Minneapolis, USA, 1990. – P. 223-225. – DOI: 10.1109/BIPOL.1990.171168.
18. Полонников Д.Е. Операционные усилители. Принципы построения, теория, схемотехника. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 216 с.
19. Дворников О.В., Чеховский В.А., Галкин Я.Д., Кунц А.В. Программируемые быстродействующие операционные усилители для аппаратуры специального и двойного назначения // 10-я Международная научная конференция по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использования технологий двойного назначения: сборник научных статей, Государственный военно-промышленный комитет Республики Беларусь. – Минск: Четыре четверти, 2023. – С. 169-172.
20. Ramirez-Angulo J., Holmes M. A simple technique to significantly enhance slew rate and bandwidth of one-stage CMOS operational amplifiers // 2002 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Proceedings (Cat. No.02CH37353). Phoenix-Scottsdale, USA, 2002. – P. II-II. – DOI: 10.1109/ISCAS.2002.1011483.
21. Hoi Lee P.K.T. Mok. Single-point-detection slew-rate enhancement circuits for single-stage amplifiers // 2002 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). Phoenix-Scottsdale, USA, 2002. – P. II-II. – DOI: 10.1109/ISCAS.2002.1011482.
22. Aminzadeh H., Danaie M., Lotfi R. A low-power design methodology for single-stage operational amplifiers // International Conference on Design and Test of Integrated Systems in Nanoscale Technology. Tunis, Tunisia, 2006. – P. 62-67. – DOI: 10.1109/DTIS.2006.1708694.
23. Close Santos. A JFET input single supply operational amplifier with rail-to-rail output // 1993 Proceedings of IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting. Minneapolis, USA, 1993. – P. 149-152. – DOI: 10.1109/BIPOL.1993.617487.
24. Dvornikov O.V., Tchekhovskiy V.A., Prokopenko N.N., Pakhomov I.V. Reducing noises of high-speed Bi-JFET charge-sensitive amplifiers during schematic design // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – 862. – P. 8. – DOI:10.1088/1757-899X/862/2/022068.
25. Bowers D.F., Wurcer S.A. Recent developments in bipolar operational amplifiers // Proceedings of the 1999 Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting. – 1999. – P. 38-45. – DOI: 10.1109/BIPOL.1999.803521.

REFERENCES

1. Dvornikov O.V., Chekhovskiy V.A., Prokopenko N.N., Galkin Ya.D., Kunts A.V., Chumakov V.E. Proektirovanie analogovykh mikroskhem dlya ekstremal'nykh usloviy ekspluatatsii na osnove bazovogo matrichnogo kristalla MN2KHA031 [Designing analog microcircuits for extreme operating conditions on the master slice array crystals MH2XA031], *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro i nanoelektronnykh sistem (MES)* [Problems of development of advanced micro and nanoelectronic systems (MNS)], 2021, No. 2, pp. 37-46.
2. Prokopenko N.N., Dvornikov O.V., Zhuk A.A. A Family of High-Speed Voltage Repeaters and Output Stages of Analog Chips Based on Radiation-Resistant Analog Master Slice Array Crystals MH2XA030/031, 2023 25th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA). IEEE, 2023, pp. 1-5.
3. Dvornikov O.V., Chekhovskiy V.A., Prokopenko N.N., Galkin Ya.D., Kunts A.V., Chumakov V.E. Bystryeystvuyushchie shirokopolosnye operatsionnye usiliteli na bazovom matrichnom kristalle [Fast wide-band operational amplifiers on the master slice array], *Izvestiya vuzov. Elektronika* [Izvestiya vuzov. Electronics], 2023, Vol. 28, No. 1, pp. 96-111.
4. Carter B., Mancini R. Op Amps for Everyone. 5th ed. Elsevier. Newnes, 2017, 486 p. ISBN: 978-0-12-811648-7.
5. Dostal J. Operational Amplifier, *Studies in electrical and electronic engineering* 4. Elsevier. 1981, 488 p.

6. Tsegaye Menberu Genzebu. Design of High Gain and High Slew Rate Two-Stage CMOS Operational Amplifier for Medical Instrumentation, *PREPRINT (Version 1) available at Research Square*. July 2023, 13 p.
7. Wyers E.J. Accurate Geometric Programming-Compatible Slew Rate Modeling for Two-Stage Operational Amplifier Design Optimization, *IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS)*. Shenzhen, China, 2022, pp. 185-189. DOI: 10.1109/APCCAS55924.2022.10090335.
8. Sivakumari K., Srinivasulu A., Venkata Reddy V. A high slew rate, low voltage CMOS class-AB amplifier, *International Conference on Applied Electronics. Czech Republic*, 2014, pp. 267-270. DOI: 10.1109/AE.2014.7011717.
9. Tripathy D., Bhadra P. A High Speed Two Stage Operational Amplifier with High CMRR, *3rd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT)*. Bangalore, India, 2018, pp. 255-259. DOI: 10.1109/RTEICT42901.2018.9012268.
10. Yavari M., Maghari N., Shoaee O. An accurate analysis of slew rate for two-stage CMOS opamps, *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2005, Vol. 52, No. 3, pp. 164-167. DOI: 10.1109/TCSII.2004.842058.
11. Parthipan A., Krishna K.L., Kumar V.N., Hareesh C., Raviteja B. and Varshath C.V. A High Performance CMOS Operational Amplifier, *3rd International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)*. Erode, India, 2019, pp. 702-706. DOI: 10.1109/ICCMC.2019.8819641.
12. Kavyashree C.L., Hemambika M., Dharani K., Naik A.V. and Sunil M.P. Design and implementation of two stage CMOS operational amplifier using 90nm technology, *International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC)*. Coimbatore, India, 2017, pp. 1-4. DOI: 10.1109/ICISC.2017.8068601.
13. Snoeijs M.F., Ivanov M.V. A 36V JFET-input bipolar operational amplifier with $1\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ maximum offset drift and -126dB total harmonic distortion, *IEEE International Solid-State Circuits Conference*. San Francisco, USA, 2011, pp. 248-250. DOI: 10.1109/ISSCC.2011.5746305.
14. Davis W. and Vyne R. A monolithic P-channel JFET QUAD operational amplifier, *IEEE International Solid-State Circuits Conference. Digest of Technical Papers*. San Francisco, USA, 1984, pp. 288-289. DOI: 10.1109/ISSCC.1984.1156588.
15. Snoeijs M. A 36V 48MHz JFET-Input Bipolar Operational Amplifier with $150\mu\text{V}$ Maximum Offset and Overload Supply Current Control, *ESSCIRC 2018 - IEEE 44th European Solid State Circuits Conference (ESSCIRC)*. Dresden, Germany, 2018, pp. 290-293. DOI: 10.1109/ESSCIRC.2018.8494262.
16. Close J.P., Counts L.W. A 50-fA junction-isolated operational amplifier, *IEEE Journal of Solid – State Circuits*, 1988, 23 (3), pp. 843-851. DOI: 10.1109/4.328.
17. Riemer D.W. An $10\text{ nV/square root Hz}$ JFET input precision operational amplifier, *Proceedings on Bipolar Circuits and Technology Meeting*. Minneapolis, USA, 1990, pp. 223-225. DOI: 10.1109/BIPOL.1990.171168.
18. Polonnikov D.E. Operatsionnye usiliteli. Printsipy postroeniya, teoriya, skhemotekhnika [Operational amplifiers. Principles of construction, theory, circuitry]. Moscow: Energoatomizdat, 1983, 216 p.
19. Dvornikov O.V., Chekhovskiy V.A., Galkin Ya.D., Kunts A.V. Programmiruemye bystrodeystvuyushchie operatsionnye usiliteli dlya apparatury spetsial'nogo i dvoynogo naznacheniya [Programmable fast operational amplifiers for special and dual-purpose equipment], *10-ya Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya po voenno-tekhnicheskim problemam, problemam oborony i bezopasnosti, ispol'zovaniya tekhnologii dvoynogo naznacheniya: sbornik nauchnykh statey, Gosudarstvennyy voenno-promyshlennyy komitet Respubliki Belarus'* [10th International Scientific Conference on Military and Technical Problems, Defense and Security Problems, Use of Dual-Use Technologies: collection of scientific articles, State Military-Industrial Committee of the Republic of Belarus]. Minsk: CHetyre chetverti, 2023, pp. 169-172.
20. Ramirez-Angulo J., Holmes M. A simple technique to significantly enhance slew rate and bandwidth of one-stage CMOS operational amplifiers, *2002 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Proceedings (Cat. No.02CH37353)*. Phoenix-Scottsdale, USA, 2002, pp. II-II. DOI: 10.1109/ISCAS.2002.1011483.

21. Hoi Lee P.K.T. Mok. Single-point-detection slew-rate enhancement circuits for single-stage amplifiers, *2002 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*. Phoenix-Scottsdale, USA, 2002, pp. II-II. DOI: 10.1109/ISCAS.2002.1011482.
22. Aminzadeh H., Danaie M., Lotfi R. A low-power design methodology for single-stage operational amplifiers, *International Conference on Design and Test of Integrated Systems in Nanoscale Technology*. Tunis, Tunisia, 2006, pp. 62-67. DOI: 10.1109/DTIS.2006.1708694.
23. Close Santos. A JFET input single supply operational amplifier with rail-to-rail output, *1993 Proceedings of IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting*. Minneapolis, USA, 1993, pp. 149-152. DOI: 10.1109/BIPOL.1993.617487.
24. Dvornikov O.V., Tchekhovsci V.A., Prokopenko N.N., Pakhomov I.V. Reducing noises of high-speed Bi-JFET charge-sensitive amplifiers during schematic design, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 862, pp. 8. DOI:10.1088/1757-899X/862/2/022068.
25. Bowers D.F., Wurcer S.A. Recent developments in bipolar operational amplifiers, *Proceedings of the 1999 Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting*, 1999, pp. 38-45. DOI: 10.1109/BIPOL.1999.803521.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Ю.А. Кравченко.

Дворников Олег Владимирович – ОАО «Минский научно-исследовательский приборостроительный институт»; e-mail: oleg_dvornikov@tut.by; г. Минск, Беларусь; д.т.н.; доцент; г.н.с.

Чеховский Владимир Алексеевич – Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета; e-mail: vtchek@hep.by; г. Минск, Беларусь; зав. лабораторией электронных методов и средств эксперимента.

Кунц Алексей Вадимович – e-mail: alexeykunts97@gmail.com; научный сотрудник лаборатории электронных методов и средств эксперимента; аспирант кафедры микро- и радиоэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Прокопенко Николай Николаевич – Донской государственный технический университет; e-mail: prokopenko@sssu.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; д.т.н.; профессор; зав. кафедрой информационных систем и радиотехники; зав. научно-исследовательской лабораторией проблем проектирования в экстремальных условиях Института проблем проектирования в микроэлектронике РАН наук и Донского государственного технического университета.

Чумаков Владислав Евгеньевич – e-mail: chumakovdssa@gmail.com; тел.: 8636224595; кафедра информационных систем и радиотехники; аспирант.

Dvornikov Oleg Vladimirovich – “Minsk Scientific Research Instrument-Making Institute” JSC; e-mail: oleg_dvornikov@tut.by; Minsk, Belarus; dr. of eng. sc.; associate professor; chief researcher.

Tchekhovski Vladimir Alekseevich – Institute of Nuclear Problems, Belarusian State University; e-mail: vtchek@hep.by; Minsk, Belarus; head of the electronic methods and experimental means laboratory.

Kunts Alexey Vadimovich – e-mail: alexeykunts97@gmail.com; scientific researcher of the electronic methods and experimental means laboratory; postgraduate student of the micro and nanoelectronics department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Prokopenko Nikolay Nikolaevich – Don State Technical University; e-mail: prokopenko@sssu.ru; Rostov-on-Don, Russia; dr. of eng. sc.; professor; head of the information systems and radio engineering department; head of the research laboratory of design problems in extreme microelectronics, institute for design problems in microelectronics of the RAS and Don State Technical University.

Chumakov Vladislav Evgenievich – e-mail: chumakovdssa@gmail.com; phone: 8636224595; the department of information systems and radio engineering; postgraduate student.

**А.В. Бугакова, Д.В. Кузнецов, В.Е. Чумаков, Д.В. Клейменкин,
М.А. Сергеев**

**ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ
АНАЛОГОВЫХ МИКРОСХЕМ НА ШИКОРОЗОННЫХ
ПОЛУПРОВОДНИКАХ (ОБЗОР)***

Представлен аналитический обзор перспективных технологических процессов для высокотемпературных аналоговых микросхем, востребованных в космическом, авиационном и автомобильном приборостроении, нефтехимической промышленности, электроэнергетики, электроники военного назначения, медицине и др. Рассмотрены проблемы проектирования микросхем данного класса на широкозонных полупроводниках (карбид-кремний (SiC), нитрид-галлий (GaN), арсенид-галлий (GaAs)), обеспечивающих широкий диапазон рабочих температур (-200°C...+500°C). В настоящее время «слаботочная» схемотехника на SiC, GaN, GaAs широкозонных полупроводниках для работы при высоких температурах крайне не развита, что не позволяет проектировать аналоговые изделия нового поколения в интересах российских предприятий. Сегодня многие актуальные вопросы SiC, GaN, GaAs высокотемпературной схемотехники и динамики не решены. Необходимы исследования конструктивно-технологических решений, а также отвода тепла. В этой связи в статье проведен анализ проблем проектирования микросхем данных классов. При этом следует учитывать ограничения технологических процессов, которые, во многих случаях, позволяют создавать только однотипные активные элементы, что затрудняет построение микросхем. Актуальность вышеназванных исследований связана с проблемами импортозамещения в условиях санкций, когда закупка электронной компонентной базы ответственного применения у зарубежных фирм становится недоступной. Нужны российские рекомендации по разработке правил проектирования аналоговых интерфейсных микросхем (операционных и мультидифференциальных операционных усилителей, трансимпедансных и зарядочувствительных усилителей, компенсационных стабилизаторов напряжения и буферных усилителей, токовых конвейеров и т.п.) под задачи обработки сигналов датчиков физических величин в диапазоне высоких температур (+150°C ... +500°C).

Высокотемпературные аналоговые микросхемы; широкозонные полупроводники; арсенид-галлий (GaAs); нитрид-галлий (GaN); карбид-кремний (SiC).

**A.V. Bugakova, D.V. Kuznetsov, V.E. Chumakov, D.V. Kleimenkin,
M.A. Sergeev**

**FUNDAMENTALS OF DESIGNING HIGH-TEMPERATURE ANALOGIC
MICROSCIRCUIT ON WIDE-GAP SEMICONDUCTORS (REVIEW)**

An analytical review of promising technological processes for high-temperature analog microcircuits, which are in demand in space, aviation and automotive instrumentation, petrochemical industry, electric power industry, military electronics, medicine, etc., is presented. The problems of designing microcircuits of this class based on wide-gap semiconductors (silicon carbide (SiC), gallium nitride (GaN), gallium arsenide (GaAs)) that provide a wide range of operating temperatures (-200°C...+500°C). Currently, "low-current" circuitry based on SiC, GaN, GaAs wide-gap semiconductors for operation at high temperatures is extremely undeveloped, which does not allow designing new-generation analog products in the interests of Russian enterprises. Today, many topical issues of SiC, GaN, GaAs high-temperature circuitry and dynamics have not been resolved. Therefore, it is necessary to study structural and technological solutions, as well as heat removal. In this regard, the article analyzes the problems of designing microcircuits of these classes. At the same time, one should take into account the limitations of technological processes,

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-79-10069).

which, in many cases, allow creating only the same type of active elements, which makes it difficult to build microcircuits. The relevance of the above studies is related to the problems of import substitution under the conditions of sanctions, when the purchase of an electronic component base for responsible use from foreign firms becomes unavailable. Russian recommendations are needed on the development of rules for designing analog interface microcircuits (operational and differential difference amplifiers, transimpedance and charge-sensitive amplifiers, compensation voltage stabilizers and buffer amplifiers, current conveyors, etc.) for the tasks of processing signals from sensors of physical quantities in the high temperature range (+150 °C ... +500°C).

High-temperature analog microcircuits; wide-gap semiconductors; gallium arsenide (GaAs); gallium nitride (GaN); silicon carbide (SiC).

Введение. Под высокотемпературной электроникой понимается микроэлектроника, функционирующая при температуре свыше +150°C [1]. Высокотемпературные микросхемы являются предметом исследования многих профильных университетов и микроэлектронных фирм, что нашло отражение в значительном количестве статей и патентов по данному направлению [2–45]. Одним из векторов развития высокотемпературной микроэлектроники для приборостроения становится применение широкозонных полупроводниковых материалов [14], в том числе обеспечивающие широкий диапазон рабочих температур (-200°C ... +400°C) и высокую радиационную стойкость [14].

Основная цель настоящего исследования состоит в рассмотрении проблем проектирования высокотемпературных микроощных аналоговых микросхем на широкозонных полупроводниках (SiC, GaN и GaAs), которые сегодня наиболее часто применяются в силовых изделиях при больших уровнях токов.

Анализ направлений исследований мировой науки [2–45] по данной проблеме классифицирован в Таблице 1.

Таблица 1

Направления исследований в области высокотемпературной электроники

№	Направления исследований мировой науки	Ссылки на источники
1	Области применения высокотемпературных микросхем	[3–9]
2	Общие свойства SiC, GaN и GaAs. Особенность техпроцессов	[7, 10–12]
3	Высокотемпературные компьютерные модели транзисторов	[13]
4	Высокотемпературная электроника на GaN	[2, 3, 8, 11, 14, 15]
5	Высокотемпературная электроника на GaAs	[16]
6	Высокотемпературная электроника на SiC	[2, 11, 17–23]
7	Проблемы высокотемпературной аналоговой схемотехники на GaN, SiC, GaAs	[2, 4, 5, 6, 11, 19–21, 24–27]
8	Серийные высокотемпературные микросхемы	[2, 28, 29]
9	СВЧ изделия на GaN	[28, 30]
10	Силовая высокотемпературная электроника	[31, 32]
11	Проблемы конструктивно-технологических решений высокотемпературных микросхем и отвода тепла	[18, 33]

В настоящее время в различных областях науки и техники вырос спрос на приложения [1], требующих, чтобы электронные устройства, цифровые и аналоговые схемы работали при высоких температурах (табл. 2).

Крупнейшей сферой применения высокотемпературной электроники является бурение нефтегазовых скважин [1, 3, 5, 6, 35]. Например, в нефтехимической промышленности требуются датчики, осуществляющие мониторинг окружающей среды вокруг бурового оборудования, где температура отдельных блоков может быть свыше +300 °С. Применение качественной высокотемпературной электроники дает возможность повысить надежность скважинных устройств сбора данных и снизить риск аварийных ситуаций [1, 3, 5, 6, 35].

Таблице 2

Области применения высокотемпературных микросхем

№	Область применения	Предельный прогнозируемый диапазон температур	Ссылки на источники
1	Аэрокосмическое приборостроение	+120°С (температура атмосферы Луны)	[8]
		+400°С (температура атмосферы Венеры)	[2]
2	Авиационное приборостроение	+300 °С (например, мониторинг реактивных двигателей и аэродинамических поверхностей)	[4]
3	Нефтехимическая промышленность	+210°С ... +300 °С (например, при бурении глубоких скважин для осуществления внутрискважинной связи)	[1, 3, 5, 6, 35]
4	Автомобильное приборостроение	+150°С ... +300°С (например, температура электронных модулей в моторных отсеках и тормозных механизмах)	[1, 31, 35]
5	Электроэнергетика	+600°С (например, оборудование для атомных станций)	[1,22]

Развитие авиационного приборостроения в настоящее время направлено на повышение уровня электрификации самолетов [1, 36]. Среди прочего, вместо традиционных централизованных устройств управления двигателями разрабатываются распределенные системы управления. Распределенные схемы бортовой электроники, можно располагать ближе к двигателю, в сравнении с централизованными устройствами управления). Это на порядок уменьшает уровень сложности межсоединений, облегчает вес самолета (за счет замены обычных гидравлических систем электрическими приводами) на сотни килограммов и повышает надежность системы, рассчитываемой, в частности, как функция числа контактов соединителей (по стандарту MIL-HDBK-217F) [1]. Недостаток же состоит в том, что температура в непосредственной близости от двигателя самолета может варьироваться в диапазоне от –55 °С до +200 °С. Причем внешнее охлаждение нежелательно по двум причинам: во-первых, системы охлаждения увеличивают себестоимость и массу самолета, а во-вторых, отказ системы охлаждения может привести к отказу управляющей электроники, что может привести к аварийным ситуациям [1, 6].

Еще одно применение высокотемпературной электроники – автомобильное приборостроение. Переход от чисто механических и гидравлических систем к электромеханическим или механотронным системам требует переноса датчиков, схем нормирования сигналов и управляющей электроники ближе к источникам тепла [1, 3, 5, 6, 35, 36]. Более тесная интеграция электрических и механических систем (например, совмещение коробки передач с блоком ее управления) повышает производственную и эксплуатационную технологичность автомобильных под-

систем. Для функциональных узлов и компонентов систем управления (например, блоков управления двигателем, зарядных цепей и т.п.), связанных с высокими температурами, электромобилей и гибридных автомобилей нужна силовая электроника с высокой плотностью мощности [1].

Таким образом, разработка микроэлектронных устройств с надежными электрическими свойствами, например, на SiC, GaN и GaAs, предназначенных для высокотемпературных сред, представляет собой чрезвычайно важную задачу [7]. Это позволит избежать использования охлаждающих конструкций, недостатком которых является увеличение веса и себестоимости, а также снижение эффективности аппаратов [4], при одновременном повышении надежности всей управляющей электроники [9].

1. Высокотемпературная электроника на SiC, GaN и GaAs. Полупроводники с широкой запрещенной зоной (SiC, GaN, GaAs) являются основными кандидатами в обозримом будущем для преодоления фундаментальных ограничений традиционной электроники в высокотемпературных приложениях [11].

Сегодня, например, SiC, GaAs и GaN полевые транзисторы с управляющими рп-переходами (Junction Field Effect Transistor – JFET) исследуются ведущими университетами и научно-производственными фирмами на предмет применения для работы при высоких температурах (-200°C ... $+400^{\circ}\text{C}$) [2, 4, 9, 12, 13, 16, 17, 18, 21, 23, 25–27, 32].

Компанией Texas Instruments представлен ряд высокотемпературных компонентов, ограниченных 220°C . Среди них операционные и инструментальные усилители OPA2333-НТ, OPA211-НТ, INA117-НТ, INA129-НТ, INA333-НТ, INA271-НТ, THS4521-НТ, которые не поставляются в настоящее время в Россию.

Рядом зарубежных микроэлектронных фирм и исследовательских научных центров разработаны совмещенные GaAs технологии, в рамках которых реализуются GaAs JFET и GaAs n-p-n/p-n-p биполярные транзисторы [16].

Ведущими производителями на мировом рынке GaAs микросхем являются компании TriQuint Semiconductor (37% рынка) и WIN Semiconductor (36%) [28]. На долю Advanced Wireless Semiconductor (AWSC) приходится 12% рынка, Global Communication Semiconductor (CCS) – 6% [28]. Продукция этих компаний предназначена в основном для различных устройств и систем мобильной связи [28]. Наиболее крупные европейские компании United Monolithic Semiconductor (UMS) и OMMIC специализируются главным образом на мелкосерийном выпуске схем аэрокосмического и военного назначения, но вместе с тем стремятся расширить свое присутствие на глобальном рынке GaAs изделий [28].

Микроэлектронные изделия на основе GaAs отличаются, прежде всего, малым уровнем шума [2], а также превосходят традиционные кремниевые (Si) микросхемы по быстродействию примерно в 20 раз. Однако, слаботочная аналоговая GaAs электронная компонентная база (ЭКБ) для обработки сигналов датчиков в робототехнике и космическом приборостроении практически не исследована [2].

SiC и GaN имеют одинаковую ширину запрещенной зоны, поля пробоя и скорости дрейфа электронов. Это также означает, что они оба обладают более высокой плотностью мощности по сравнению с Si, что позволяет использовать устройства значительно меньшего размера.

Следует отметить, что: 1) приборы на основе SiC очень стабильны во времени и слабо зависят от температуры, что обеспечивает высокую надежность изделий; 2) SiC чрезвычайно устойчив к жесткой радиации, воздействие которой не приводит к деградации электронных свойств кристалла; 3) высокая предельная рабочая температура кристалла позволяет создавать высоконадежные приборы. Таким образом, высокая рабочая температура, а также радиационная стойкость

делают SiC и CJFET на его основе [2, 37] практически незаменимыми для разработки полупроводниковых приборов, работающих в жестких условиях эксплуатации, в том числе при высоких температурах.

GaN, по мнению ученых [2], является одним из самых востребованных и перспективных материалов современной микроэлектроники. Подвижность его электронов вдвое выше, чем у SiC, и на 25% выше, чем у Si [2, 10, 14]. Однако, теоретические вопросы построения GaN аналоговых микросхем, например операционных усилителей (ОУ) для обработки сигналов датчиков различных физических величин, находятся на начальном этапе развития [2, 11].

В [11] представлен обзор существующих схемотехнических решений в области проектирования изделий на SiC и GaN для высоких температур от (25°C до +300°C ... +1000 °C), включающий в себя различные логические элементы, операционные усилители [26], дифференциальные усилители [21] и т.п.

В работе [24] представлены варианты реализации полевых SiC ОУ для высокотемпературных применений от 25°C до 350°C [20], 400 °C. Причем, коэффициент усиления по напряжению данного ОУ [20] в диапазоне температур изменяется в пределах 49-54 дБ, что является достаточным для некоторых практических применений.

В статье [11] рассматривается прогресс, достигнутый Исследовательским центром Гленна НАСА и Университетом Кейс Вестерн Резерв (CWRU) в разработке технологии проектирования SiC JFET дифференциальных усилителей для экстремальных температур (до 500 °C). Интегральные схемы 4H-SiC JFET 10-го поколения Исследовательского центра НАСА имени Гленна однозначно продемонстрировали работу при температуре 500 °C. Эта экспериментальная работа также показала, что физическое растрескивание диэлектрических пассивирующих слоев в конечном итоге ограничивают срок службы микросхем в экстремальных условиях [18].

В [17, 19, 21, 25, 26] представлено семейство полностью интегрированных п-канальных JFET дифференциальных усилителей, реализованных по технологии 6H-SiC. Выходной однокаскадный ОУ [19, 21, 25, 26] имеет в дифференциальном режиме 69 дБ при 576°C с отклонением усиления всего на 3,6 дБ от 25-576°C. Данная схемотехника является перспективной, однако она не отличается разнообразием [19,21,25,26]. Нужны новые схемотехнические решения, позволяющие улучшить статические и динамические параметры ОУ.

Разработки устройств на основе GaN проводятся многими крупными зарубежными компаниями (более 30). Большинство из них (Nitronex, RFMD, TriQuint, Cgec (США); NEC, Toshiba, Edyna (Япония) и др.) к настоящему времени уже приступили к промышленному выпуску GaAs элементной базы [15]. Однако разработке микромощной аналоговой ЭКБ уделяется недостаточно внимания и для российских разработчиков она не доступна. Производство микросхем на основе GaN является «нишевым» бизнесом ряда других ведущих микроэлектронных фирм: NXP (Нидерланды), SkyWorks Solutions Inc и Qorvo Inc [2].

В [5,6] представлена конструкция GaN усилителя с регулируемым коэффициентом усиления с использованием технологии GaN 0,25 мкм на SiC, работающий при температуре окружающей среды до 230 °C. Результаты измерений [5,6] при 230 °C показывают, он пиковое усиление 27 дБ на центральной частоте 97,5 МГц и диапазон регулировки усиления 29,4 дБ. При максимальном усилении входной сигнал составляет -11,57 дБм при +230 °C (-3,63 дБм при +25 °C).

ЭКБ для задач аналоговой обработки сигналов насчитывает сегодня более 150 модификаций усилителей напряжения и тока, токовых конвейсеров, нуллоров, мультидифференциальных усилителей напряжения и тока и т.д. [2]. Однако, их

схемотехника далека от совершенства и недопустимо медленно развивается [2] в область применения перспективных технологических процессов на основе широкозонных полупроводников (SiC, GaN, GaAs и др.).

В настоящее время Китай совместно со Швейцарией и Португалией проводят разработку полевых транзисторов со сверхширокой управляемой шириной запрещенной зоны [2], которые могут стать основой следующего поколения электроники. Однако, схемотехника аналоговых устройств для обработки сигналов датчиков в рамках данного технологического процесса сегодня отсутствует.

В России развитие GaN микроэлектроники началось со значительным опозданием [28]. В настоящее время этой проблемой занимаются несколько научно-производственных организаций: АО «Светлана-Рост», АО «Светлана-Электронприбор», АО «Научно-исследовательский институт электронной техники», Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук, АО «Элма-Малахит», АО НПФ «Микран», АО «НПП «Пульсар», АО «ПКК Миландр», АО «ОКБ-Планета», АО «ЗНТЦ» и МИЭТ. Пока созданы только экспериментальные образцы усилителей 4 ГГц диапазона. По оценке специалистов ЗАО "Светлана-Рост", отставание от мирового уровня составляет три-четыре года [28].

2. Проблемы развития высокотемпературной схемотехники. С каждым годом увеличивается количество патентов и статей в классе так называемых «полных дифференциальных операционных усилителей», обеспечивающих ряд важных параметров аналоговых интерфейсов, недостижимых на другой аналоговой ЭКБ [38–44].

Разработка, например, SiC, GaN, GaAs JFET операционных усилителей с дифференциальным входом и выходом позволяет снизить влияние синфазных помех, уменьшить уровень второй гармоники в спектре выходного сигнала, в два раза увеличить максимальную амплитуду выходного напряжения, снизить эффект «пролезания» цифровых сигналов через подложку в аналого-цифровых микросхемах СВЧ-диапазона. Кроме этого, архитектуры микросхем с парафазным выходом обладают принципиально большей стойкостью к высоким температурам за счет наличия дифференциального выхода. Анализ публикаций по проблемам применения полностью дифференциальных ОУ показал, что во многих интерфейсах для задач АЦП преобразования сигналов, например входных ограничителей спектра на ОУ с парафазным входом и дифференциальным выходом, не учитывается влияние коэффициента подавления синфазного сигнала (CMRR) на частоту полюса, добротность полюса и коэффициент передачи. Однако, в [38–44] также не учтено влияние помех по шинам питания и частотной зависимости параметров фильтров от CMRR при исполнении ОУ по SiC, GaN, GaAs техпроцессам. Недостатком схемотехнического решения известного фильтра [45], является отсутствие оценки влияния на амплитудно-частотные характеристики параметров ОУ по подавлению синфазного сигнала при его исполнении по SiC, GaN, GaAs технологиям. Стоит отметить, что известные методы повышения CMRR [2] недостаточно эффективны для CJFet дифференциальных каскадов и SiC, GaN, GaAs CJFet операционных усилителей, разрабатываемых для высокотемпературных применений.

Важным вопросом при проектировании аналоговых интерфейсов является подавление импульсных помех по их шинам питания [15]. В ряде случаев данная проблема решается введением конденсатора большой емкости в цепи питания. Однако этот подход не эффективен при построении микросхем в виде «систем на кристалле» или «систем в корпусе». В этой связи крайне важна задача создания единой (интегральной) схемотехники SiC, GaN, GaAs ОУ и специальных SiC, GaN, GaAs подавителей помех [15]. Данные схемотехнические решения в настоя-

щее время мало изучены [15]. Актуальность их создания связана также с проблемами воздействия на аналоговые микросхемы короткого электромагнитного импульса [15].

Несмотря на сотни публикаций по проблемам проектирования IP-модулей интегральных стабилизаторов напряжения (СН) для прецизионных аналоговых интерфейсов [2], многие актуальные вопросы их SiC, GaN, GaAs высокотемпературной схемотехники и динамики на сегодняшний день не решены. Так, нуждается в развитии теория CJFET компенсационных СН для совместной работы с SiC, GaN, GaAs ОУ [2] рассматриваемого класса, обеспечивающих повышенное подавление всплесков и провалов выходного напряжения СН при импульсных токах нагрузки, не содержащих конденсаторов большой емкости на выходе. Кроме этого, в профильных журналах отсутствует качественный сравнительный анализ основных параметров регулирующих элементов (SiC, GaN, GaAs) для СН [2], ориентированных на перспективные архитектуры высокотемпературных вторичных источников электропитания.

Существуют также и другие проблемы разработки микросхем операционных усилителей и аналоговых IP-модулей на печатных платах для работы в экстремальных условиях (от +150°C до +500°C):

1. Собственное тепловыделение. Здесь многое зависит от выбранных схемотехнических и топологических решений. Популярны также теплоизоляция и создание специализированных корпусов, применение микромощных схемотехнических решений и пониженного напряжения питания ОУ, реализация микросхем на термоэлектрических модулях (Peltier). Однако, применение активного и пассивного охлаждения не является решением проблемы для микроэлектронных устройств, рассчитанных на малые габариты.

2. Обеспечение стабильности параметров во времени. Как известно, высокие температуры влияют на параметры полупроводников, такие как подвижность носителей заряда, исходные токи утечки и другие характеристики. Обеспечение стабильности работы усилителей на протяжении длительного времени становится сложной задачей, требующей специальных исследований.

3. Выбор подходящих полупроводниковых материалов, которые могли бы работать при высоких температурах (до +500°C). Некоторые транзисторы, такие как SiC и GaN, имеют высокую термическую стабильность [12, 15, 23], но требуют специальных схем включения в аналоговых устройствах.

4. Пассивные компоненты. На высоких температурах могут возникнуть проблемы с надежностью соединений и интерфейсов между компонентами, а также с пассивными элементами (конденсаторы, резисторы). Для работы при высоких температурах (до +125°C ... +220°C) [46] часто используются специальные конденсаторы, такие как танталовые или керамические (класс I, например, например, C0G/NP0). Однако высокое качество конденсаторов сложно реализовать для широкого диапазона температур (до +500°C) в виду их параметрических ограничений (утечка, срок службы под влиянием высоких температур и т.п.). Необходима схемотехника ОУ, исключающая применение корректирующих конденсаторов, обеспечивающих устойчивость петли отрицательной обратной связи (ООС). Перспективно использование для этих целей эффекта умножения паразитных емкостей высокотемпературных транзисторов. Кроме этого, не следует рекомендовать включение таких ОУ со 100% ООС.

Параметры и характеристики высокотемпературного резистора в первую очередь зависят от материала, из которого он изготовлен. Это могут быть различные металлы с большим удельным сопротивлением, их производные в виде оксидов, а также керамические композиты (в том числе с примесями солей металлов).

Высокотемпературные резисторы из таких материалов используются для навесного и поверхностного монтажа на высокотемпературных подложках. Некоторые примеры коммерческих технологий изготовления высокотемпературных резисторов представлены в [47], но они ограничены температурным диапазоном до $+220^{\circ}\text{C}$. Необходима схемотехника ОУ на широкозонных полупроводниках, включающая применение интегральных резисторов.

Закключение. Авторами выполнен обзор мирового уровня востребованности высокотемпературных микросхем ($+150^{\circ}\text{C} \dots +500^{\circ}\text{C}$) в аэрокосмическом, атомном приборостроении, автомобильной промышленности и бурении глубоких скважин (добыча некоторых сортов нефти), где экстремально-высокие температуры являются основной проблемой для использования традиционных микроэлектронных устройств, обрабатывающих сигналы датчиков. Анализ многочисленных публикаций, связанных с высокотемпературной электроникой [1–47], показывает, что схемотехника микросхем данного класса находится на начальном этапе развития. Накопленные сегодня в мировой науке знания в области основ схемотехники и конструирования высокотемпературных слаботочных аналоговых микросхем для обработки сигналов датчиков имеют разрозненный характер, частично устарели, не систематизированы с точки зрения целесообразности их применения в разных температурных диапазонах с использованием разных технологических процессов, в том числе на широкозонных полупроводниках (SiC, GaN, GaAs). Недостаточно исследована тема собственной компенсации систематической составляющей напряжения смещения нуля ($U_{см.}$) и других параметров операционных усилителей, реализованных на широкозонных полупроводниках (SiC, GaN, GaAs) при их работе в экстремальных условиях. Здесь эффекты компенсации $U_{см.}$ могут осуществляться за счет схемотехники, что повышает её роль в задачах создания качественных высокотемпературных микросхем.

Таким образом, решение задачи импортозамещения высокотемпературных микросхем в условиях санкций, когда закупка ЭКБ зарубежных фирм становится недоступной, состоит в разработке собственных правил проектирования аналоговых интерфейсных микросхем на существующих сегодня классах активных элементов и освоенных в России технологических процессов. Фактически данная научная проблема носит междисциплинарный характер, так как оптимальная высокотемпературная схемотехника, позволяющая существенно улучшить основные параметры микросхем при повышенных температурах (по сравнению с обычными решениями), относится к интегральной науке, объединяющей лучшие достижения физики полупроводников, теории усиления и обработки сигналов датчиков, микроэлектроники, электродинамики, теории электрических цепей и САПР, теории тепловых процессов, конструктивно-технологических решений микросхем и т.д. Причем, стоит учитывать ограничения технологических процессов, которые во многих случаях могут обеспечивать только однотипные активные элементы. Перспективным направлением является адаптация SiC, GaN, GaAs технологий и «слаботочной» аналоговой ЭКБ (операционных и мультидифференциальных операционных усилителей, трансимпедансных и зарядочувствительных усилителей, компенсационных стабилизаторов напряжения и буферных усилителей, токовых конвейеров и т.п.) под задачи обработки сигналов датчиков физических величин в диапазоне высоких температур ($+150^{\circ}\text{C} \dots +500^{\circ}\text{C}$). Актуальна тема создания высокотемпературных аналоговых схем, не содержащих резисторов и конденсаторов.

Решение поставленных научных проблем позволит создать профильную базу знаний, систематизирующую основные этапы проектирования высокотемпературной аналоговой ЭКБ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бобков С. Г. Проблемы создания высокотемпературных вычислительных систем // Программные продукты и системы. – 2015. – № 4 (112). – С. 62-69.
2. Прокопенко Н.Н., Бугакова А.В., Чумаков В.Е. Основные направления развития схемотехники трансимпедансных и операционных усилителей с учетом новых и перспективных технологических процессов // Радиоэлектронная техника: межвузовский сборник научных трудов / под ред. В.А. Сергеева. – Ульяновск: УлГТУ, 2022. – С. 4-16.
3. Salem J.M., Pour F.L., Sam Ha D. A High-Temperature Model for GaN-HEMT Transistors and its Application to Resistive Mixer Design // Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. – IEEE, 2021. – Vol. 68, No. 2. – P. 581-591.
4. Neudeck P.G., Garverick S.L., Spry D.J., Chen L.Y., Beheim G.M., Krasowski M.J., Mehregany M. Extreme temperature 6H-SiC JFET integrated circuit technology // Physica Status Solidi (a). – 2009. – Vol. 206, No. 10. – P. 2329-2345.
5. Ehteshamuddin M. Design of a High Temperature GaN-Based Variable Gain Amplifier for Downhole Communications. – URL: https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/74958/Ehteshamuddin_M_T_2017.pdf?isAllowed=y&sequence=1 (дата обращения: 01.08.2023).
6. Ehteshamuddin M., Salem J.M., Ha D.S. A high temperature variable gain amplifier based on GaN HEMT devices for downhole communications // International Symposium on Circuits and Systems. – IEEE, 2017. – P. 1-4.
7. Алексеев А., Петров С. Создание мощных СВЧ-транзисторов и микросхем на основе GaN-отечественный комплекс технологического оборудования // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2016. – № 5. – С. 48-53.
8. Kargarrazi S., Yalamarthy A.S., Satterthwaite P.F., Blankenberg S.W., Chapin C., Senesky D.G. Stable Operation of AlGaIn/GaN HEMTs for 25 h at 400°C in air // Journal of the Electron Devices Society. – IEEE, 2019. – Vol. 7. – P. 931-935.
9. Публикации в области применения высокотемпературных микросхем. – URL: https://disk.yandex.ru/i/2OztJ_c6Fq1UHG (дата обращения: 21.08.2023).
10. Bahl I.J. Control Components Using Si, GaAs, and GaN Technologies. – Artech House, 2014. – 325 p.
11. Hassan A., Ali M., Trigui A., Savaria Y., Sawan M. A GaN-based wireless monitoring system for high-temperature applications // Sensors. – 2019. – Vol. 19, No. 8. – P. 1785.
12. Публикации, отражающие общие свойства GaAs, GaN, SiC и особенности техпроцессов. – URL: <https://disk.yandex.ru/i/2mNo3yo9eqiWhQ> (дата обращения: 21.08.2023).
13. Публикации по высокотемпературным компьютерным моделям транзисторов. – URL: https://disk.yandex.ru/i/x50jo_RvnMtHHQ (дата обращения: 21.08.2023).
14. Vitanov S., Palankovski V., Maroldt S., Quay R. High-temperature modeling of AlGaIn/GaN HEMTs // Solid-State Electronics. – 2010. – Vol. 54, No. 10. – P. 1105-1112.
15. Публикации по высокотемпературной электронике на GaN. – URL: <https://disk.yandex.ru/d/YTYuxjPoFFImKw> (дата обращения: 21.08.2023).
16. Публикации по высокотемпературной электронике на GaAs. – URL: <https://disk.yandex.ru/i/OM5WL1jNfIGFcg> (дата обращения: 21.08.2023).
17. Soong C.-W., Patil A.C., Garverick S.L., Fu X., Mehregany M. 550°C Integrated Logic Circuits using 6H-SiC JFETs // Electron Device Letters. – IEEE, 2012. – Vol. 33, No. 10. – P. 1369-1371.
18. Spry D.J., Neudeck P.G., Chang C. Experimental study on mitigation of lifetime-limiting dielectric cracking in extreme temperature 4H-SiC JFET Integrated Circuits // Materials Science Forum. – Trans Tech Publications Ltd, 2020. – Vol. 1004. – P. 1148-1155.
19. Stum Z., Tilak V., Losee P.A., Andarawis E.A., Chen C.P. 300° C Silicon Carbide Integrated Circuits // Materials Science Forum. – 2011. – Vol. 679-680. – P. 730-733.
20. Brown D.M. Silicon Carbide MOSFET Integrated Circuit Technology // Physica Status Solidi (A). – 1997. – Vol. 162. – P. 459-479.
21. Patil A.C., Fu X.A., Anupongongarch C., Mehregany M., Garverick S.L. 6H-SiC JFETs for 450 °C Differential Sensing Applications // Journal of Microelectromechanical Systems. – 2009. – Vol. 18, No. 4. – P. 950-961.
22. Khanna V.K. Extreme-temperature and harsh-environment electronics: physics, technology and applications // IOP Publishing. – 2023. – DOI: 10.1088/978-0-7503-5072-3.

23. Публикации по высокотемпературной электронике на SiC. – URL: <https://disk.yandex.ru/i/zW4DgGBx9B9aQA> (дата обращения: 21.08.2023).
24. Rahman A., Roy S., Murphree R., Kotecha R., Addington K., Abbasi A., Mantooth H.A., Francis A.M., Holmes J., Di J. High-temperature SiC CMOS comparator and op-amp for protection circuits in voltage regulators and switch-mode converters // *Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. – IEEE, 2016. – Vol. 4, No. 3. – P. 935-945.
25. Patil A.C., Fu X.A., Mehregany M., Garverick S.L. Fully-monolithic, 600°C differential amplifiers in 6H-SiC JFET IC technology // *Proceedings of the CICC*. – IEEE, 2009. – P. 73-76.
26. Neudeck P.G., Garverick S.L., Spry D.J., Chen L.Y., Beheim G.M., Krasowski M.J., Mehregany M. Extreme temperature 6H-SiC JFET integrated circuit technology // *Physica Status Solidi (A)*. – 2009. – Vol. 206, No. 10. – P. 2329-2345.
27. Публикации по проблемам высокотемпературной аналоговой схемотехники на GaN, SiC, GaAs. – URL: <https://disk.yandex.ru/i/R0kIX06Fmpw6Ig> (дата обращения: 21.08.2023).
28. Викулов И. Монолитные интегральные схемы СВЧ технологическая основа АФАР // *Электроника: наука, технология, бизнес*. – 2012. – №. 7. – С. 060-073.
29. Публикации по серийным высокотемпературным микросхемам. – URL: <https://disk.yandex.ru/i/eacY7GF4CDRtgg> (дата обращения: 21.08.2023).
30. Публикации в области СВЧ изделий на GaN. – URL: <https://disk.yandex.ru/i/inwYk5hcV1jjpg> (дата обращения 21.08.2023).
31. Liao C.-H., Yang S.-H., Liao M.-Y., Chung K.-C., Kumari N., Chen K.-H., Lin Y.-H., Lin S.-R., Tsai T.-Y., Juang Y.-Z. 3.8 A 23.6 ppm/°C Monolithically Integrated GaN Reference Voltage Design with Temperature Range from – 50° C to 200° C and Supply Voltage Range from 3.9 to 24V // *Proceedings of the International Solid-State Circuits Conference*. – IEEE, 2020. – P. 72-74.
32. Публикации в области силовой высокотемпературной электроники. – URL: https://disk.yandex.ru/d/SB1_FPzrpFJP9A (дата обращения: 21.08.2023).
33. Публикации по проблемам конструктивно-технологических решений высокотемпературных микросхем и отвода тепла. – URL: <https://disk.yandex.ru/i/9w7ZTgNQj13jZQ> (дата обращения: 21.08.2023).
34. Lee H., Smet V., Tummala R. A review of SiC power module packaging technologies: Challenges, advances, and emerging issues // *Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. – IEEE, 2019. – Vol. 8, No. 1. – P. 239-255.
35. Высокотемпературная и алмазная электроника, применение, особенности и конструкции. – URL: <https://intellect.icu/vysokotemperaturnaya-i-almaznaya-elektronika-primenenie-osobennosti-i-konstruktsii-8496> (дата обращения: 01.08.2023).
36. Watson J., Castro G. A review of high-temperature electronics technology and applications // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. – 2015. – Vol. 26. – P. 9226-9235.
37. Свойства и характеристики SiC. – URL: <https://www.prosofLru/products/types/poluprovodnikovye-materialy/362515/362988/> (дата обращения: 01.08.2023).
38. Wang J., Zhu Z., Liu S., Ding R. A low-noise programmable gain amplifier with fully balanced differential difference amplifier and class-AB output stage // *Microelectronics Journal*. – 2017. – Vol. 64. – P. 86-91.
39. Royo G., Sanchez-Azqueta C., Martinez-Perez A.D., Aldea C., Celma S. Fully-differential transimpedance amplifier for reliable wireless communications // *Microelectronics Reliability*. – 2018. – Vol. 83. – P. 25-28.
40. Ku Y.-T., Hwang Y.-S., Chen J.-J., Shih C.-C., Cheng D. A new current-mode Wheatstone bridge based on a new fully differential operational transresistance amplifier // *AEU - International Journal of Electronics and Communications*. – 2019. – Vol. 101. – P. 85-92.
41. Sabry M.N., Nashaat I., Omran H. Automated design and optimization flow for fully-differential switched capacitor amplifiers using recycling folded cascode OTA // *Microelectronics Journal*. – 2020. – Vol. 101. – P. 104814. – DOI: 10.1016/j.mejo.2020.104814.
42. Beev N., Kiviranta M. Fully differential cryogenic transistor amplifier // *Cryogenics*. – 2013. – Vol. 57. – P. 129-133. – DOI: 10.1016/j.cryogenics.2013.06.004.
43. Kim K., Yoo C. Time-Domain Operational Amplifier with Voltage-Controlled Oscillator and Its Application to Active-RC Analog Filter // *Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*. – IEEE, 2020. – Vol. 67, No. 3. – P. 415-419.

44. Gebreyohannes F. T., Loueratand M., Aboushady H. Design of a 4th-Order Feed-Forward-Compensated Operational Amplifier for Multi-GHz Sampling Frequency Continuous-Time Bandpass Sigma-Delta Modulators // International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). – IEEE, 2019. – P. 1-5.
45. Flenrion W.S., Kruczkowski P.J., Sen S. Trans-impedance amplifier // US Patent 6.323.734, Feb. 29, 2001.
46. Ma D., Geng X., Dai F.F., Cressler J.D. A 6th order butterworth SC low pass filter for cryogenic applications from -180°C to 120°C // Proceedings of the AEROS Conference. – 2009. – P. 1-8.
47. Watson J., Castro G. High-temperature electronics pose design and reliability challenges // Analog Dialogue. – 2012. – Vol. 46, No. 2. – P. 3-9.

REFERENCES

1. Bobkov S.G. Problemy sozdaniya vysokotemperaturnykh vychislitel'nykh sistem [Problems of creating high-temperature computing systems], *Programmnye produkty i sistemy* [Software products and systems], 2015, No. 4 (112), pp. 62-69.
2. Prokopenko N.N., Bugakova A.V., Chumakov V.E. Osnovnye napravleniya razvitiya skhemotekhniki transimpedansnykh i operatsionnykh usiliteley s uchetom novykh i perspektivnykh tekhnologicheskikh protsessov [The main directions of development of circuitry for transimpedance and operational amplifiers, taking into account new and promising technological processes], *Radioelektronnaya tekhnika: mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov* [Radioelectronic engineering: interuniversity collection of scientific papers], ed. by V.A. Sergeeva. Ul'yanovsk: UIGTU, 2022, pp. 4-16.
3. Salem J.M., Pour F.L., Sam Ha D. A High-Temperature Model for GaN-HEMT Transistors and its Application to Resistive Mixer Design, *Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*. IEEE, 2021, Vol. 68, No. 2, pp. 581-591.
4. Neudeck P.G., Garverick S.L., Spry D.J., Chen L.Y., Beheim G.M., Krasowski M.J., Mehregany M. Extreme temperature 6H-SiC JFET integrated circuit technology, *Physica Status Solidi (a)*, 2009, Vol. 206, No. 10, pp. 2329-2345.
5. Ehteshamuddin M. Design of a High Temperature GaN-Based Variable Gain Amplifier for Downhole Communications. Available at: https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/74958/Ehteshamuddin_M_T_2017.pdf?isAllowed=y&sequence=1 (accessed 01 August 2023).
6. Ehteshamuddin M., Salem J.M., Ha D.S. A high temperature variable gain amplifier based on GaN HEMT devices for downhole communications, *International Symposium on Circuits and Systems*. IEEE, 2017, pp. 1-4.
7. Alekseev A., Petrov S. Sozdanie moshchnykh SVCh-tranzistorov i mikroskhem na osnove GaN-otchestvennyy kompleks tekhnologicheskogo oborudovaniya [Creation of high-power microwave transistors and microcircuits based on GaN-domestic complex of technological equipment], *Elektronika: Nauka, tekhnologiya, biznes* [Electronics: Science, technology, business], 2016, No. 5, pp. 48-53.
8. Kargarrazi S., Yalamarthy A.S., Satterthwaite P.F., Blankenberg S.W., Chapin C., Senesky D.G. Stable Operation of AlGaIn/GaN HEMTs for 25 h at 400°C in air, *Journal of the Electron Devices Society*. IEEE, 2019, Vol. 7, pp. 931-935.
9. Publikatsii v oblasti primeneniya vysokotemperaturnykh mikroskhem [Publications in the field of application of high-temperature microcircuits]. Available at: https://disk.yandex.ru/i/2OztJ_c6Fq1UHG (accessed 21 August 2023).
10. Bahl I.J. Control Components Using Si, GaAs, and GaN Technologies. Artech House, 2014, 325 p.
11. Hassan A., Ali M., Trigui A., Savaria Y., Sawan M. A GaN-based wireless monitoring system for high-temperature applications, *Sensors*, 2019, Vol. 19, No. 8, pp. 1785.
12. Publikatsii, otrazhayushchie obshchie svoystva GaAs, GaN, SiC i osobennosti tekhnologicheskikh protsessov [Publications reflecting the general properties of GaAs, GaN, SiC and features of technical processes]. Available at: <https://disk.yandex.ru/i/2mNo3yo9eqiWhQ> (accessed 21 August 2023).
13. Publikatsii po vysokotemperaturnym komp'yuternym modelyam tranzistorov [Publications on high-temperature computer models of transistors]. Available at: https://disk.yandex.ru/i/x50jo_RvnMtHHQ (accessed 21 August 2023).

14. Vitanov S., Palankovski V., Maroldt S., Quay R. High-temperature modeling of AlGaIn/GaN HEMTs, *Solid-State Electronics*, 2010, Vol. 54, No. 10, pp. 1105-1112.
15. Publikatsii po vysokotemperaturnoy elektronike na GaN [Publications on high-temperature electronics on GaN]. Available at: <https://disk.yandex.ru/d/YTYyxjPoFFImKw> (accessed 21 August 2023).
16. Publikatsii po vysokotemperaturnoy elektronike na GaAs [Publications on high-temperature electronics based on GaAs]. Available at: <https://disk.yandex.ru/i/OM5WL1jNfIGFcg> (accessed 21 August 2023).
17. Soong C.-W., Patil A.C., Garverick S.L., Fu X., Mehregany M. 550°C Integrated Logic Circuits using 6H-SiC JFETs, *Electron Device Letters*. IEEE, 2012, Vol. 33, No. 10, pp. 1369-1371.
18. Spry D.J., Neudeck P.G., Chang C. Experimental study on mitigation of lifetime-limiting dielectric cracking in extreme temperature 4H-SiC JFET Integrated Circuits, *Materials Science Forum*. Trans Tech Publications Ltd, 2020, Vol. 1004, pp. 1148-1155.
19. Stum Z., Tilak V., Losee P.A., Andarawis E.A., Chen C.P. 300° C Silicon Carbide Integrated Circuits, *Materials Science Forum*, 2011, Vol. 679-680, pp. 730-733.
20. Brown D.M. Silicon Carbide MOSFET Integrated Circuit Technology, *Physica Status Solidi (A)*, 1997, Vol. 162, pp. 459-479.
21. Patil A.C., Fu X.A., Anuponggongarch C., Mehregany M., Garverick S.L. 6H-SiC JFETs for 450 °C Differential Sensing Applications, *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2009, Vol. 18, No. 4, pp. 950-961.
22. Khanna V.K. Extreme-temperature and harsh-environment electronics: physics, technology and applications, *IOP Publishing*, 2023. DOI: 10.1088/978-0-7503-5072-3.
23. Publikatsii po vysokotemperaturnoy elektronike na SiC [Publications on High Temperature Electronics on SiC]. Available at: <https://disk.yandex.ru/i/zW4DgGBx9B9aQA> (accessed 21 August 2023).
24. Rahman A., Roy S., Murphree R., Kotecha R., Addington K., Abbasi A., Mantooth H.A., Francis A.M., Holmes J., Di J. High-temperature SiC CMOS comparator and op-amp for protection circuits in voltage regulators and switch-mode converters, *Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. IEEE. 2016, Vol. 4, No. 3, pp. 935-945.
25. Patil A.C., Fu X.A., Mehregany M., Garverick S.L. Fully-monolithic, 600°C differential amplifiers in 6H-SiC JFET IC technology, *Proceedings of the CICC*. IEEE, 2009, pp. 73-76.
26. Neudeck P.G., Garverick S.L., Spry D.J., Chen L.Y., Beheim G.M., Krasowski M.J., Mehregany M. Extreme temperature 6H-SiC JFET integrated circuit technology, *Physica Status Solidi (A)*, 2009, Vol. 206, No. 10, pp. 2329-2345.
27. Publikatsii po problemam vysokotemperaturnoy analogovoy skhemotekhniki na GaN, SiC, GaAs [Publications on the problems of high-temperature analog circuitry based on GaN, SiC, GaAs]. Available at: <https://disk.yandex.ru/i/R0kIX06Fmpw6Ig> (accessed 21 August 2023).
28. Vikulov I. Monolitnye integral'nye skhemy SVCh tekhnologicheskaya osnova AFAR [Microwave monolithic integrated circuits are the technological basis of AFAR], *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes* [Electronics: science, technology, business], 2012, No. 7, pp. 060-073.
29. Publikatsii po seriyным vysokotemperaturnym mikroskhemam [Publications on serial high-temperature microcircuits]. Available at: <https://disk.yandex.ru/i/eacY7GF4CDRtgg> (accessed 21 August 2023).
30. Publikatsii v oblasti SVCh izdeliy na GaN [Publications in the field of microwave products based on GaN]. Available at: <https://disk.yandex.ru/i/inwYk5hcV1jjpg> (accessed 21 August 2023).
31. Lee H., Smet V., Tummala R. A review of SiC power module packaging technologies: Challenges, advances, and emerging issues, *Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. IEEE, 2019, Vol. 8, No. 1, pp. 239-255.
32. Publikatsii v oblasti silovoy vysokotemperaturnoy elektroniki [Publications in the field of power high temperature electronics]. Available at: https://disk.yandex.ru/d/SB1_FPzrpFJP9A (accessed 21 August 2023).
33. Publikatsii po problemam konstruktivno-tekhnologicheskikh resheniy vysokotemperaturnykh mikroskhem i otvoda tepla [Publications on the problems of constructive and technological solutions for high-temperature microcircuits and heat removal]. Available at: <https://disk.yandex.ru/i/9w7ZTgNQj13jZQ> (accessed 21 August 2023).

34. Lee H., Smet V., Tummala R. A review of SiC power module packaging technologies: Challenges, advances, and emerging issues, *Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. IEEE, 2019, Vol. 8, No. 1, pp. 239-255.
35. Vysokotemperaturnaya i almaznaya elektronika, primeneniye, osobennosti i konstruktssii [High temperature and diamond electronics, application, features and designs]. Available at: <https://intellect.icu/vysokotemperaturnaya-i-almaznaya-elektronika-primeneniye-osobennosti-i-konstruktssii-8496> (accessed 01 August 2023).
36. Watson J., Castro G. A review of high-temperature electronics technology and applications, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2015, Vol. 26, pp. 9226-9235.
37. Svoystva i kharakteristiki SiC [Properties and characteristics of SiC]. Available at: <https://www.prosof.ru/products/types/poluprovodnikovye-materialy/362515/362988/> (accessed 01 August 2023).
38. Wang J., Zhu Z., Liu S., Ding R. A low-noise programmable gain amplifier with fully balanced differential difference amplifier and class-AB output stage, *Microelectronics Journal*, 2017, Vol. 64, pp. 86-91.
39. Royo G., Sanchez-Azqueta C., Martinez-Perez A.D., Aldea C., Celma S. Fully-differential transimpedance amplifier for reliable wireless communications, *Microelectronics Reliability*, 2018, Vol. 83, pp. 25-28.
40. Ku Y.-T., Hwang Y.-S., Chen J.-J., Shih C.-C., Cheng D. A new current-mode Wheatstone bridge based on a new fully differential operational transresistance amplifier, *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 2019, Vol. 101, pp. 85-92.
41. Sabry M.N., Nashaat I., Omran H. Automated design and optimization flow for fully-differential switched capacitor amplifiers using recycling folded cascode OTA, *Microelectronics Journal*, 2020, Vol. 101, pp. 104814. DOI: 10.1016/j.mejo.2020.104814.
42. Beev N., Kiviranta M. Fully differential cryogenic transistor amplifier, *Cryogenics*, 2013, Vol. 57, pp. 129-133. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2013.06.004.
43. Kim K., Yoo C. Time-Domain Operational Amplifier with Voltage-Controlled Oscillator and Its Application to Active-RC Analog Filter, *Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*. IEEE, 2020, Vol. 67, No. 3, pp. 415-419.
44. Gebreyohannes F. T., Loueratand M., Aboushady H. Design of a 4th-Order Feed-Forward-Compensated Operational Amplifier for Multi-GHz Sampling Frequency Continuous-Time Bandpass Sigma-Delta Modulators, *International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*. IEEE, 2019, pp. 1-5.
45. Flenrion W.S., Kruczkowski P.J., Sen S. Trans-impedance amplifier, US Patent 6.323.734, Feb. 29, 2001.
46. Ma D., Geng X., Dai F.F., Cressler J.D. A 6th order butterworth SC low pass filter for cryogenic applications from -180°C to 120°C , *Proceedings of the AEROS Conference*, 2009, pp. 1-8.
47. Watson J., Castro G. High-temperature electronics pose design and reliability challenges, *Analog Dialogue*, 2012, Vol. 46, No. 2, pp. 3-9.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. В.А. Сергеев.

Бугакова Анна Витальевна – Донской государственный технический университет; e-mail: annabugakova.1992@mail.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; тел.: +79094169380; к.т.н.; младший научный сотрудник Управления научных исследований; доцент кафедры информационных систем и радиотехники.

Кузнецов Дмитрий Владимирович – e-mail: dkuznetsov2000@mail.ru; тел.: +79525816170; магистрант кафедры информационных систем и радиотехники.

Чумаков Владислав Евгеньевич – e-mail: chumakov.dssa@mail.ru; тел.: +79895020032; аспирант кафедры информационных систем и радиотехники; инженер Управления научных исследований.

Клейменкин Дмитрий Владимирович – e-mail: k-dima-01@mail.ru; тел.: +79281970049; магистрант кафедры информационных систем и радиотехники.

Сергеенко Марсель Алексеевич – e-mail: mars1327el@gmail.com; тел: +79185704519; студент кафедры информационных систем и радиотехники.

Bugakova Anna Vitalievna – Don State Technical University; e-mail: annabugakova.1992@mail.ru; Rostov-on-Don, Russia; phone: +79094169380; cand. of eng. sc.; junior research fellow of the Office of scientific research; associate professor of the department of information systems and radio engineering.

Kuznetsov Dmitry Vladimirovich – e-mail: dkuznetsov2000@mail.ru; phone: +79525816170; master's student of the department of information systems and radio engineering.

Chumakov Vladislav Evgenievich – e-mail: chumakov.dssa@mail.ru; phone: +79895020032; graduate student of the department of information systems and radio engineering; research engineer of scientific research.

Kleimenkin Dmitriy Vladimirovich – e-mail: k-dima-01@mail.ru; phone: +79281970049; master's student of the department of information systems and radio engineering.

Sergeenko Marsel Alexeyevich – e-mail: mars1327el@gmail.com; phone: +79185704519; student of the department of information systems and radio engineering.

УДК 616-71; 519.688

DOI 10.18522/2311-3103-2023-4-254-264

М.Р. Шарипов, А.Ф. Фахрутдинов, П.А. Кокунин

МЕТОДЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ ЧАСТОТЫ СЕРДЕЧНЫХ СОКРАЩЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВСТРАИВАЕМЫХ В СМАРТФОНЫ СЕНСОРОВ

Неинвазивный мониторинг является перспективным направлением в медицине для определения биометрических показателей. Целью предлагаемого исследования является обзор современных неинвазивных методов определения биометрического показателя, такого как частота сердечных сокращений. Рассмотрены проблемные вопросы имеющихся решений, связанные с методами проведения расчетов и методиками проведения испытаний. В настоящее время смартфон является неотъемлемой частью жизни любого человека. С помощью этих устройств пользователи могут выполнять практически любые действия, не выходя из дома, например, делать покупки, смотреть фильмы и развлекаться, что делает их жизнь гораздо проще, удобнее и эффективнее. Кроме того, современные смартфоны имеют широкие возможности в сфере телекоммуникаций, позволяя группам людей часто общаться в режиме реального времени. В связи с пандемией COVID-19 актуальной стала необходимость мониторинга состояния здоровья, а также постоянного контроля биомедицинских показателей сотрудников, которые находятся на рабочем месте. Одним из важнейших показателей является частота сердечных сокращений, анализ этого показателя позволяет характеризовать работу важнейшей сердечно-сосудистой системы. В настоящем обзоре рассматриваются методики контроля частоты сердечных сокращений на основе методов, которые могут быть использованы на базе смартфонов, с использованием датчиков, которыми оснащаются все современные смартфоны. Основным подходом, который может быть применен в смартфонах для определения частоты сердечных сокращений является использование источника света и светочувствительного устройства, которое принимает свет, проходящий через капилляры, чаще всего пальца, человека у которого измеряется частота сердечных сокращений. Отличие подходов заключается в аппаратной части – какой источник света используется и что используется в качестве приемника отраженного света. В качестве источника света может использоваться светодиод, в смартфонах это мощные светодиоды, которые используются в фотовспышке, в качестве приемника либо фотодиод, либо видеокамера. В части обработки получаемого сигнала существует несколько подходов в настоящем обзоре они рассмотрены.

Частота сердечных сокращений; биомониторинг; смартфон; неинвазивный мониторинг; сенсор.

M.R. Sharipov, A.F. Fahrutdinov, P.A. Kokunin

**METHODS FOR OBTAINING INFORMATION FOR BIOMEDICAL
MONITORING OF HEART RATE USING BUILT-IN SMARTPHONE
SENSORS**

Non-invasive monitoring is a promising direction in medicine for determining biometric indicators. The purpose of the study is to review modern non-invasive methods for determining such biometric indicators as heart rate. The problems of existing solutions related to calculation formulas, as well as those related to testing are shown. Nowadays, a smartphone is an integral part of any person's life. With the help of these devices, users can perform almost any activity from the comfort of their homes, such as shopping, watching movies and entertainment, making their lives much easier, more convenient and efficient. In addition, today's smartphones have extensive telecommunication capabilities, allowing groups of people to communicate frequently in real time. With the COVID-19 pandemic, the need for health monitoring has become relevant, as well as the need to constantly monitor the biomedical indicators of employees who are on the job. One of the most important indicators is the heart rate, the analysis of this indicator allows to characterize the performance of the most important cardiovascular system. This review discusses techniques for monitoring heart rate based on methods that can be utilized on smartphones, using sensors that all modern smartphones are equipped with. The basic approach that can be applied in smartphones to detect heart rate is to use a light source and a light-sensitive device that receives light passing through capillaries, most commonly the finger of the person whose heart rate is being measured. The difference between the approaches lies in the hardware - what light source is used and what is used as a receiver of reflected light. As a light source can be used LED, in smartphones it is powerful LEDs, which are used in the photoflash, as a receiver or photodiode or video camera. In terms of processing the received signal there are several approaches in this review they are considered.

Heart rate; biomonitoring; smartphone; non-invasive monitoring.

Введение. Важным фактором, определяющим продуктивность работников и благоприятный климат любого предприятия, является хорошее здоровье его сотрудников. В исследовании Каратаевой [1] показано, что здоровье людей является важнейшим условием для полноценной жизни в обществе, а здоровье населения непосредственно влияет на экономику страны, что показано в исследовании [2].

Исследования в области мониторинга состояния человека неинвазивным путем в течение последних 10 лет обрели высокую популярность в связи с всеобщей цифровизацией. Также с началом пандемии COVID-19 появилась потребность мониторинга медицинских параметров сотрудников – при работе в транспорте, в офисе и на производстве.

В целом решения для мониторинга биомаркеров можно разделить на два класса:

- 1) реализуемые на основе специального медицинского оборудования;
- 2) реализуемые на основе смартфонов, в этом случае используются различные виды датчиков, которые есть в смартфонах или их комбинация.

Подходы для контроля и анализа показателей жизнедеятельности с использованием датчиков носимых устройств, таких как умные часы или фитнес-браслеты представлены в работах [10–12], для контроля такого важного биомаркера, как частота сердечного сокращения [3], наиболее распространены подходы на основе анализа фотоплетизмограмм, реализация методов на основе такого анализа представлены в работах [6–9], здесь на аппаратном уровне используется фотодиод для приема сигнала от инфракрасного излучателя, который освещает поверхность пальца. Частота ритма определяется количеством пиков сигнала в минуту, при прохождении света через капилляры пальца.

В области неинвазивного мониторинга состояния здоровья человека существует ряд существенных проблем, решения на основе неинвазивного мониторинга представлены в работах [16–20], проблемы при этом следующие:

1) проблема движения человека – на показатели измерения некоторых биомаркеров существенно влияет изменения положения тела человека, его перемещение;

2) проблема датчиков – некоторые биомаркеры могут быть измерены, при использовании нескольких отдельных устройств, размеры которых могут быть большими;

3) проблема батареи – датчики, требуют электрического питания, а для компактного устройства требуются небольшие гибкие батареи, которых пока не так много на потребительском рынке.

Большое количество исследований основано на узкоспециализированных решениях, при этом комплексные подходы для мониторинга с применением смартфонов предлагаются реже. С точки зрения биомедицинского мониторинга наиболее важны базовые биомаркеры, выход за пределы, допустимых значений которых чревато негативными последствиями для человека. В рамках данной статьи рассматриваются исследования по измерению частоты сердечных сокращений, которые являются потенциально реализуемыми на смартфонах.

Обзор основных исследований по методам фиксирования биомедицинских показателей приводится во второй части. В третьей части обсуждаются проведенные исследования и открытые проблемы. В заключении обозначены направления для дальнейших исследований и разработок.

Методы вычисления частоты сердечных сокращений. Частота сердечных сокращений (ЧСС) является одним из самых простых и самых важных показателей состояния здоровья человека, так как проблемы с сердцем могут повлечь за собой фатальные последствия. ЧСС позволяет определить такие отклонения как, брадикардию и тахикардию, которые в определенных обстоятельствах могут свидетельствовать, о предобморочном состоянии, возможной аритмии, которая может повлечь за собой такие осложнения как инфаркт миокарда, острую сердечную недостаточность, ишемический инсульт. Мониторинг ЧСС позволяет вовремя обратиться к специалисту, для предотвращения или минимизации негативных последствий.

В работе [3] Туви Орбач и Костас Мариас предложили метод мобильного мониторинга на примере детектирования ЧСС при помощи мобильного телефона. В своей статье авторы обращают внимание на то, что на момент публикации уже существовали системы, которые имели в своем составе мобильные телефоны, однако они лишь выполняли функцию демонстрации результатов измерений с датчиков, а также могли выполнять дополнительные вычисления [8]. Поэтому подход авторов статьи заключался в реализации решения с использованием сенсоров мобильного телефона. В их решении датчиком для измерения сердечных сокращений используется камера мобильного телефона со вспышкой, в результате анализа данных с которой получается фотоплетизмограммы. Прижимая палец к вспышке и к камере смартфона, измеряется показатель средней яркости каждого кадра изображения, при просвечивании пальца вспышкой. Сокращение сердца создает волну крови, которая достигает капилляр, на кончиках пальца, создавая препятствие свету, что влечет за собой снижения средней яркости изображения. Путем подсчета локальных экстремумов на графике зависимости средней яркости изображения от времени вычисляется ЧСС по следующей формуле:

$$HR = \frac{60 \cdot n}{t}, \quad (1)$$

где n – количество локальных экстремумов, соответствующих притоку крови к капиллярам пальца, t – размер временного окна в секундах. Для определения точности предложенного авторами подхода, был поставлен эксперимент, по получе-

нию значений фактической ЧСС и показателей, полученных при помощи камеры смартфона с частотой кадров 25 кадров в секунду. При хорошем освещении средняя ошибка подхода составила 4.13%, а максимальная ошибка 8.11%. При плохом освещении средняя ошибка составила 4.67%, а максимальная ошибка 10.13%. Авторы исследования заложили концепт недорогого решения для простейшего медицинского обследования, которое может провести большинство людей самостоятельно.

П.Т. Тунггал, А. Латиф, Исванто в своей работе [22] движимые целью создания более мобильного аппаратного решения для измерения ЧСС разработали компактный вариант датчика сердечных сокращений. Их решение состоит из инфракрасного (ИК) излучателя, фотодиода, усилителя, фильтра, одновибратора и микроконтроллера.

Принцип работы их решения заключается в следующем: ИК излучатель испускает ИК сигнал, проходящий через палец пациента, после чего фиксируется фотодиодом. Ввиду малой амплитуды сигнала на фотодиоде он подается на не инвертирующий усилитель, затем для избавления от шумовой составляющей сигнала происходит обработка фильтром низких частот и наконец поступает на одновибратор, формирующий импульсы для подсчета ЧСС.

Подсчет импульсов выполняется с помощью микроконтроллера AVR ATMEGA8, приходящих на вход микроконтроллера за минуту, рассчитанное значение ЧСС микроконтроллер выводит на LCD дисплей. Так же их алгоритм определяет брадикардию и тахикардию. Аппаратное решение было проверено на группе добровольцев.

В работе [10] Викрам Чандрасекаран использует метод схожий с [3], но имеющий отличия. Для анализа автор использует лишь квадрант кадра изображения, аргументируя это тем, что там находятся самые значимые флуктуации яркости. Из полученной области интереса, которая представляется в цветовой схеме RGB, рассматривается только R пиксели, которые отображают интенсивность красного цвета, и производится расчет средней интенсивности. Значения интенсивности, полученные во временном окне, обрабатываются фильтром скользящего среднего, чтобы выявить наиболее значимые локальные экстремумы и минимизировать побочные экстремумы, которые использовались для расчета частоты сердечных сокращений по формуле (1). В результате испытаний, автор выяснил, что размер временного окна влияет на точность определения частоты сердечных сокращений (чем больше, тем точнее). Ввиду этого автор разработал алгоритм калибровки, для улучшения результатов, с целью минимизации размера временного окна. Алгоритм калибровки рассчитывает калибровочный коэффициент по следующей формуле:

$$Ex = t - N * pk2pk, \quad (2)$$

где t – размер временного окна в секундах, N – число пиков, $pk2pk$ – время между двумя соседними пиками.

Калибровка выполняется следующим образом:

1. Если значение калибровочного коэффициента больше или равен $pk2pk$, значение N корректируется по формуле:

$$N = N + 1. \quad (3)$$

2. Если значение калибровочного коэффициента больше или равен $pk2pk / 2$, значение N корректируется по формуле:

$$N = N - (pk2pk - Ex) * \frac{60}{t}. \quad (4)$$

Далее, частота сердечных сокращений, вычисляется по формуле (1). Эксперименты по определению точности разработанного алгоритма показали, среднюю ошибку равную 2%, при временном окне 15 секунд.

Как и в работах [3, 10, 14, 15], Луис Фелипе Хименес, Авинаш Парнанди и Рикардо Гутьеррес Осуна [13] предлагают измерять ЧСС при помощи камеры и вспышки смартфона, в их случае использовался смартфон Apple iPhone 4. Испытуемого инструктировали дышать с контролируемой частотой дыхания 6, 10, 12 дыханий в минуту, что соответствует 0,16; 0,1 и 0,2 Гц. Задавая ритм для дыхания, испытуемого указывали делать вдох и выдох в соответствующее время для поддержания желаемой частоты дыхания. Кроме того, у того же испытуемого были записаны три набора неконтролируемых данных: дыхание в обычном темпе, при упражнении выполняемых сидя и при ходьбе. Видео записывалось с частотой дискретизации 29,97 кадров в секунду при плотности пикселей изображения 1280 x 720. После того как видеозаписи были записаны, для анализа полученных данных использовалась среда Matlab. Инструмент VideoReading, предлагаемый в Matlab, был использован для извлечения кадров из перекодированного видео. Затем из каждого кадра были извлечены компоненты RGB. Однако для данного исследования использовались только значения зеленого цвета для расчета среднего значения уровня светового потока, поглощенного тканями пальца в каждом кадре. Таким образом, получен сигнал фотоплетизмографии (PPG), который используется для определения ЧСС. Из записанного видео были извлечены значения зеленого цвета из каждого кадра, чтобы получить сигнал PPG. Средние значения интенсивности зеленого цвета в сигнале PPG формировали пики, которые соответствовали сердечному пульсу. Для поиска всех кардиологических пиков в сигнале использовался алгоритм обнаружения пиков. Как только пик был найден, вычислялась разница во времени между последовательными пиками. Эта разница во времени известна как вариабельность сердечного ритма (BCR). По значениям BCR оценивалась ЧСС по формуле:

$$\text{ЧСС} = \frac{60}{\text{BCR}}. \quad (5)$$

Собранные данные с мобильного телефона и биопояса были синхронизированы и пересчитаны для поддержания единой частоты дискретизации. Оценка ЧСС с помощью камеры мобильного телефона была сопоставлена с измерениями биопояса, и была выявлена высокая корреляция. Сигналы с биопояса появлялись с опережением, авторы объясняют это тем, что он пояс расположен ближе к сердцу, чем палец на камере мобильного телефона.

Для количественной оценки точности частоты сердечных сокращений, полученных с помощью камеры мобильного телефона (с автономной обработкой на Matlab) в реальном времени, были оценены абсолютная средняя ошибка (АСР), стандартное отклонение ошибки (СОО), среднеквадратичная ошибка (СКО) и коэффициенты корреляции. Три набора контролируемых и неконтролируемых данных были записаны с помощью камеры мобильного телефона и коммерческого датчика (BioHarness). Контролируемые данные записывались на трех различных частотах 0,1, 0,2 и 0,16 Гц, что соответствует 6, 12 и 10 вдохов в минуту.

Как и в работе [3], авторы Авнеендра Канва, Чандан Шарма и Суджай Деб [10] используют камеру и вспышку смартфона и вычисляют ЧСС по формуле (1). Результаты измерения ЧСС авторы не предоставили.

В работе [24] авторы также используют метод получения ЧСС на основе анализа фотоплетизмографии, полученной с применением камеры и вспышки смартфона, но каких-либо формул для вычисления ЧСС не приводят.

В качестве критериального показателя авторы использовали среднее значение ЧСС в минуту, полученное с помощью биоимпедансного кардиографа BioZ с использованием скользящего среднего за 4 такта. Значения ЧСС, записанные с мобильного телефона и пульсоксиметра Nonin, усреднялись и сравнивались с ЭКГ в соответствующие периоды времени. Были рассчитаны коэффициенты корреляции Пирсона (r) и стандартные ошибки оценки (SEE). Поскольку ожидается, что получаемые данные от различных устройств будут иметь высокую корреляцию при измерении одного и того же сигнала, согласованность показаний трех устройств оценивалась для каждого вида деятельности с помощью графиков Бланда-Альмана для повторных измерений с 95% границами согласия. Значение ЧСС при чтении вслух и в процессе игры в видеоигру увеличивалось по сравнению с условиями покоя, когда пациент сидел, что ожидаемо. Показатели ЧСС, полученные с помощью мобильного телефона, имели высокую корреляцию с показателями ЭКГ BioZ ($r \geq 0,99$), а SEE, рассчитанные между ЭКГ смартфоном и BioZ, составляли ≤ 1 уд/мин во всех условиях. Также наблюдалась высокая корреляция между смартфоном и Nonin 9560BT во всех условиях ($r_s \geq .99$, $SEE \leq 2,09$ уд/мин). Авторы отмечают, что высокая корреляция при измерении различными устройствами не обязательно означает адекватное согласие, поскольку данные с двух устройств измерения ЧСС могут совпадать в любой линейной плоскости и приводить к высоким коэффициентам корреляции.

В работе [25] авторы используют микроконтроллер, на котором установлен датчик измерения ЧСС, который получает результат из сигнала фотоплетизмографии. Датчик измерения ЧСС пять раз вычислял частоту кровотока двух пациентов в течение 60 секунд. В качестве сравнения авторы использовали прибор – оксиметр Mindray.

Таблица 1

Сравнительная таблица решений по измерению частоты сердечных сокращений

Решение	Вид решения	Точность
[3]	ПО для мобильного устройства	Ошибка: 4.13%
[21]	Компактное аппаратное решение	Представлено не было
[10]	ПО для мобильного устройства	Ошибка: 2%
[13]	ПО для мобильного устройства	Ошибка от 5.35 до 8.71 уд./мин.
[22]	ПО для мобильного устройства	Представлено не было
[24]	ПО для мобильного устройства	Ошибка не более 2.09 уд./мин.
[25]	Аппаратное решение	Ошибка: 3.1%

Обсуждение и открытые проблемы. Рассмотренные решения определения основных биометрических показателей человека в большей степени направлены на широкое распространение доступных способов определения этих показателей. Сегодня преобладают решения по вычислению ЧСС на базе смартфонов. Однако, с глобальной точки зрения, основная проблема заключается в отсутствии единой системы по измерению указанных показателей ввиду того, что в основном решения сочетают в себе определения 1-2 биометрических показателей.

Более того, отсутствуют решения для определения этих показателей на одном устройстве полностью выполненных на доступной элементной базе в виде отдельных устройств, где более 80% компонентов являются продуктами отечественного производства, что важно для работников предприятий, находящихся на режимных объектах, связанных с опасным производством, где своевременное выявление нарушения показателей биометрии может сэкономить время для оказания первой медицинской помощи и спасти жизнь человека.

Самым распространенным решением является использование фотоплетизмографии для определения основных показателей биометрии. Стоит отметить, что испытания рассмотренных решений были проведены недостаточно полно. Не хватает данных по испытаниям на испытуемых детского-подросткового возраста (до 16 лет), а также пожилых людей (от 60 лет). К тому же, расчет самих показателей часто связан с использованием эмпирически полученных констант, что приводит к ухудшению точности измерений, если рассматривать реализацию систем на смартфонах неизбежно возникает вопрос о необходимости разработки корректной процедуры калибровки, не только под каждого пользователя, но и под каждое устройство, в виду различия типов используемых датчиков и соответственно отличия их основных параметров. В большей степени калибровка требуется для систем определения артериального давления. Стоит отметить, что алгоритмы машинного обучения позволяют получать решения с хорошей точностью определения значения показателей, однако такие алгоритмы требуют больших вычислительных мощностей при реализации на конечном компактном устройстве, либо требуется использование вычислительного сервера, при со сложной архитектурой моделей машинного обучения, а также соответствующие объемы обучающих данных, которая будет содержать в себе большое количество биометрических параметров.

Выводы. В обзоре были рассмотрены методы определения частоты сердечных сокращений основанные на фиксации изменения яркости света при прохождении его через капилляры, которое происходит вследствие изменения потока крови в капиллярах. Такой метод позволяет использовать относительно простые датчики, которые могут быть реализованы на базе смартфонов. В аппаратной части среди рассмотренных подходов выделено два, в одном в качестве источника света используется инфракрасный излучатель, в качестве приемника фотодиод, во втором подходе – в качестве источника света используется мощный фотодиод, используемый в фотовспышке телефона, а в качестве приемника видео камера. Основное различие в подходах заключается в обработке получаемых с камеры или фотодиода данных, это либо анализ изменения яркости светового потока без выделения каких-либо его компонент, либо выделения определенных компонент, в рассмотренных работах выделяются компоненты красной и зеленой составляющих в цветовой схеме RGB и анализ проводится уже по этим составляющим. Все рассмотренные в обзоре методы могут быть реализованы на базе смартфонов.

Одной из проблем при использовании различных моделей смартфонов является то, что параметры сенсоров могут отличаться, что приводит к необходимости калибровки, также в рассмотренных решениях мало затронуты испытания на людях, находящихся в группе риска. К тому же отсутствуют комплексные компактные аппаратные решения по неинвазивному повседневному мониторингу биомаркеров. Данные проблемы потенциально решаемы и требуют дополнительных исследований и разработок.

Благодарность: Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета ("ПРИОРИТЕТ-2030").

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Каратаева Т.А.* Здоровье населения как важный фактор экономической безопасности // Вестник Алтайской академии экономики и права. – 2018. – № 5. – С. 142-145.
2. Влияние здоровья на экономическое развитие // Киберленинка. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-zdorovya-na-ekonomicheskoe-razvitiye> (дата обращения: 10.10.2021).
3. *Pelegris P., Banitsas K., Orbach T., Marias K.* A novel method to detect Heart Beat Rate using a mobile phone // 2010 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology. – Буэнос-Айрес: IEEE, 2010. – P. 5488-5491.
4. *Antoniou P.; Nestoros M.; Polycarpou A.C.* Calculation of Heartbeat Rate and SpO2 Parameters Using a Smartphone Camera: Analysis and Testing // Sensors. – 2023, 23, 737. – <https://doi.org/10.3390/s23020737>.
5. *Moïse N. Sydney, Flanders Wyatt H., Pariaut Romain.* Beat-to-Beat Patterning of Sinus Rhythm Reveals Non-linear Rhythm in the Dog Compared to the Human // Frontiers in Physiology. – 2020. – Vol. 10. – DOI: 10.3389/fphys.2019.01548. – ISSN=1664-042X.
6. Low-cost portable heart rate monitoring based on photoplethysmography and decision tree // AIP Publishing. – URL: <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.4958522> (дата обращения: 10.11.2021).
7. *Sun Biao & Zhang Zhilin.* Photoplethysmography-Based Heart Rate Monitoring Using Asymmetric Least Squares Spectrum Subtraction and Bayesian Decision Theory // IEEE Sensors Journal. – 2015. – 15. – 1-1. – 10.1109/JSEN.2015.2473697.
8. *Zhang Zhilin.* Photoplethysmography-Based Heart Rate Monitoring in Physical Activities via Joint Sparse Spectrum Reconstruction // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 2015. – 62. – P. 1902-1910. – 10.1109/TBME.2015.2406332.
9. *Riaz Mubarak.* Design and Fabrication of Arduino Based Heart Rate Monitoring System Using Reflectance Photoplethysmography Mubarak Riaz. – 2019.
10. Measuring Vital Signs Using Smart Phones // Digital Library. – URL: https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc33139/m2/1/high_res_d/thesis.pdf (дата обращения: 10.11.2021).
11. *Sowmya G.* IOT Based Health Monitoring System // International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology. – 2021. – 9. – P. 1176-1178. – 10.22214/ijraset.2021.37363.
12. *Baskar Thyla & Bhuvanesh G. & Jacob A. & Abishek M.* Smart Stretcher for Measuring Vital Signs of Unconscious Persons // ECS Transactions. – 2022. – 107. – P. 533-541. – 10.1149/10701.0533ecst.
13. Extracting heart rate and respiration rate using a cell phone camera // Dreuarchive. – URL: <https://www.dreuarchive.cra.org/2013/Jimenez/documents/EXTRACTING%20HEART%20RATE%20AND%20RESPIRATION%20RATE%20USING%20A%20CELL%20PHONE%20CAMERA.pdf> (дата обращения: 10.11.2021).
14. *Kshirsagar Shruti & Chhajed Gyankamal.* Heart Rate, Respiration Rate and Oxygen Saturation Level Monitoring from Video Recording by Smart phone camera. – 2021. – 2884.
15. *Van den Broek, Naomi & Van Meulen, Fokke & Ross M. & Cerny A. & Anderer P. & Gilst M. & Pillen S. & Overeem Sebastiaan & Fonseca Pedro.* Automated sleep staging in people with intellectual disabilities using heart rate and respiration variability // Journal of Intellectual Disability Research. – 2023. – 10.1111/jir.13060.
16. *Xu C., Yang Y., Gao W.* Skin-Interfaced Sensors in Digital Medicine: from Materials to Applications // Matter. – 2020. – No. 2. – P. 1414-1445.
17. *Wang X. & Liu Yangchengyi & Cheng Huanyu & Ouyang Xiaoping.* Surface Wettability for Skin-Interfaced Sensors and Devices // Advanced Functional Materials. – 2022. – 32. – 10.1002/adfm.202200260.
18. *Min Jihong & Tu Jiaobing & Xu Changhao & Lukas Heather & Shin Soyoung & Yang Yiran & Solomon Samuel & Mukasa Daniel & Gao Wei.* Skin-Interfaced Wearable Sweat Sensors for Precision Medicine // Chemical Reviews. – 2023. – 123. – 10.1021/acs.chemrev.2c00823.
19. *Yangzhi Zhu & Li Jinghang & Kim Jinjoo & Li Shaopei & Zhao Yichao & Bahari Jamal & Eliahoo Payam & Li Guanghui & Kawakita Satoru & Haghniaz Reihaneh & Gao Xiaoxiang & Falcone Natasha & Ermis Menekse & Kang Heemin & Liu Hao & Kim Hanjun & Tabish Tanveer & Yu Haidong & Li Bingbing & Khademhosseini Ali.* Skin-interfaced electronics: A promising and intelligent paradigm for personalized healthcare // Biomaterials. – 2023. – 296. – 122075. – 10.1016/j.biomaterials.2023.122075.

20. Liu Claire & Kim Jin-Tae & Yang, Da & Cho Donghwi & Yoo Seonggwang & Madhvapathy Surabhi & Jeong Hyoyoung & Yang Tianyu & Luan Haiwen & Avila Raudel & Park Jihun & Wu Yunyun & Bryant Kennedy & Cho Min & Lee JiYong & Kwak Jay & Ryu WonHyoung & Huang Yonggang & Nuzzo Ralph & Rogers John. Multifunctional Materials Strategies for Enhanced Safety of Wireless, Skin-Interfaced Bioelectronic Devices // *Advanced Functional Materials*. – 2023. – 10.1002/adfm.202302256.
21. Pantelopoulos A., Bourbakis N. A Survey on Wearable Biosensor Systems for Health Monitoring // 30th Annual International IEEE EMBS Conference. – Columbia: IEEE, 2008. – P. 4887-4890.
22. Mengelkoch L., Martin D., Lawlew J. A review of the principles of pulse oximetry and accuracy of pulse oximeter estimates during exercise // *Physical Therapy*. – 1994. – No. 74. – P. 40-49.
23. Kanwa A., Sharma C., Deb S. Determination of SpO2 and Heart-rate using Smartphone Camera // *Proceedings of the 2014 International Conference on Control, Instrumentation, Energy and Communication (CIEC)*. – 2014. – P. 40-49.
24. Development and Validation of a Smartphone Heart Rate Acquisition Application for Health Promotion and Wellness Telehealth Applications // *Semantics Scholar*. – URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Development-and-Validation-of-a-Smartphone-Heart-Gregoski-Mueller/6e5cfb91e1bbab624a47238cf3c1475ae1c08014> (дата обращения: 06.11.2021).
25. Wijaya N., Fauzi F., Helmy E., Nguyen P., Atmoko R. The Design of Heart Rate Detector and Body Temperature Measurement Device Using ATMega16 // *Journal of Robotics and Control (JRC)*. – 2020. – No. 2. – P. 40-43.

REFERENCES

1. Karataeva T.A. Zdorov'e naseleniya kak vazhnyy faktor ekonomicheskoy bezopasnosti [Population health as an important factor of economic security], *Vestnik Altayskoy akademii ekonomiki i prava* [Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law], 2018, No. 5, pp. 142-145.
2. Vliyanie zdorov'ya na ekonomicheskoe razvitiye [The influence of health on economic development], *Kiberleninka* [Cyberleninka]. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-zdorovya-na-ekonomicheskoe-razvitiye> (accessed 10 October 2021).
3. Pelegris P., Banitsas K., Orbach T., Marias K. A novel method to detect Heart Beat Rate using a mobile phone, *2010 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology*. Buenos Ayres: IEEE, 2010, pp. 5488-5491.
4. Antoniou P.; Nestoros M.; Polycarpou A.C. Calculation of Heartbeat Rate and SpO2 Parameters Using a Smartphone Camera: Analysis and Testing, *Sensors*, 2023, 23, 737. Available at: <https://doi.org/10.3390/s23020737>.
5. Moïse N. Sydney, Flanders Wyatt H., Pariaut Romain. Beat-to-Beat Patterning of Sinus Rhythm Reveals Non-linear Rhythm in the Dog Compared to the Human, *Frontiers in Physiology*, 2020, Vol. 10. DOI: 10.3389/fphys.2019.01548. – ISSN=1664-042X.
6. Low-cost portable heart rate monitoring based on photoplethysmography and decision tree, *AIP Publishing*. Available at: <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.4958522> (accessed 10 October 2021).
7. Sun Biao & Zhang Zhilin. Photoplethysmography-Based Heart Rate Monitoring Using Asymmetric Least Squares Spectrum Subtraction and Bayesian Decision Theory, *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15, 1-1, 10.1109/JSEN.2015.2473697.
8. Zhang Zhilin. Photoplethysmography-Based Heart Rate Monitoring in Physical Activities via Joint Sparse Spectrum Reconstruction, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2015, 62, pp. 1902-1910. 10.1109/TBME.2015.2406332.
9. Riaz Mubarak. Design and Fabrication of Arduino Based Heart Rate Monitoring System Using Reflectance Photoplethysmography Mubarak Riaz., 2019.
10. Measuring Vital Signs Using Smart Phones, *Digital Library*. Available at: https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc33139/m2/1/high_res_d/thesis.pdf (accessed 10 November 2021).
11. Sowmya G. IOT Based Health Monitoring System, *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 2021, 9, pp. 1176-1178. 10.22214/ijraset.2021.37363.
12. Baskar Thyla & Bhuvanesh G. & Jacob A. & Abishek M. Smart Stretcher for Measuring Vital Signs of Unconscious Persons, *ECS Transactions*, 2022, 107, pp. 533-541. 10.1149/10701.0533ecst.

13. Extracting heart rate and respiration rate using a cell phone camera, *Dreuarhive*. Available at: <https://www.dreuarhive.cra.org/2013/Jimenez/documents/EXTRACTING%20HEART%20RATE%20AND%20RESPIRATION%20RATE%20USING%20A%20CELL%20PHONE%20CAMERA.pdf> (accessed 10 November 2021).
14. Kshirsagar Shruti & Chhajed Gyankamal. Heart Rate, Respiration Rate and Oxygen Saturation Level Monitoring from Video Recording by Smart phone camera, 2021, 2884.
15. Van den Broek, Naomi & Van Meulen, Fokke & Ross M. & Cerny A. & Anderer P. & Gilst M. & Pillen S. & Overeem Sebastiaan & Fonseca Pedro. Automated sleep staging in people with intellectual disabilities using heart rate and respiration variability, *Journal of Intellectual Disability Research*, 2023. 10.1111/jir.13060.
16. Xu C., Yang Y., Gao W. Skin-Interfaced Sensors in Digital Medicine: from Materials to Applications, *Matter.*, 2020, No. 2, pp. 1414-1445.
17. Wang X. & Liu Yangchengyi & Cheng Huanyu & Ouyang Xiaoping. Surface Wettability for Skin-Interfaced Sensors and Devices, *Advanced Functional Materials*, 2022, 32. 10.1002/adfm.202200260.
18. Min Jihong & Tu Jiaobing & Xu Changhao & Lukas Heather & Shin Soyoung & Yang Yiran & Solomon Samuel & Mukasa Daniel & Gao Wei. Skin-Interfaced Wearable Sweat Sensors for Precision Medicine, *Chemical Reviews*, 2023, 123. 10.1021/acs.chemrev.2c00823.
19. Yangzhi Zhu & Li Jinghang & Kim Jinjoo & Li Shaopei & Zhao Yichao & Bahari Jamal & Eliahoo Payam & Li Guanghui & Kawakita Satoru & Haghnaz Reihaneh & Gao Xiaoxiang & Falcone Natasha & Ermis Menekse & Kang Heemin & Liu Hao & Kim Hanjun & Tabish Tanveer & Yu Haidong & Li Bingbing & Khademhosseini Ali. Skin-interfaced electronics: A promising and intelligent paradigm for personalized healthcare, *Biomaterials*, 2023, 296, 122075. 10.1016/j.biomaterials.2023.122075.
20. Liu Claire & Kim Jin-Tae & Yang, Da & Cho Donghwi & Yoo Seonggwang & Madhvapathy Surabhi & Jeong Hyoyoung & Yang Tianyu & Luan Haiwen & Avila Raudel & Park Jihun & Wu Yunyun & Bryant Kennedy & Cho Min & Lee JiYong & Kwak Jay & Ryu WonHyoungh & Huang Yonggang & Nuzzo Ralph & Rogers John. Multifunctional Materials Strategies for Enhanced Safety of Wireless, Skin-Interfaced Bioelectronic Devices, *Advanced Functional Materials*, 2023. 10.1002/adfm.202302256.
21. Pantelopoulos A., Bourbakis N. A Survey on Wearable Biosensor Systems for Health Monitoring, *30th Annual International IEEE EMBS Conference*. Columbia: IEEE, 2008, pp. 4887-4890.
22. Mengelkoch L., Martin D., Lawlew J. A review of the principles of pulse oximetry and accuracy of pulse oximeter estimates during exercise, *Physical Therapy*, 1994, No. 74, pp. 40-49.
23. Kanwa A., Sharma C., Deb S. Determination of SpO2 and Heart-rate using Smartphone Camera, *Proceedings of the 2014 International Conference on Control, Instrumentation, Energy and Communication (CIEC)*, 2014, pp. 40-49.
24. Development and Validation of a Smartphone Heart Rate Acquisition Application for Health Promotion and Wellness Telehealth Applications, *Semantics Scholar*. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Development-and-Validation-of-a-Smartphone-Heart-Gregoski-Mueller/6e5cfb91e1bbab624a47238cf3c1475ae1c08014> (accessed 06 November 2021).
25. Wijaya N., Fauzi F., Helmy E., Nguyen P., Atmoko R. The Design of Heart Rate Detector and Body Temperature Measurement Device Using ATmega16, *Journal of Robotics and Control (JRC)*, 2020, No. 2, pp. 40-43.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Б.Г. Коноплев.

Шарипов Марсель Ривкатович – Казанский (Приволжский) федеральный университет; e-mail: marselsharipov@live.ru; г. Казань, Россия; тел.: +79179324478; старший лаборант лаборатории малой вычислительной техники, кафедры системного анализа и информационных технологий Института вычислительной математики и информационных технологий.

Фахрутдинов Адель Фердинандович – e-mail: timvaz@yandex.ru; тел.: +79872934153; ведущий инженер-программист сектора высокоуровневой разработки Научно-исследовательского центра «Центр превосходства Специальная робототехника и искусственный интеллект» Института вычислительной математики и информационных технологий.

Кокунин Петр Анатольевич – e-mail: pkokunin@mail.ru; тел.: +79178732217; к.т.н.; ведущий научный сотрудник лаборатории медицинского интернета вещей Института вычислительной математики и информационных технологий.

Sharipov Marsel Rivkatovich – Kazan (Volga Region) Federal University; e-mail: marselsharipov@live.ru; Kazan, Russia; phone: +79179324478; senior laboratory at the Laboratory of small computing equipment, department of system analysis and information technologies, the Institute of Computer Mathematics and Information Technologies.

Fahrutdinov Adel Ferdinandovich – e-mail: timvaz@yandex.ru; phone: +79872934153; leading engineer-programmer of the high-level development sector of the Research Center "Center of excellence Special robotics and artificial intelligence" of the Institute of computer mathematics and information technologies.

Kokunin Petr Anatolevich – e-mail: pkokunin@mail.ru; phone: +79178732217; cand. of eng. sc.; leading researcher at the laboratory of the medical internet of things of the Institute of Computer Mathematics and Information Technologies.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ

1. Объем статьи должен быть не менее 12 и не более 18 страниц. Формат (А 4). Редактор **Word 7 for Windows**, шрифт Times New Roman, размер 14, интервал 1,5. Авторы представляют в редакцию 1 экз. статьи и идентичный электронный вариант.

2. Названию статьи предшествует индекс УДК, соответствующий заявленной теме.

3. Текст статьи начинается с названия статьи (на русском и английском языках), фамилии, имени и отчества автора (полностью) и снабжается аннотацией на русском и английском языках объемом **не менее 250-300 слов**. В тексте аннотации указывается цель, задачи исследования и краткие выводы. В аннотации **не следует** давать ссылки на номер публикации в списке литературы к статье. После аннотаций приводятся ключевые слова (словосочетания), несущие в тексте основную смысловую нагрузку (на русском и английском языках).

4. В тексте статьи следует использовать минимальное количество таблиц и иллюстраций. Рисунок должен иметь объяснения значений всех компонентов, порядковый номер, название, расположенное под рисунком. В тексте на рисунок дается ссылка. Таблица должна иметь порядковый номер, заголовок, расположенный над ней. Данные таблиц и рисунков не должны дублировать текст. Формулы должны быть набраны **в редакторе формул Word 7 for Windows**.

5. Цитаты тщательно сверяются с первоисточником и визируются автором на обратной стороне последней страницы: "Цитаты и фактический материал сверены". Подпись, дата.

6. Наличие пристатейного библиографического списка на русском и английском языках обязательно. **Ссылок должно быть не менее 20-ти**, из них на зарубежные источники – не менее 35 %. В тексте ссылки должны быть в квадратных скобках.

Примеры оформления литературы: а) для книг: фамилия, инициалы автора(ов), полное название книги, место, год издания, страницы; б) для статей: фамилия и инициалы автора(ов), полное название сборника, книги, газеты, журнала, где опубликована статья, место и год издания (сборника, книги), номер (для журнала), год и дата (для газеты), выпуск, часть (для сборника), страницы, на которых опубликована статья. Иностранная литература оформляется по тем же правилам.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

7. Рукопись должна быть тщательно вычитана. Редакционная коллегия оставляет за собой право при необходимости сокращать статьи, редактировать и отсылать авторам на доработку.

8. Статьи сопровождаются сведениями об авторе(ах) (фамилия, имя, отчество, ученое звание, должность, место работы, адрес, электронный адрес и номер телефона) на русском и английском языках.

9. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

Адрес журнала в Интернете: <http://izv-tn.tti.sfedu.ru/>.